

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ



Aleš Novák

**ANALÝZA ÚROVNĚ ČASOVÉ KOORDINACE
VEŘEJNÉ HROMADNÉ DOPRAVY V TŘEBÍČI**

Bakalářská práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K617 Ústav logistiky a managementu dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Aleš Novák

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – LOG – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Analýza úrovně časové koordinace veřejné hromadné dopravy v Třebíči**

Název tématu (anglicky): Analysis of Public Transport Time Coordination in Třebíč

Zásady pro vypracování

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

- Analýza současného stavu úrovně časové koordinace ve veřejné hromadné dopravě v Třebíči
- Identifikace existujících nedostatků v časové koordinaci
- Identifikace základních limitních faktorů ovlivňujících časovou koordinaci a obecná charakteristika možných následků v případě jejich neakceptování
- Identifikace potenciálu problematiky časové koordinace vedoucího ke zvýšení atraktivity veřejné hromadné dopravy v Třebíči
- Návrh možných směrů řešení (změny v lokalizaci přestupních uzlů, identifikace potřeby vzniku nových přestupních vazeb, vytipování úseků obsluhovaných více souběžnými linkami apod.)
- Ukázka aplikace vhodného optimalizačního přístupu na případě jednoho segmentu linkové sítě



TECHNICKÉ V PRAZE



Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Černá, A., Černý, J. Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech. Institut Jana Pernera, Praha, 2004

Surovec, P. Tvorba systému městské hromadnej dopravy. Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, 1999

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

Datum zadání bakalářské práce: **30. června 2017**

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **27. srpna 2018**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Aleš Novák
jméno a podpis studenta

V Praze dne30. června 2017

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi poskytli materiály a rady při vypracovávání této bakalářské práce. Zvláštní poděkování patří panu doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph. D. za zodpovědný přístup k vedení mé závěrečné práce. Díky jeho vstřícnému postoji a vysoce odborným znalostem této problematiky mi byla práce ulehčena. Zároveň bych také velmi rád poděkoval rodině a přátelům za jejich nekončící podporu a pomoc při řešení nejnepříjemnější situace během studia.

Prohlášení

Já, níže podepsaný Aleš Novák, předkládám k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, která byla zpracována na závěr bakalářského studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl 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 Třebíči dne 26. 8. 2018

.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ANALÝZA ÚROVNĚ ČASOVÉ KOORDINACE VEŘEJNÉ HROMADNÉ DOPRAVY V TŘEBÍČI

bakalářská práce

srpen 2018

Aleš Novák

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá přestupními vazbami systému městské hromadné dopravy (MHD) v Třebíči. Jsou popsány příčiny jejich vzniku, omezující podmínky a současný stav provozu. Byl vytvořen matematický model, jenž koresponduje s nynější situací MHD. Pomocí optimalizačního softwaru Xpress-IVE je s modelem experimentováno. Cílem je minimalizovat celkovou časovou ztrátu cestujících, kteří přestupují mezi jednotlivými spoji v centrálním přestupním uzlu a navrhnout úpravy, jež povedou k lepším výsledkům.

Abstract

This bachelor thesis deal with transfer linkages in the system of public transport in Třebíč. The transfer linkages, limiting conditions and current state are described in this document. Also the mathematical model of present situation of public transport in Třebíč was created. The optimization software Xpress-IVE is used for the experiment with created model. The aim of this work is to minimize total temporal loss transferring passengers between individual connections in central transfer hub and propose the adjustment to better results.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

**ANALÝZA ÚROVNĚ ČASOVÉ KOORDINACE
VEŘEJNÉ HROMADNÉ DOPRAVY V TŘEBÍČI**

bakalářská práce

srpen 2018

Aleš Novák

Klíčová slova

Třebíč, městská hromadná doprava, přestupní vazby, přestupní uzel, matematický model, omezující podmínky, optimalizační kritérium, optimalizační software, Xpress-IVE

Key words

Třebíč, public transport, transfer linkage, transfer hub, mathematical model, limiting conditions, objective value, optimization software, Xpress-IVE

Obsah

1 Úvod	7
2 Analýza současného stavu úrovně časové koordinace ve veřejné hromadné dopravě v Třebíči.....	9
2.1 Vývoj linkového vedení MHD Třebíč.....	9
2.2 Základní dělení linek MHD v Třebíči	11
2.2.1 Páteřní linky	11
2.2.2 Doplnkové linky	11
2.3 Současný stav linkového vedení – sumární informace.....	13
2.4 Přestupní uzly v rámci MHD.....	15
2.5 Přestupní uzel mezi MHD a železniční dopravou	18
2.5.1 Návrhy na zapojení linek MHD do přestupního terminálu Železniční stanice	19
2.5.2 Současná obsluha přestupního terminálu městskou hromadnou dopravou	19
3 Identifikace základních limitních faktorů ovlivňujících časovou koordinaci v budoucnu	21
3.1 Integrace MHD v Třebíči do krajského integrovaného dopravního systému.....	21
3.2 Zvýšení potenciálu přestupního terminálu u železniční stanice	21
3.3 Zachování přestupního uzlu Karlovo náměstí jako hlavního přestupního uzlu v rámci MHD.....	22
4 Návrhy možných směrů řešení.....	23
4.1 Změna uspořádání nástupišť v přestupním uzlu Karlovo náměstí.....	23
4.2 Koordinace mezi spoji linek.....	23
4.3 Úpravy časových poloh spojů doplnkových linek za účelem zachování pravidelnosti nabídky spojů	24
5 Ukázka aplikace vhodného optimalizačního přístupu na případu jednoho segmentu linkové sítě.....	27
5.1 Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupních uzlech	27
5.2 Proměnné vystupující v modelu	28
5.3 Účelová funkce modelu.....	28
5.4 Omezující podmínky.....	29
6 Matematický model časové koordinace spojů MHD v Třebíči.....	31
6.1 Vytvoření obecného schématu přestupního uzlu.....	31
6.2 Označení vstupních veličin a proměnných v upraveném modelu.....	32
6.3 Obecný zápis účelové funkce	33
6.4 Obecný předpis omezujících podmínek	33
6.5 Redukce množiny koordinovaných linek pouze na páteřní linky a množiny koordinovaných spojů pouze na dopolední dopravní sedlo.....	35

7 Optimalizační software Xpress-IVE.....	38
8 Výpočetní experimenty s navrženým modelem.....	40
8.1 Model první varianty.....	44
8.2 Model druhé varianty.....	51
9 Závěr.....	58
10 Použité zdroje.....	60
10.1 Literatura.....	60
10.2 Internetové zdroje.....	60
11 Seznam obrázků.....	61
12 Seznam tabulek.....	62

1 Úvod

Třebíč je s téměř 40 000 obyvateli druhým největším městem v Kraji Vysočina. Proto se očekává, že bude mít v provozu funkční systém městské hromadné dopravy (MHD), který bude maximálně reflektovat potřeby občanů. Je však nutné podotknout, že poptávka obyvatel po přepravě pomocí MHD není, ani nemůže být natolik silná, aby vedla k vytvoření jízdních řádů v intervalech kratších, než je 10 minut. Proto jsou důležitým hlediskem kvality systému přestupní vazby.

Bakalářská práce se nejdříve zabývá předpoklady, které vedly k vytvoření přestupních vazeb, se kterými bude pracováno. V práci jsou uvedeny historické souvislosti, které ovlivnily linkové vedení, jízdní řády či míru obsluhy jednotlivých částí města. Zmíněno je také číslování linek, které se v současnosti odvíjí od charakteru jednotlivých autobusových linek.

Následně jsou v dokumentu popsány existující přestupní vazby v Třebíči, jejichž vznik se vztahuje k období 80. let 20. století a v drobných obměnách fungují do současnosti. S touto problematikou úzce souvisí vznik centrálního přestupního uzlu na Karlově náměstí, který je zároveň jediným, kde se aktuálně dá hovořit alespoň o částečně plánovaných přestupních vazbách. Ve vedlejších přestupních uzlech, resp. významnějších zastávkách, se jedná spíše o nahodilé požadavky na přestupy, nad kterými by se však dalo do budoucna při plánování MHD uvažovat.

Jádro práce spočívá ve vytvoření matematického modelu pro koordinaci spojů v přestupním uzlu Karlovo náměstí. Je zavedena minimalizační funkce, která má za cíl minimalizovat celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících v daném centrálním přestupním uzlu. Součástí matematického předpisu jsou též omezující podmínky, které jsou specifikovány dle aktuálních podmínek a mohou být v průběhu optimalizace obměňovány a upravovány. K řešení navrženého matematického modelu je využíván optimalizační software Xpress-IVE, jehož základní funkce jsou v práci taktéž popsány. Pomocí softwaru Xpress-IVE jsou ve srovnání s běžnými výpočty neporovnatelně rychleji zjištěny požadované hodnoty týkající se přestupních vazeb. Ať už je to vznik přestupu, časová ztráta cestujících při přestupu či statistiky týkající se optimalizačního výpočtu (např. doba výpočtu).

Zjednodušený model reálného provozu třebíčské městské dopravy popsáný v bakalářské práci pracuje se třemi páteřními linkami. V rámci rozšíření této práce se nabízí též zapojení doplňkových linek do optimalizačního procesu.

V závěru návrhové části práce jsou vytvořeny dvě varianty, které by měly zlepšit podmínky pro proces přestupování v systému MHD v Třebíči. Cílem práce je tak navrhnout řešení, která

demonstrují cestu, jak maximálně snížit časovou ztrátu přestupujících cestujících v centrálním přestupním uzlu na Karlově náměstí a zároveň přestupní vazby zefektivnit. Díky rychlejší výměně cestujících se otevírá další prostor pro změny jízdních dob z přestupního uzlu na konečnou zastávku, úpravy obrátů, efektivnější využívání vozidel MHD, zvýšení garance přestupních vazeb či zpřesnění celého systému městské hromadné dopravy v Třebíči.

2 Analýza současného stavu úrovně časové koordinace ve veřejné hromadné dopravě v Třebíči

2.1 Vývoj linkového vedení MHD Třebíč

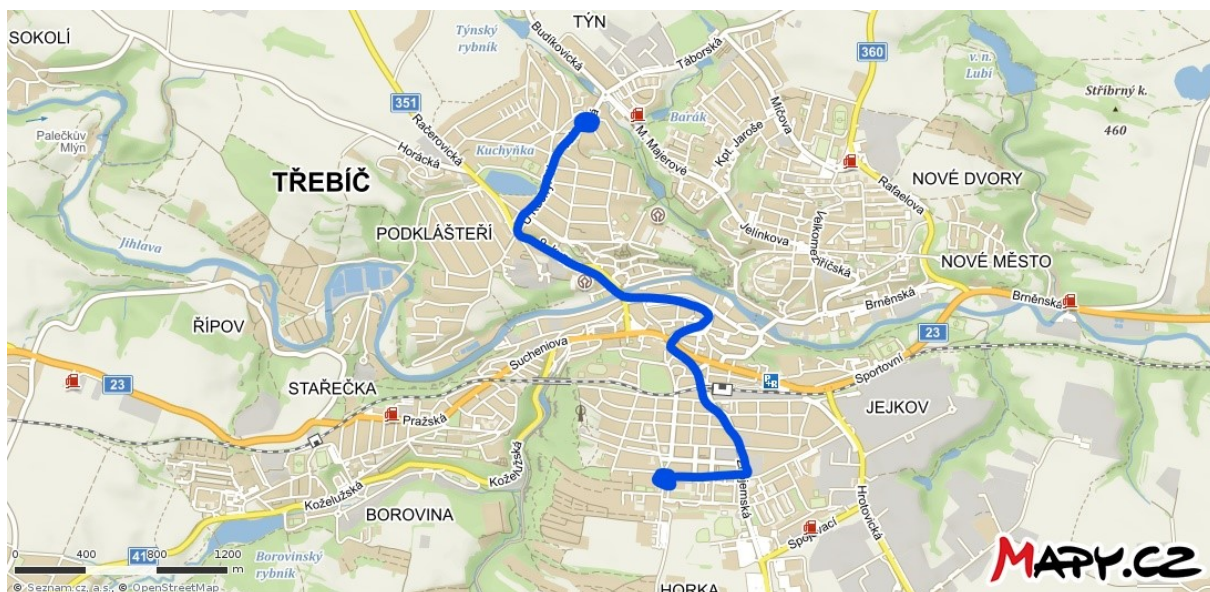
Informace, které jsou obsaženy v této kapitole, vysvětlují problematiku vzniku základního linkového vedení. To předznamenalo současnou kategorizaci některých linek do kategorií páteřních a doplňkových, jak jsou označovány i v roce 2018. Další vývoj byl přirozeně závislý na územním rozvoji města, přičemž k dosud největšímu nárůstu počtu linek a spojů došlo na přelomu 70. a 80. let 20. století.

První zmínky o trebičské veřejné dopravě sahají do roku 1954, kdy byla zřízena autobusová linka mezi městskými čtvrtěmi Nové Dvory a Borovina, na které denně jezdilo šest párů spojů. V průběhu několika let byly po vyhodnocení dosavadního provozu zprovozněny další dvě linky, z nichž jedna spojovala čtvrti Nové Dvory a Horka-Domky a druhá Horka-Domky a Borovina. Trasy zmíněných linek jsou schematicky znázorněny na obrázku č. 1, obrázku č. 2, obrázku č. 3.



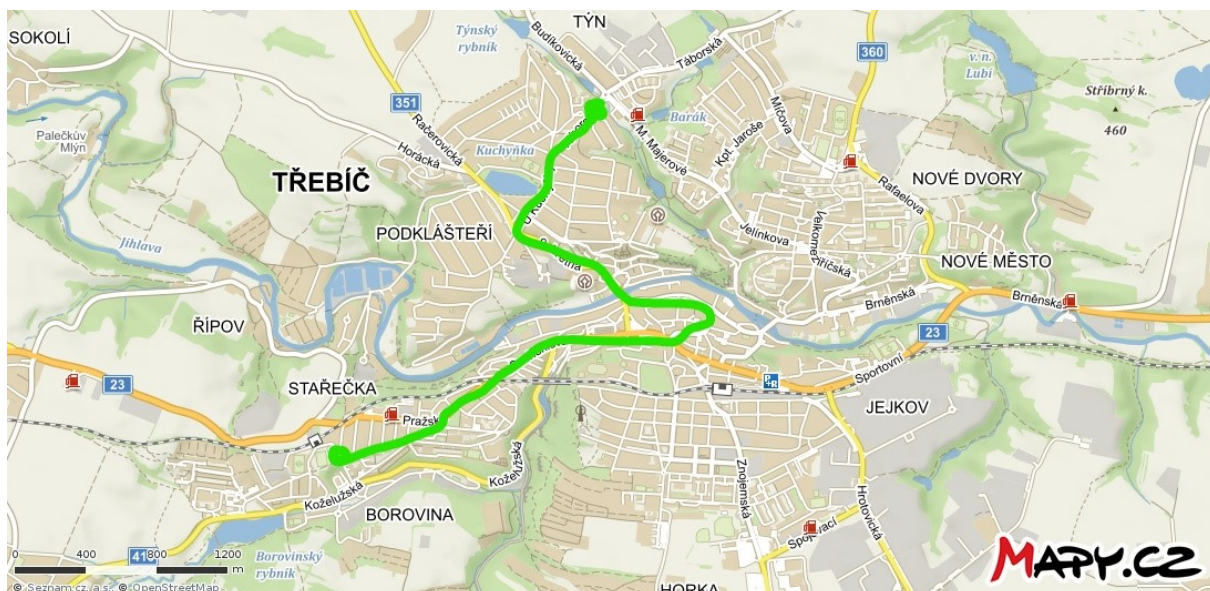
Obrázek č. 1: První linka trebičské MHD.

(zdroj: www.mapy.cz)



Obrázek č. 2: Druhá linka třebíčské MHD.

(zdroj: www.mapy.cz)



Obrázek č. 3: Třetí linka třebíčské MHD.

(zdroj: www.mapy.cz)

Tím vznikl základní model trojúhelníkového schématu, který je s drobnými nuancemi zachován po celou dobu provozu, tj. již 64 let. Zmíněné tři linky vytvořené v 60. letech minulého století nyní můžeme definovat jako páteřní linky provozu městské hromadné dopravy v Třebíči. Jejich charakter se vyznačuje tím, že je zde maximální snaha o zachování pravidelného intervalu mezi spoji, který je ve špičkách pracovních dnů s výjimkami stanoven na 15 minut, v sedle pracovních dnů na 30 minut a ve večerních hodinách, o víkendech a státních svátcích na 60 minut. V současnosti jsou uvedené páteřní linky označeny čísly č. 1, 4 a 5.

Především v období kolem roku 1980 byly podle potřeb obyvatel a rozvoje města vytvářeny zbývající, tzv. doplňkové linky. Poslední větší úprava linkového vedení proběhla k 3. 9. 2012,

kdy byla provedena optimalizace provozu MHD. V té době vzniklo také atypické označení linek. Před optimalizací byly linky označeny čísly 1 až 9, nyní jsou označeny čísly 1, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 21, 31. Při optimalizaci bylo ponecháno označení páteřních linek, jejichž trasy se výrazně nezměnily. Číslování mělo představovat spojitost s předchozí podobou městské hromadné dopravy.

Výše uvedené náčrty prvotního linkového vedení naznačují, že základní linky spojovaly tři nejvýznamnější oblasti města. Jednalo se o městské části Horka-Domky, Borovina a Týn. Zároveň bylo vytvořeno přestupní místo na Karlově náměstí, které tak začalo plnit zprvu jednoduchou funkci dopravního uzlu. Schémata na obrázku č. 1, na obrázku č. 2 a na obrázku č. 3 ukazují trasy linek, které se později v určité obměně budou označovat jako páteřní.

2.2 Základní dělení linek MHD v Třebíči

Páteřní linky byly v minulosti vytvořeny na základě počtu obyvatel jednotlivých městských částí a potřeby spojení s centrem města. Postupně k nim byly přidávány další linky, které nemají však tak důležitou funkci ani nedisponují takovou frekvencí spojů a obsazeností, tudíž jsou označovány jako doplňkové.

2.2.1 Páteřní linky

Linka č. 1 spojuje čtvrť Horka-Domky, přestupní terminál se zastávkou Železniční stanice (dále jen „přestupní terminál“), Karlovo náměstí, autobusové nádraží a čtvrť Borovina. Další v pořadí je linka č. 4, jež je dle počtu přepravených cestujících nejvytíženější linkou systému třebíčské městské hromadné dopravy a spojuje následující místa: čtvrť Horka-Domky, přestupní terminál, autobusové nádraží, Karlovo náměstí, čtvrť Na Kopcích a čtvrť Nové Dvory. Poslední páteřní linka je označena číslem 5 a spojuje čtvrť Borovina, autobusové nádraží, Karlovo náměstí a čtvrť Nové Dvory.

Linky č. 1, 4 a 5 jsou v provozu v pracovní dny od cca 4:00 do 23:00, o víkendech a státních svátcích od 5:00/6:00 do 22:00/23:00. Období ranní přepravní špičky je dle intervalů mezi spoji stanoveno přibližně od 6:00 do 8:00, odpolední od cca 13:00 do 16:00. Dopolední sedlo vyplňuje dobu mezi osmou hodinou ranní a jednou hodinou odpolední. V intervalu 16:00 až 19:00 je pak v MHD období odpoledního sedla. V čase od 19:00 již nastává večerní provoz, jenž se vyznačuje hodinovým intervalem mezi spoji.

2.2.2 Doplňkové linky

Dalším typem linek třebíčské MHD jsou tzv. doplňkové označené čísly 10, 11, 12, 13 a 14. V současném pojetí mají uvedené linky plnit funkci linek, které mají tvořit doplněk páteřní sítě

městské hromadné dopravy. Při pohledu na jízdní řády zmíněných linek je možno vytvořit ještě dvě podkategorie.

První podkategorii tvoří dvě linky, jež mají s malými odchylkami stanoven interval 60 minut s výjimkami v ranní a odpolední špičce, kdy jsou vedeny dva spoje za hodinu. Linka č. 10 spojuje čtvrt' Horka-Domky s přestupním terminálem, Karlovým náměstím a čtvrtí Týn. Druhá je označena číslem 11 a jedná se o okružní linku, jež je vedena ve směru A a B. Spojuje Karlovo náměstí a čtvrti Týn, Nové Dvory a Na Kopcích. Přestože má linka č. 11 charakter okružní linky, zastávky ve směrech A a B se mírně liší.

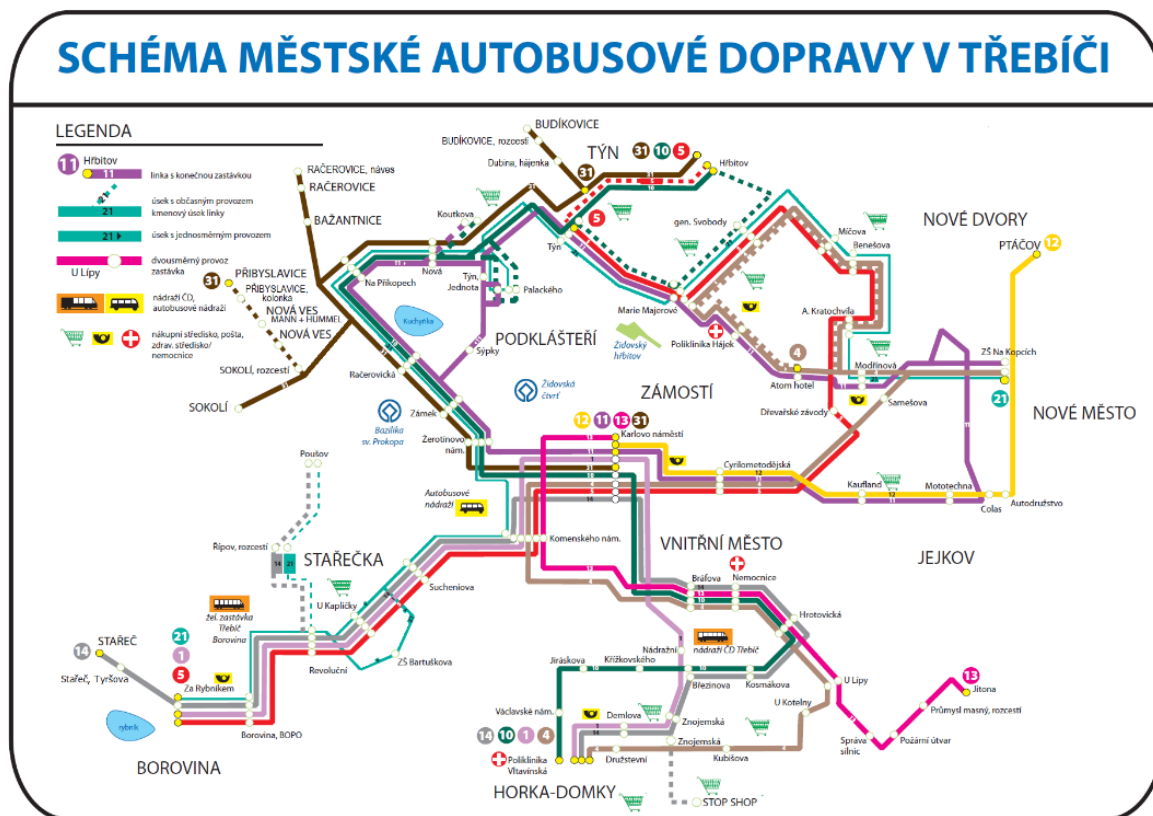
Druhá podkategorie linek je charakteristická tím, že spoje na nich nemají pravidelný interval a některé z nich jsou tvořeny na základě specifické poptávky i v nestandardních časech. Do této podkategorie patří linky č. 12, 13 a 14.

Linka č. 12 je provozována mezi centrem města a městskou částí Ptáčov a je zde vedeno 9 párů spojů denně, o víkendech je frekvence provozu ještě nižší. Číslem 13 je označena linka, jež spojuje Karlovo náměstí, autobusové nádraží, přestupní terminál a průmyslovou zónou v jižní části města. Je provozována pouze v pracovních dnech. Linka č. 14 spojuje městys Stařeč, jenž se finančně podílí na provozu městské hromadné dopravy, se čtvrtí Borovina, autobusovým nádražím, Karlovým náměstím, čtvrtí Horka-Domky a obchodním centrem STOP-SHOP, které se rovněž finančně podílí na úhradě nákladů způsobených závleky vybraných spojů do svého areálu.

Posledním typem linek systému třebíčské městské hromadné dopravy jsou tzv. speciální linky. Ty se vyznačují pouze několika spoji denně. Do této skupiny patří dvě linky, konkrétně linky č. 21 a 31. Linka č. 21 je označována jako školní linka, která spojuje většinu třebíčských čtvrtí s několika základními a středními školami. Je obousměrná a jsou zde v pracovní dny ve dnech školního vyučování vedeny pouze tři, resp. dva spoje v opačném směru. Zbývající linka označená číslem 31 je zřízena za účelem spojení centra města s městskými částmi jako Sokolí, Račerovice či Budíkovice nebo s obcemi v blízkosti Třebíče, které na její provoz finančně přispívají. Jedná se o obce Přibyslavice a Novou Ves. Provoz linky také finančně podporují některé společnosti v průmyslové zóně Nová Ves a Přibyslavice.

2.3 Současný stav linkového vedení – sumární informace

Na obrázku č. 4 je uvedeno schéma MHD v Třebíči k 1. 1. 2018.



Obrázek č. 4: Schéma linkového vedení k 1. 1. 2018.

(zdroj: www.doprava-trebic.cz)

V tabulce 1 je uvedeno linkové vedení v kompletní podobě se všemi zastávkami k 1. 1. 2018.

Tabulka č. 1: Linkové vedení MHD v Třebíči k 1. 1. 2018.

Linka	Linkové vedení
1	Poliklinika – Demlova – Znojemská – Železniční stanice – Nádražní ¹ – Karlovo náměstí – Komenského náměstí – Sucheniova – U Kapličky – Revoluční – Borovina, BOPO – Za Rybníkem a zpět
4	Poliklinika – Družstevní – Kubišova – U Kotelny – U Lípy – Hrotovická – Nemocnice – Železniční stanice – Bráfova – Komenského náměstí – Karlovo náměstí – Cyrilometodějská – Samešova – ZŠ Na Kopcích – Modřínová – A. Kratochvíla – Benešova – Modřínová – Gen. Svobody – M. Majerové – Poliklinika Hájek – Atom hotel a zpět ²

5	Za Rybníkem – Borovina, BOPO – Dům dětí a mládeže – Revoluční – U Kapličky – Sucheniova – Komenského náměstí – Karlovo náměstí – Cyrilometodějská – Dřevařské závody – A. Kratochvíla – Benešova – Modřínová – Gen. Svobody – M. Majerové – Týn – Hřbitov a zpět
10	Poliklinika – Václavské náměstí – Jiráskova – Křížkovského – Březinova – Kosmákova – Hrotovická – Železniční stanice – Nemocnice – Bráfova – Karlovo náměstí – Žerotínovou náměstí – Zámek – Račerovická – Koutkova – Nová – Palackého – Týn – M. Majerové – Gen. Svobody – Hřbitov a zpět
11	<i>Směr A:</i> Karlovo náměstí – Cyrilometodějská – Kaufland – Mototechna – ZŠ Na Kopcích – Modřínová – Atom hotel – Poliklinika Hájek – M. Majerové – Týn – Týn, Jednota – Palackého – Sýpky – Zámek – Žerotínovo náměstí – Karlovo náměstí <i>Směr B:</i> Karlovo náměstí – Žerotínovo náměstí – Zámek – Račerovická – Na Příkopech – Koutkova – Nová – Palackého – Týn – M. Majerové – Poliklinika Hájek – Atom hotel – Modřínová – ZŠ Na Kopcích – Mototechna – Kaufland – Cyrilometodějská – Karlovo náměstí
12	Karlovo náměstí – Cyrilometodějská – Kaufland – Mototechna – Colas – Autodružstvo – Ptáčov a zpět
13	Karlovo náměstí – Komenského náměstí – Železniční stanice – Nemocnice – Hrotovická – U Lípy – Správa silnice – Požární útvar – Průmysl, masný – Jitona a zpět
14	Stařeč – Stařeč, Tyršova – Za Rybníkem – Borovina, BOPO – Řípvov, rozcestí – Poušov – Řípvov, rozcestí – Revoluční – U Kapličky – Sucheniova – Komenského náměstí – Karlovo náměstí – Bráfova – Nemocnice – Hrotovická – Kosmákova – Březinova – Znojemská – STOP-SHOP – Znojemská – Demlova – Poliklinika a zpět
21	Za Rybníkem – Borovina, BOPO – Řípvov, rozcestí – Poušov – Řípvov, rozcestí – Revoluční – ZŠ Bartušková ³ – U Kapličky – Sucheniova – Komenského náměstí – Žerotínovo náměstí – Zámek – Račerovická – Nová – Palackého – Týn – M. Majerová – Gen. Svobody – Míčova – Benešova – A. Kratochvíla – Modřínová – ZŠ Na Kopcích a zpět
31	<i>Směr A:</i> Karlovo náměstí – Žerotínovo náměstí – Zámek – Račerovická – Sokolí - Bažantnice – Račerovice – Račerovice, náves – Račerovice – Bažantnice – Nová – Týn – Dubina, hájenka – Budíkovice – Dubina, hájenka – Týn a zpět <i>Směr B:</i> Karlovo náměstí – Žerotínovo náměstí – Zámek – Račerovická – Sokolí, rozcestí – Sokolí – Nová Ves – Nová Ves, MANN+HUMMEL – Přibyslavice, kolonie – Přibyslavice a zpět

¹ Zastávka Nádražní je obsluhována pouze ve směru Karlovo náměstí → Poliklinika.

² Ve špičce pracovních dnů, ve večerních hodinách a o víkendech a svátcích je linka v oblasti Nové Dvory vedena polookružním blokovým objezdem. Ze zastávky Atom hotel pokračuje dále na zastávku Modřínová a dále směr Poliklinika. V sedle je ukončena v zastávce Atom hotel a vedena po stejné trase zpět.

³ V opačném směru je zastávka ZŠ Bartušková nahrazena zastávkou U Kapličky.

Pro bližší informace o obsazenosti spojů tří nejvytíženějších linek jsou níže uvedena data nejméně vytíženého spoje získaná při průzkumu provedenému v roce 2016. Jedná se o data ze špičky pracovního dne. Na obrázku č. 5 je písmenem „N“ označen počet nástupů, písmenem „V“ počet výstupů a písmeny „PV“ aktuální počet cestujících ve vozidle. Pro větší přehlednost je sloupec s označením „PV“ podbarven. Odstíny blížící se červené barvě značí nízkou obsazenost, zelené potom vysokou obsazenost. Hodnoty se vztahují k autobusům MHD standardní délky 12 m.

Linka	4	45			
Směr	A	230			
	Název zastávky	ODJEZD	N	V	PV
1	Poliklinika	7:14	3	0	3
2	Družstevní	7:15	22	0	25
3	Kubišova	7:17	15	0	40
4	U Kotelny	7:19	0	0	40
5	U lípy	7:20	3	0	43
6	Hrotovická	7:21	0	0	43
7	Železniční stanice	7:23	3	0	46
8	Nemocnice	7:26	9	0	55
9	Bráfova	7:27	2	0	57
11	Komenského nám.	7:29	7	10	54
12	Karlovo náměstí	7:32	2	1	55
13	Cyrilometodějská	7:35	4	5	54
14	Samešova	7:37	0	1	53
15	ZŠ Na Kopcích	7:38	1	3	51
16	Modřínová	7:39	0	4	47
17	A. Kratochvíla	7:41	1	0	48
18	Benešova	7:43	2	1	49
19	Mičova	7:45	1	39	11
20	Gen. Svobody	7:47	1	4	8
21	Marie Majerové	7:48	3	2	9
22	Poliklinika Hájek	7:49	1	1	9
23	Atom hotel	7:50	0	0	9

Obrázek č. 5: Ukázka vytížení spoje v přepravní špičce na lince č. 4.

(zdroj: Analýza obsazenosti spojů městské hromadné dopravy v Třebíči)

2.4 Přestupní uzly v rámci MHD

Jak již vyplývá z informací uvedených výše, třebíčskou síť městské hromadné dopravy lze charakterizovat jako radiální s jednou okružní linkou. Vzhledem k počtu obyvatel, jenž se pohybuje dlouhodobě kolem 38 000, se ve městě nachází jeden centrální přestupní uzel a dva podpůrné přestupní uzly.

Centrálním přestupním uzlem je zastávka Karlovo náměstí, která je situována v nejužším centru města. Obsluhu zmíněné zastávky zajišťují všechny linky s výjimkou linky č. 21. Do přestupního uzlu jsou tedy zapojeny linky č. 1, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14 a 31. Zde je také realizován zdaleka největší počet přestupů v systému městské hromadné dopravy v Třebíči, jenž mnohonásobně převyšuje počet přestupů na ostatních zastávkách.

Schéma centrálního přestupního uzlu ve městě je uvedeno na obrázku č. 6. Obrázek č. 7 ukazuje letecký pohled na prostor přestupního uzlu na Karlově náměstí.

nástupiště 6	nástupiště 5	nástupiště 4	
linky: 12, 31	linky: 1, 10, 14	linky: 4, 5, 11	směr: Jihlavská brána
směr: okolní obce	směr: Horka-Domky	směr: Nové Dvory	
znázornění vozovky			
	nástupiště 3	nástupiště 2	nástupiště 1
směr: Jejkovská brána	linky: 4, 13	linky: 10, 11	linky: 1, 5, 14
	směr: Horka-Domky	směr: Podklášteří	směr: Borovina

Obrázek č. 6: Schéma centrálního přestupního uzlu na Karlově náměstí.



Obrázek č. 7: Letecký pohled na přestupní uzel na Karlově náměstí.
(zdroj: www.mapy.cz)

Jak je patrné ze schématu přestupního uzlu na Karlově náměstí, k dispozici je celkem šest nástupišť. Při pohledu na rozložení linek na jednotlivá nástupiště se naskýtá otázka, proč je většina nástupišť obsluhující páteřní linky ve vzájemné blízkosti, ale nástupiště 1 je výrazně dále. Reálně je vzdáleno cca 80 metrů od nástupiště 5. To způsobuje problémy při vznikajících

přestupech, a proto byl v rámci zpracování bakalářské práce vytvořen návrh, který rozmístění linek na nástupištích upravuje, viz podkapitola 4.1.

V přestupním uzlu Karlovo náměstí je již více, než dvacet let zavedena částečná časová koordinace. Základní myšlenka spočívá v tzv. rozjezdech, které jsou realizovány především v dopravním sedle. V pracovní dny se jedná o 15 minutové intervaly, jež mají definované odjezdy v těchto časech: X:00, X:15, X:30, X:45. O víkendech, ve večerních hodinách a během státem uznaných svátků jsou intervaly zdvojnásobeny a rozjezdy probíhají v časech XX:15 a XX:45.

V třebíčské MHD můžeme nalézt ještě jeden méně významný přestupní uzel, který však splňuje svoji funkci pouze náhodně, neboť s ním při tvorbě systému městské hromadné dopravy ani samotných jízdních řádech není primárně počítáno. Konkrétně se jedná o zastávku Komenského náměstí.

Zastávka Komenského náměstí se nachází v blízkosti centra města a zároveň nedaleko přestupního uzlu Karlovo náměstí. Její obsluhu zajišťují všechny linky s výjimkou č. 11 a 31. Jedná se tedy o linky č. 1, 4, 5, 10, 12, 13, 14 a 21. Přestupy, které v tomto místě vznikají, jsou vytvářeny především cestujícími, kteří MHD využívají pravidelně a znají její fungování.

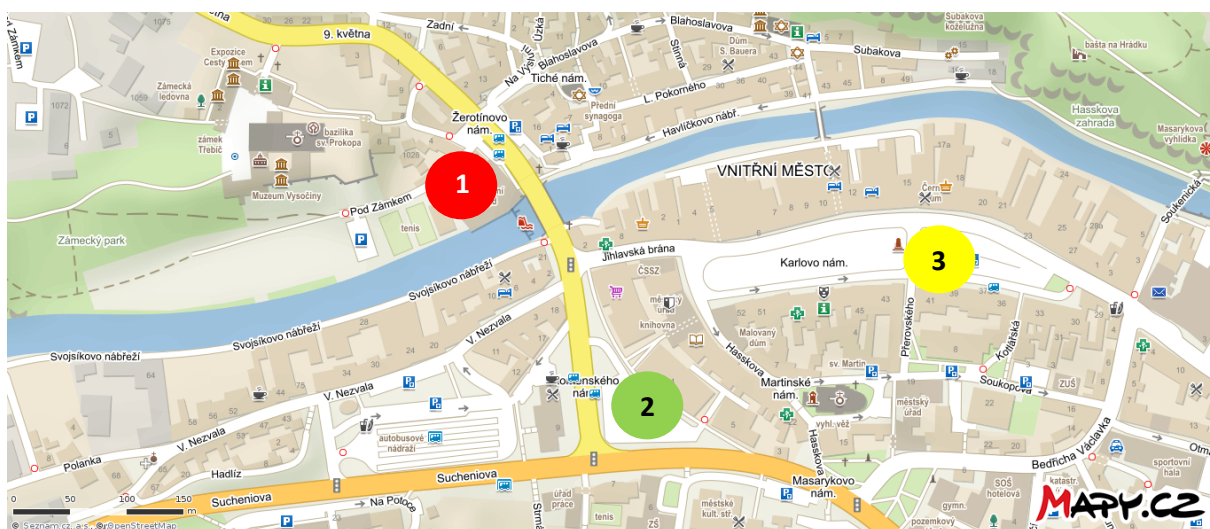
Základní princip, jenž se v tomto místě uplatňuje, spočívá v následujícím chování přestupujících cestujících. Jak již bylo uvedeno, Komenského náměstí je v některých relacích předcházející zastávkou Karlova náměstí, tudíž především u páteřních linek platí pravidlo, že je možné vystoupit již na této zastávce s cílem přestoupit na jinou páteřní či doplňkovou linku. Motivací pro takové chování cestujících bývá především zpoždění prvního spoje nebo pohodlnější přestup mezi autobusy díky delšímu časovému prostoru. Situace je demonstrována na následujícím příkladu.

Cestující se potřebuje dostat ve všední den v 19:03 ze zastávky Za Rybníkem do zastávky Poliklinika. Předpokládá využití linky č. 5 s přestupem na linku č. 4. Obě linky mají společné zastávky Komenského a Karlovo náměstí. Předpokládaný příjezd do přestupního uzlu je v 19:15, odjezd ve stejnou minutu. Z provozních důvodů však dojde u autobusu linky č. 5 ke vzniku 2 minutového zpoždění. Reálný příjezd na Karlovo náměstí se tak očekává až v 19:17, tj. 2 minuty po odjezdu přípoje. Cestující proto raději zvolí variantu výstupu na Komenského náměstí v 19:14, neboť linka č. 4 odjíždí z této zastávky až v 19:17. Přestup je tedy nahodile zaručen i v případě mírného zpoždění.

Podobnou funkci jako zastávka Komenského náměstí může okrajově plnit též zastávka Žerotínovo náměstí, která je rovněž situována v blízkosti Komenského i Karlova náměstí. Pokud bychom uvažovali potřebu cestujícího přepravit se ze zastávky Za Rybníkem

do zastávky Račerovická s úvahou přestupu na Karlově náměstí v 19:15 mezi linkami č. 5 a 10, lze v případě potřeby využít i relativně krátkou vzdálenost mezi zastávkami Komenského a Žerotínovo náměstí a nahradit tímto operativním přestupem plánovanou přestupní vazbu na Karlově náměstí.

Polohy všech tří přestupních uzlů jsou znázorněny na obrázku č. 8. Číslem 1 je označen přestupní uzel Žerotínovo náměstí, číslem 2 přestupní uzel Komenského náměstí a číslem 3 přestupní uzel Karlovo náměstí. Vzdálenost teoretického přestupu mezi zastávkami Žerotínovo a Komenského náměstí je cca 240 m.



Obrázek č. 8: Schéma poloh přestupních uzlů Karlovo náměstí, Komenského náměstí a Žerotínovo náměstí.
(zdroj: www.mapy.cz)

2.5 Přestupní uzel mezi MHD a železniční dopravou

Po mnoha letech příprav byl v roce 2015 vybudován přestupní terminál, který je situován v těsné blízkosti železniční stanice Třebíč. Od svého vzniku slouží pro vybrané linky a spoje městské hromadné dopravy a příměstské autobusové dopravy. Aktuální stav je takový, že do zastávky Železniční stanice, jež obsluhuje právě přestupní terminál, zajiždějí linky č. 1, 4, 10 a 13. Ještě před jeho otevřením byly zpracovány dvě základní varianty zapojení linek MHD.

2.5.1 Návrhy na zapojení linek MHD do přestupního terminálu Železniční stanice

V následujícím textu budou představeny tři varianty (nultá, první, druhá) návrhů obsluhy zastávky Železniční stanice.

Zcela původní myšlenkou městského úřadu, dalo by se říci též nultým návrhem, byla obsluha přestupního terminálu pouze závlekem linky č. 1. Zbývající tři linky v blízkém okolí měly zůstat ve svých původních trasách.

První návrh spočíval v zapojení páteřních linek č. 1 a 4. Linka č. 1 měla obsluhovat zastávku Železniční stanice závlekem z ulice Nádražní v obou směrech stejně. Obrat vozidla by probíhal na vybudovaném obratišti v areálu přestupního terminálu. Linka č. 4 měla být trasována tak, že ve směru Karlovo náměstí – Poliklinika měla být vynechána zastávka Bráfova a nahrazena zastávkou Železniční stanice. V opačném směru, tj. Poliklinika – Karlovo náměstí, by došlo ke zrušení zastávek Nemocnice a Bráfova a jejich nahrazením zastávkou Železniční stanice. Pozitiva tohoto návrhu jsou větší jednoduchost systému oproti druhé variantě a nižší finanční dopady. Negativní dopady by byly následující: delší docházková vzdálenost od zastávky Železniční stanice k nemocnici (ve směru do centra) a obsluha zastávky Nemocnice směrem do centra pouze doplňkovými linkami.

Druhý návrh se lišil v trasování linky č. 1. Spoje by nově ve směru do centra po obslužení zastávky Železniční stanice zastavovaly též na zastávce Nemocnice. Tím by došlo k náhradě chybějících spojů linky č. 4 v zastávce Nemocnice, a byla by tak s mírnými odchylkami zachována obsluha tohoto místa. Dalším pozitivem by bylo zavedení alespoň jednosměrného pravidelného spojení nemocnice s významnou čtvrtí Borovina. Negativními stránkami tohoto návrhu jsou větší složitost systému a vyšší finanční náročnost.

2.5.2 Současná obsluha přestupního terminálu městskou hromadnou dopravou

Výsledná podoba zapojení městské hromadné dopravy do systému přestupního terminálu je následující.

Všechny spoje linky č. 1 v obou směrech jsou vedeny závlekem na zastávku Železniční stanice a po jejím obslužení se po projetí obratiště vrací na svoji původní trasu.

Vybrané spoje linky č. 4 v pracovních dnech jsou ve směru Poliklinika – Karlovo náměstí vedeny závlekem na zastávku Železniční stanice a u všech spojů je zachována obsluha zastávek Nemocnice a Bráfova. V opačném směru Karlovo náměstí – Poliklinika jsou všechny spoje vedeny přes zastávku Železniční stanice, která zcela nahradila zastávku Bráfova.

Vybrané spoje linky č. 10 v pracovních dnech ve směru Poliklinika – Karlovo náměstí obsluhují zastávku Železniční stanice místo zastávek Nemocnice a Bráfova. Zbývající spoje jsou ponechány v původní trase, tedy pouze s obsluhou zastávek Nemocnice a Bráfova. V opačném směru, tj. Karlovo náměstí – Poliklinika, jsou rovněž některé spoje vedeny na zastávku Železniční stanice, která v těchto případech nahrazuje zastávku Bráfova. Ostatní spoje zůstávají na své obvyklé trase, tedy obsluhují zastávku Bráfova.

Všechny spoje linky č. 13 jsou vedeny na zastávku Železniční stanice. Ve směru z centra města byla nahrazena zastávka Bráfova, v opačném směru zastávky Nemocnice a Bráfova.

I tato varianta je kompromisem, neboť ideálním stavem by bylo zavedení všech linek v okolí do prostoru přestupního terminálu. To však ze strany města bylo z ekonomického hlediska vyhodnoceno jako příliš nákladné. Budeme-li posuzovat méně náročnou variantu a běžný pracovní den, navýšení počtu kilometrů při prvním návrhu (viz kapitola 5.4.1) by činilo cca 17,5 km/den. Při ceně dopravního výkonu cca 65 Kč/km by navýšení plateb za provoz MHD činilo 1 137,5 Kč za jeden pracovní den.

3 Identifikace základních limitních faktorů ovlivňujících časovou koordinaci v budoucnu

3.1 Integrace MHD v Třebíči do krajského integrovaného dopravního systému

V nejbližších letech se očekávají změny MHD, které by měly být ovlivněny dvěma skutečnostmi. První z nich je vznik integrovaného dopravního systému (IDS) Kraje Vysočina, jež je prozatím nazván jako Veřejná doprava Vysočiny (VDV). K 1. 12. 2019 je počítáno s tím, že do IDS budou zapojeny všechny druhy veřejné dopravy na Vysočině, tedy MHD, příměstská autobusová doprava a železniční doprava.

Konkrétně v Třebíči jsou nejbližší plány takové, že provoz tzv. speciální linky č. 31, jež spojuje město se vzdálenými městskými, případně obcemi či firmami, které na provoz přispívají, bude omezen či zcela ukončen a nahrazen spoji příměstské autobusové dopravy. Součástí plánu na zapojení města Třebíče a jeho okolí do systému Veřejná doprava Vysočiny je také intenzivnější využití přestupního terminálu nacházejícího se v těsné blízkosti železniční stanice.

Druhou podstatnou změnou, která by měla nastat, bude změna taktu rychlíků na trase Brno – České Budějovice/Plzeň, tedy mimo jiné i na trati č. 240, jež prochází Třebíčí. V současné době (1. polovina roku 2018) jsou v relaci Jihlava → Brno realizovány odjezdy rychlíků ze stanice Třebíč v lichou hodinu v časech XX:24, v opačném směru, tj. Brno → Jihlava, v sudou hodinu v časech XX:33. Návrh, který už plně počítá s revitalizací trasy Zastávka u Brna – Krahulov, jež proběhla v letech 2016-2017, je takový, že rychlíky do směru Jihlava → Brno budou z Třebíče odjíždět v lichou hodinu v XX:08. V opačné relaci Brno → Jihlava je stanoven odjezd na sudou hodinu v XX:53. K realizaci by mělo dojít od nového železničního jízdního řádu platného od prosince 2019.

3.2 Zvýšení potenciálu přestupního terminálu u železniční stanice

V návaznosti na úpravu časových poloh rychlíků i osobních vlaků bude nutno uvažovat se změnami časů příjezdů a odjezdů autobusů MHD do zastávky Železniční stanice v prostoru přestupního terminálu. V úvahu také připadá možnost částečné změny linkového vedení, které by přineslo systematičtější a četnější obsluhu zastávky Železniční stanice.

3.3 Zachování přestupního uzlu Karlovo náměstí jako hlavního přestupního uzlu v rámci MHD

V současné době je centrální přestupní uzel na Karlově náměstí nejdůležitějším bodem systému třebičské MHD. Jeho vznik byl ovlivněn především přirozenou polohou ve středu města, kde byl vytvořen jako průsečík několika radiálních linek. Již po několik desetiletí funguje jako místo tzv. „rozjezdů“, které vytváří základní přestupní vazby městské hromadné dopravy.

Přestupní uzel Karlovo náměstí má však ještě jednu poměrně zásadní výhodu z hlediska koordinace spojů páteřních linek. Všechny koordinované páteřní linky, tedy linek č. 1, 4 a 5 mají v obou směrech stanovenou cestovní dobu z centrálního přestupního uzlu na příslušnou konečnou zastávku v intervalu od 13 do 17 minut. Toho je využíváno především při tvorbě oběhů vozidel, kdy jsou synchronizovány doby obrátů na konečných zastávkách a v konečném důsledku také oběžné doby linek. Požadavek na zachování taktu tak nezpůsobuje nárůst počtu vozidel ani nutnost zásadně měnit časové polohy odjezdů z konečných zastávek páteřních linek směrem do přestupního uzlu.

Konkurenčním místem Karlova náměstí by mohl být prostor autobusového nádraží, které se nachází v širším centru města. Zde se však naráží především na již zmíněný argument obrátů vozidel v konečných zastávkách. Pakliže by se měl centrální přestupní uzel přesunout do areálu autobusového nádraží, patrně by muselo dojít k výrazným provozním úpravám. Stěžejní by byl především fakt, že na rozdíl od Karlova náměstí by již cestovní doby na jednotlivé cílové zastávky nebyly časově přibližně shodné. Na jednom rameni linky by došlo ke snížení cestovní doby přibližně o 3 minuty, ovšem o tutéž hodnotu by cestovní doba narostla na druhém rameni.

Proto se v této situaci jeví jako velmi důležité ponechat centrální přestupní uzel na současném místě. Jeho změna by si vyžádala celkovou provozní změnu systému třebičské MHD.

4 Návrhy možných směrů řešení

4.1 Změna uspořádání nástupišť v přestupním uzlu Karlovo náměstí

V podkapitole 2.4 bylo zmíněno nevyhovující rozmístění stanovišť jednotlivých linek v centrálním přestupním uzlu Karlovo náměstí. Navrhované rozmístění je znázorněno na obrázku č. 9.

nástupiště 6	nástupiště 5	nástupiště 4	
linky: 12, 31	linky: 1, 10, 14	linky: 4, 5, 11	směr: Jihlavská brána
směr: okolní obce	směr: Horka-Domky	směr: Nové Dvory	
znázornění vozovky			
	nástupiště 3	nástupiště 2	nástupiště 1
směr: Jejkovská brána	linky: 1, 5, 14	linky: 4, 13	linky: 10, 11
	směr: Borovina	směr: Poliklinika	směr: Podklášteří

Obrázek č. 9: Návrh rozmístění linek na jednotlivé zastávky přestupního uzlu.

Základní výhodou navrhovaného rozmístění je snížení docházkové vzdálenosti při přestupech mezi páteřními linkami. Nejdelší vzdálenost asi 80 metrů se snižuje na 30 metrů. Především z tohoto důvodu bylo navrhované uspořádání vyhodnoceno z provozního hlediska kladně a zároveň mělo z anketního šetření i podporu veřejnosti. Z politických důvodů však k jeho realizaci dosud nedošlo. S návrhem je poté ještě v rámci bakalářské práce pracováno.

4.2 Koordinace mezi spoji linek

Třebíčský trojúhelník, jenž tvoří výše uvedené páteřní linky, má své těžiště v přestupním uzlu na Karlově náměstí. Nejvýznamnější přepravní proudy jsou v relacích Horka-Domky – Nové Dvory, Nové Dvory – Borovina, Borovina – Horka-Domky. Zmíněná částečná koordinace spojů v centru města během období přepravního sedla zaručuje pravidelný 15minutový interval. Páteřní linky, které jezdí vzájemně v prokladu do jednotlivých městských částí, mají mírně odlišné trasování, kdy se navzájem zcela nekopírují, ovšem splňují účel spojení centra města s nejvýznamnějšími místy v Třebíči. Podobná situace nastává o víkendech, státních svátcích a ve večerních hodinách, kdy se interval prodlužuje na 30 minut.

Nejvíce přestupů se tedy děje v období přepravního sedla a méně exponovaných časech, kdy jsou intervaly mezi spoji delší. Nejčetnější přestupní vazby jsou dle očekávání mezi linkami

č. 1, 4 a 5. V době přepravní špičky se význam přestupů na Karlově náměstí snižuje, ovšem i přesto je v některých případech viditelná snaha zachovat pravidelný interval i v tomto případě.

Podobně je snaha o koordinaci spojů doplňkových linek, jež projíždějí zastávkou Karlovo náměstí. V tomto případě se jedná zejména o linky č. 10 a 14.

4.3 Úpravy časových poloh spojů doplňkových linek za účelem zachování pravidelnosti nabídky spojů

Problém se týká doplňkových a speciálních linek právě proto, že intervaly mezi jejich spoji jsou nejméně 30 minut, ve většině případů se však jedná o 60 a více minut. V provozu doplňkových linek se v současném stavu projevuje určitá nekoncepčnost mající vliv na úroveň koordinace. Pakliže koordinace existuje, jsou spoje zmíněných dvou linek zahrnuty do 15, respektive 30minutového intervalu páteřních linek č. 1, 4, 5. V minulosti již byly vytvořeny návrhy, které měly vyřešit chybějící koncepci koordinaci na Karlově náměstí u doplňkových linek č. 10 a 14, ovšem aplikovány dosud nebyly. Obrázek č. 10 ukazuje část současného jízdního řádu linky č. 12. Obrázek č. 11 pak návrh na úpravu ve snaze udržet stanovený interval mezi spoji.

Na Příkopech	4.52	5.20	5.52	6.18	6.52	7.22	7.52	8.37	9.37
Račerovická	4.54	5.22	5.54	6.20	6.54	7.24	7.54	8.39	9.39
Zámek	4.56	5.24	5.56	6.22	6.56	7.26	7.56	8.41	9.41
Žerotínovo nám.	4.57	5.25	5.57	6.23	6.57	7.27	7.57	8.42	9.42
Karlovo náměstí	5.00	5.28	6.00	6.26	7.00	7.30	8.00	8.45	9.45
Železniční stanice		5.32	6.04		7.04	7.34			
Bráňova	5.04			6.30			8.04	8.49	9.49
Nemocnice	5.05	5.34	6.06	6.31	7.06	7.36	8.05	8.50	9.50
Hřotovická	5.07	5.35	6.07	6.33	7.07	7.37	8.07	8.52	9.52
Kosmákova	5.08	5.36	6.08	6.34	7.08	7.38	8.08	8.53	9.53

Obrázek č. 10: Ukázka jízdního řádu linky č. 12 s nekoncepčně posunutými časy odjezdu z přestupního uzlu.
(zdroj: www.doprava-trebic.cz)

4:53	5:23	5:53	6:23	6:53	7:23	7:53	8:38	9:38
4:54	5:24	5:54	6:24	6:54	7:24	7:54	8:39	9:39
4:55	5:25	5:55	6:25	6:55	7:25	7:55	8:40	9:40
4:56	5:26	5:56	6:26	6:56	7:26	7:56	8:41	9:41
5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:45	9:45
5:03						8:03	8:48	9:48
	5:33	6:03	6:33	7:03	7:33			
5:04	5:34	6:04	6:34	7:04	7:34	8:04	8:49	9:49
5:05	5:35	6:05	6:35	7:05	7:35	8:05	8:50	9:50
5:06	5:36	6:06	6:36	7:06	7:36	8:06	8:51	9:51

Obrázek č. 11: Demonstrace možné úpravy jízdního řádu s cílem dodržet jednotný interval mezi spoji.

Mírně odlišná situace je u zbývajících méně vytížených linek systému třebíčské městské hromadné dopravy, tj. u linek č. 11, 12, 13 a 31. V těchto případech jsou odjezdy téměř u všech spojů zasazeny přímo v čase odjezdu páteřních linek. Jedná se o časy XX:00, XX:15, XX:30, XX:45.

Toto řešení se v praxi neukazuje jako příliš vhodné, neboť vzhledem ke komplikované dopravní situaci dochází na páteřních linkách k poměrně častému zpoždění a příjezdy do centrálního přestupního uzlu jsou víceméně totožné s časem odjezdu.

Proto by bylo z hlediska komfortu a spolehlivosti přestupů vhodné uvažovat o posunutí odjezdů spojů těchto linek z Karlova náměstí o 2 až 5 minut ve srovnání se současným stavem tak, aby nebyly totožné se zmíněnými časy odjezdů spojů páteřních linek. Také v tomto případě byl vytvořen návrh, jenž se problematikou zabýval, ale k uvedení do praxe prozatím nedošlo. Konkrétně byly řešeny linky č. 11, 12, 13 a 31. Současný stav znázorňuje obrázek č. 12. Následující obrázek č. 13 stejné linky demonstruje navržené úpravy.

Karlovo náměstí	4.45	5.15	5.45f	6.45	8.00	9.45	13.00
Cyriľometodějská	4.48	5.18	5.48f	6.48	8.03	9.48	13.03
Kauf land	4.50	5.20	5.50f	6.50	8.05	9.50	13.05
Mototechna	4.51	5.21	5.51f	6.51	8.06	9.51	13.06
Colas	4.52	5.22	5.52f	6.52	8.07	9.52	13.07
Autodružstvo	4.53	5.23	5.53f	6.53	8.08	9.53	13.08
Ptáčov	4.58	5.28	5.58f	6.58	8.13	9.58	13.13

Obrázek č. 12: Část jízdního řádu ukazující odjezdy doplňkové linky č. 12 v čase „rozjezdu“ páteřních linek.
(zdroj: www.doprava-trebic.cz)

4:47	5:17	6:47	7:32	9:47	13:02
4:49	5:19	6:49	7:34	9:49	13:04
4:50	5:20	6:50	7:35	9:50	13:05
4:51	5:21	6:51	7:36	9:51	13:06
4:52	5:22	6:52	7:37	9:52	13:07
4:53	5:23	6:53	7:38	9:53	13:08
4:57	5:27	6:57	7:42	9:57	13:12

Obrázek č. 13: Část jízdního řádu linky č. 12 s navrženými úpravami.

V problematice současné koordinace na Karlově náměstí nebyla úmyslně zmíněna linka č. 21. Jedná se totiž o tzv. školní linku, která je v provozu pouze v době ranní přepravní špičky a spojuje, s výjimkou čtvrti Horka-Domky, městské čtvrti s většinou základních a středních škol. U ní se proto nepředpokládá nutnost vytvoření přestupních vazeb s dalšími linkami, neboť je její účel zcela zřejmý, tj. přepravit žáky a studenty do vzdělávacích zařízení.

Neúčelnost koordinace spojů linky č. 21 se spoji ostatních linek podtrhuje také již zmíněný fakt, že je provozována v době přepravní špičky, kdy jsou intervaly na ostatních linkách výrazně kratší.

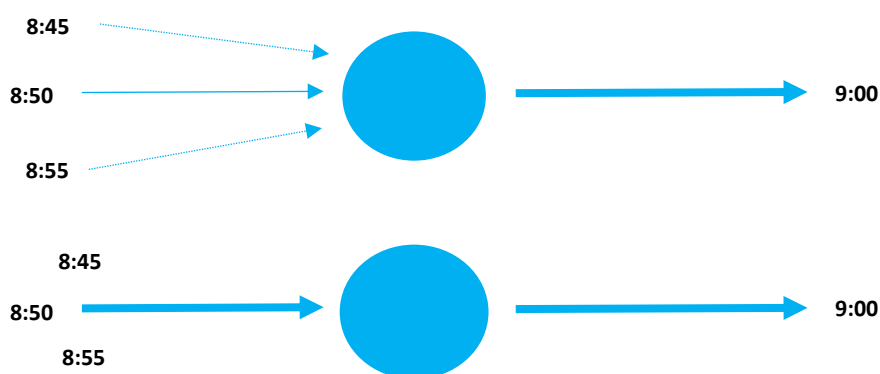
5 Ukázka aplikace vhodného optimalizačního přístupu na případu jednoho segmentu linkové sítě

Aplikace vhodného optimalizačního přístupu bude demonstrována v podmínkách centrálního přestupního uzlu Karlovo náměstí a mezi spoji páteřních linek. Optimalizační přístup je založen na lineárním programování. V následujících kapitolách bude nejdříve prezentován model, který byl vytvořen v minulosti, a následně budou charakterizovány úpravy, které bylo vhodné provést za účelem jeho aplikace v podmínkách řešeného přestupního uzlu.

5.1 Matematický model pro časovou koordinaci spojů v přestupních uzlech

Základ pro matematický model časové koordinace spojů v přestupním uzlu Karlovo náměstí tvoří model prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., z Fakulty řízení a informatiky Žilinské univerzity v Žilině vytvořený v roce 2007. Matematický model byl vytvořen pro izolovaný přestupní uzel, do kterého přijíždějí spoje z jednoho směru a odjíždějí z něj navazující spoje také do jednoho směru. V kapitole 7 bude prezentován teoretický princip tohoto matematického modelu. Model může být rozšířen i o situace, kdy do přestupního uzlu přijíždějí spoje z více směrů, protože spoje z více směrů lze vhodně časově uspořádat a vytvořit z nich posloupnost spojů z jednoho směru.

Protože je třeba zajistit přestup z množiny spojů J do množiny spojů L a předmětem zkoumání není konkrétní linka, její interval či charakter, ale pouze množina přijíždějících spojů, lze tři směry v množině J nahradit jedním směrem. Úloha se tím nezmění a princip zůstane zachován. Obrázek č. 14 ukazuje nahrazení více směrů jedním.



Obrázek č. 14: Ukázka náhrady tří směrů v množině J jedním směrem.

V modelu bude pracováno s následujícími množinami a vstupními veličinami (konstantami) s následující interpretací:

- J – množina příjíždějících spojů
- L – množina odjíždějících spojů
- f_j – intenzita, tj. průměrný počet přestupujících cestujících ze spoje $j \in J$
- M – prohibitivní konstanta
- tp_j – nejdříve možný čas příjezdu spoje $j \in J$
- tod_l – nejdříve možný čas odjezdu spoje $l \in L$
- a_j – maximální povolený časový posun spoje $j \in J$ vztahmo k nejdříve možné časové poloze tp_j
- b_l – maximální povolený časový posun spoj $l \in L$ vztahmo k nejdříve možné časové poloze tod_l
- tpr – doba potřebná k přestupu mezi příjíždějícími a odjíždějícími spoji (uvažuje se stejná pro všechny přestupy)

5.2 Proměnné vystupující v modelu

Model obsahuje čtyři skupiny proměnných:

- x_j – časový posun příjíždějícího spoje $j \in J$ vzhledem k tp_j (definiční obor R_0^+),
- y_l – časový posun odjíždějícího spoje $l \in L$ vzhledem k t_{ol} (definiční obor R_0^+),
- h_j – čekání cestujících z příjíždějícího spoje $j \in J$ na nejbližší navazující spoj (definiční obor R_0^+),
- z_{jl} – pomocná bivalentní proměnná (definiční obor 0 nebo 1). Když po ukončení optimalizačního výpočtu bude $z_{jl} = 1$, potom bude zajištěn přestup ze spoje $j \in J$ na spoj $l \in L$, když $z_{jl} = 0$ potom přestup ze spoje $j \in J$ na spoj $l \in L$ zajištěn nebude.

5.3 Účelová funkce modelu

Účelová funkce reprezentuje celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících a je vyjádřena ve zvolených jednotkách (osobominutách, osobohodinách apod.). Z povahy funkce vyplývá, že v průběhu optimalizace bude požadováno, aby její hodnota byla minimalizována.

$$\min f(x, y, z, h) = \sum_{j \in J} f_j \cdot h_j$$

5.4 Omezující podmínky

Vytvořený matematický model pracuje se čtyřmi typy omezujících podmínek, které mohou být dle konkrétních situací modifikovány.

První typ omezující podmínky zajišťuje, že když se z časového hlediska přestup nestihne, nedojde v modelu ke vzniku přestupní vazby. Podmínka má tvar:

$$(tod_l + y_l) - (tp_j + x_j + tpr) \geq M(z_{jl} - 1) \text{ pro } j \in J \text{ a } l \in L$$

První člen na levé straně podmínky udává plánovaný čas odjezdu spoje $l \in L$ po jeho případném posunu. Druhý člen na levé straně podmínky udává plánovaný čas, ve kterém jsou cestující přijíždějící do přestupního uzlu spojem $j \in J$ nejdříve připraveni k odjezdu. Levá strana podmínky reprezentuje rozdíl mezi plánovanými časy odjezdu navazujícího spoje a plánovaným časem, ve kterém jsou cestující přijíždějící do přestupního uzlu nejdříve připraveni k odjezdu. Levá strana podmínky může nabývat záporných, nulových i kladných hodnot. Varianty hodnot levých stran a z nich plynoucí následky jsou shrnuty v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2: Varianty hodnot levých stran a jejich vazba na hodnoty proměnné z_{jl} .

Výsledek „ V “ levé strany rovnice	Hodnota bivalentní proměnné „ z_{jl} “	Slovní komentář
$V < 0$	$z_{jl} = 0$	Přestup se nestihne
$V = 0$	$z_{jl} = 0, z_{jl} = 1$	Nabývá-li $z_{jl} = 1$, časová ztráta je nulová
$V > 0$	$z_{jl} = 0, z_{jl} = 1$	Nabývá-li $z_{jl} = 1$, cestující na přípoj čekají

Z tabulky je patrné, že když dojde k případům, ve kterých $V > 0$ nebo $V = 0$, není garantována jednoznačná hodnota proměnné z_{jl} . Ta je garantována pouze v případě, kdy $V < 0$. V těchto případech je omezující podmínka aktivní.

Druhý typ omezujících podmínek vytváří vazbu strukturálních podmínek na účelovou funkci. Pomocí tohoto typu omezujících podmínek je optimalizační software schopen kvantifikovat hodnoty časových ztrát při vzniku přestupních vazeb.

$$(tod_l + y_l) - (tp_j + x_j + tpr) \leq h_j + M(1 - z_{jl}) \text{ pro } j \in J \text{ a } l \in L$$

První člen na levé straně podmínky udává plánovaný čas odjezdu spoje $l \in L$ po jeho případném posunu. Druhý člen na levé straně podmínky udává plánovaný čas, ve kterém jsou

cestující přijíždějící do přestupního uzlu spojem $j \in J$ nejdříve připraveni k odjezdu. Levá strana podmínky reprezentuje rozdíl mezi časem plánovanými časy odjezdu navazujícího spoje a plánovaným časem, ve kterém jsou cestující přijíždějící do přestupního uzlu nejdříve připraveni k odjezdu. Levá strana podmínky může nabývat záporných, nulových i kladných hodnot.

První člen rovnice na pravé straně udává dobu čekání přestupujících cestujících ze spoje $j \in J$ na spoj $l \in L$.

Varianty hodnot levých stran a z nich plynoucí následky jsou shrnuty tabulce č. 3.

Tabulka č. 3: Shrnutí variant u druhého typu podmínek.

Výsledek „ V “ levé strany rovnice	Hodnota bivalentní proměnné „ z_{jl} “
$V < 0$	$z_{jl} = 0, z_{jl} = 1$
$V = 0$	$z_{jl} = 0, z_{jl} = 1$
$V > 0$	$z_{jl} = 0, z_{jl} = 1$

Z tabulky č. 3 však nevyplývá pro proměnnou z_{jl} žádná jednoznačnost. Tato jednoznačnost je zajištěna třetím typem omezujících podmínek ve tvaru:

$$\sum_{j \in J} z_{jl} = 1 \text{ pro } l \in L$$

Další (čtvrtý) typ podmínek zajišťuje, aby plánované časové posuny přijíždějících a odjíždějících spojů nepřekročily maximální dovolené hodnoty časových posunů.

- $x_j \leq a_j$ $j \in J$
- $y_l \leq b_l$ $l \in L$

Poslední typy podmínek vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu.

- $x_j \geq 0$ $j \in J$
- $y_l \geq 0$ $l \in L$
- $h_j \geq 0$ $j \in J$
- $z_{jl} \in \{0,1\}$ $j \in J$ a $l \in L$

Základní model slouží jako podklad pro vytvoření reálného modelu městské hromadné dopravy v Třebíči. Ten bude přímo aplikován na linkové vedení a přestupní uzel.

6 Matematický model časové koordinace spojů MHD v Třebíči

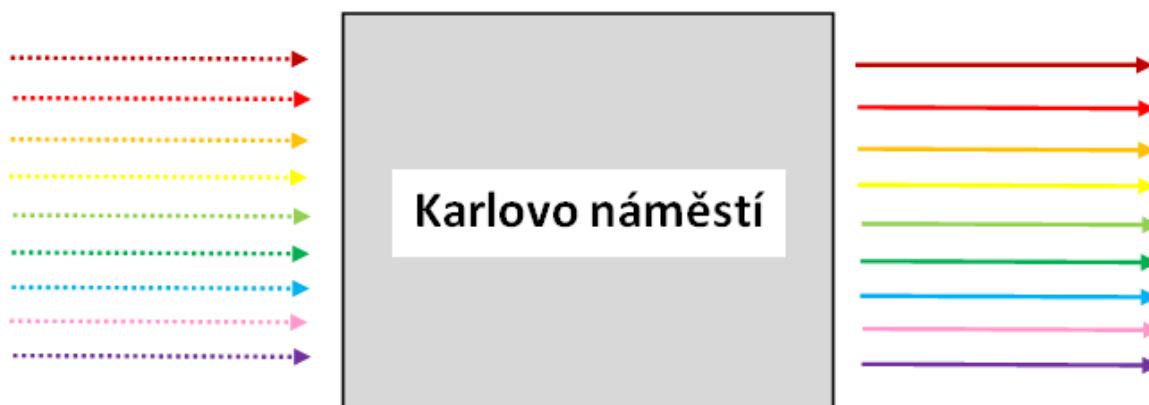
Obsahem kapitoly 5 bylo představení původního modelu prof. Janáčka. Původní model prof. Janáčka bude v kapitole 6 upraven do obecného tvaru vhodného pro časovou koordinaci v přestupním uzlu Karlovo náměstí v Třebíči.

Do původního modelu je třeba do účelové funkce i omezujících podmínek implementovat všechny linky trebíčské MHD, které přestupním uzlem projíždí. Zastávkou projíždějí linky číslo 1, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 31. Výjimkou je pouze linka číslo 21, kde je ovšem k 1. 1. 2018 vedeno pouze pět spojů a slouží především pro dopravu žáků a studentů do vzdělávacích zařízení. Vytvoření modelu bude spočívat v realizaci několika kroků:

1. vytvoření obecného schématu přestupního uzlu,
2. označení vstupních veličin a proměnných v upraveném modelu,
3. obecný zápis účelové funkce,
4. obecný zápis omezujících podmínek pro všechny linky projíždějící přestupním uzlem a odpovídajícímu taktovému provozu,
5. redukce množiny koordinovaných linek pouze na páteřní linky a množiny koordinovaných spojů pouze na dopolední přepravní sedlo (s jednou hodnotou taktu stejnou pro všechny linky koordinované páteřní linky).

6.1 Vytvoření obecného schématu přestupního uzlu

Na obrázku č. 14 je každá linka označena vlastní barvou. Tečkovanou čarou jsou schematicky označeny spoje příjezdějících linek, které jsou však v modelu nahrazeny jedním proudem.



Obrázek č. 14: Zjednodušené schéma příjezdějících a odjíždějících linek do přestupního uzlu.

Barevné značení linek je následující: 1, 4, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 31

6.2 Označení vstupních veličin a proměnných v upraveném modelu

- I – množina příjíždějících spojů
- K – množina odjíždějících směrů (linek)
- L – množina odjíždějících spojů do směru (linky) $k \in K$
- f_{ik} – intenzita, tj. průměrný počet přestupujících cestujících ze spoje $i \in I$ do směru $k \in K$
- tp_i – nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$
- tod_{kl} – nejdříve možný čas odjezdu spoje $l \in L$ do směru $k \in K$
- tpr – doba potřebná k přestupu mezi spoji
- a_i – maximální dovolený časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$
- b_{kl} – maximální dovolený časový posun odjíždějícího spoje $l \in L$ do směru $k \in K$
- x_i – časový posun spoje $i \in I$ vzhledem k tp_i
- y_{kl} – časový posun spoje $l \in L$ vzhledem k tod_{kl} do směru $k \in K$
- h_{ikl} – čekání cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$ na spoj $l \in L$ do směru $k \in K$
- z_{ikl} – pomocná bivalentní proměnná modelující vznik přestupní vazby ze spoje $i \in I$ na spoj $l \in L$ do směru $k \in K$ s následujícími významy:
 - $z_{ikl} = 1 \rightarrow$ přestup ze směru $i \in I$ na spoj $l \in L$ do směru $k \in K$ vznikne
 - $z_{ikl} = 0 \rightarrow$ přestup ze směru $i \in I$ na spoj $l \in L$ do směru $k \in K$ nevznikne

6.3 Obecný zápis účelové funkce

$$\min f(x, y, z, h) = \sum_{i \in I} \sum_{\substack{k \in K \\ k \neq i}} \sum_{l \in L} f_{ik} \cdot h_{ikl}$$

- index k bude konkrétně nabývat hodnot 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 a 9 podle číslování uvedeného v tabulce č. 4.
- Přečíslování linek je vytvořeno též kvůli zjednodušení indexování v matematickém modelu a následně také v optimalizačním software.

Tabulka č. 4: Přečíslování linek pro potřeby modelu.

Původní číslo linky	Výpočetní číslo linky
1	1
4	2
5	3
10	4
11	5
12	6
13	7
14	8
31	9

6.4 Obecný předpis omezujících podmínek

První typ omezujících podmínek v modelu s více příjíždějícími spoji, více odjíždějícími (linkami) a více odjíždějícími spoji do těchto směrů má tvar:

$$(tod_{kl} + y_{kl}) - (tp_i + x_i + tpr) \geq M(z_{ikl} - 1) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

Proměnnou y_{kl} je vhodné nahradit proměnnou x_k , neboť časové posuny spojů odjíždějících spojů jednotlivých linek jsou shodné s časovými posuny příjíždějících spojů těchto linek do přestupního uzlu. Není zde plánováno čekání spojů linek, které jím projíždějí. Podmínka tedy přejde do tvaru:

$$(tod_{kl} + x_k) - (tp_i + x_i + tpr) \geq M(z_{ikl} - 1) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

Podmínka musí být vytvořena pro všechny kombinace příjíždějících směrů a odjíždějících směrů a spojů. Níže je rozepsán fragment omezujících podmínek prvního typu

- i. $(tod_{21} + x_2) - (tp_1 + x_1 + tpr) \geq M(z_{121} - 1)$
- ii. $(tod_{22} + x_2) - (tp_1 + x_1 + tpr) \geq M(z_{122} - 1)$
-
- iii. $(tod_{11} + x_1) - (tp_2 + x_2 + tpr) \geq M(z_{211} - 1)$
- iv. $(tod_{12} + x_1) - (tp_2 + x_2 + tpr) \geq M(z_{212} - 1)$
-
- v. $(tod_{11} + x_1) - (tp_9 + x_9 + tpr) \geq M(z_{911} - 1)$
- vi. $(tod_{12} + x_1) - (tp_9 + x_9 + tpr) \geq M(z_{912} - 1)$
-

Druhý typ omezujících podmínek v modelu s více příjíždějícími směry (linkami) a více odjíždějícími (linkami) a více odjíždějícími spoji do těchto směrů má tvar:

$$(tod_{kl} + y_{kl}) - (tp_i + x_i + tpr) \leq h_{ikl} + M(1 - z_{ikl}) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

Proměnná y_{kl} byla opět nahrazena proměnnou x_k , neboť časové posuny spojů odjíždějících spojů jednotlivých linek jsou shodné s časovými posuny příjíždějících spojů těchto linek do přestupního uzlu (tzn., v přestupním uzlu není plánováno čekání spojů linek, které jím projíždějí). Podmínka tedy přejde do tvaru:

$$(tod_{kl} + x_k) - (tp_i + x_i + tpr) \leq h_{ikl} + M(1 - z_{ikl}) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

Podmínka musí být vytvořena pro všechny kombinace příjíždějících směrů a odjíždějících směrů a spojů. Níže je rozepsán fragment omezujících podmínek druhého typu

- i. $(tod_{21} + x_2) - (tp_1 + x_1 + tpr) \leq h_{121} + M(1 - z_{121})$
- ii. $(tod_{22} + x_2) - (tp_1 + x_1 + tpr) \leq h_{122} + M(1 - z_{122})$
-
- iii. $(tod_{11} + x_1) - (tp_2 + x_2 + tpr) \leq h_{211} + M(1 - z_{211})$
- iv. $(tod_{12} + x_1) - (tp_2 + x_2 + tpr) \leq h_{212} + M(1 - z_{212})$
-
- v. $(tod_{11} + x_1) - (tp_9 + x_9 + tpr) \leq h_{911} + M(1 - z_{911})$
- vi. $(tod_{12} + x_1) - (tp_9 + x_9 + tpr) \leq h_{912} + M(1 - z_{912})$
-

Uvažujeme-li, že na všech linkách je zaveden taktový provoz, je možno časy odjezdů druhého a každého dalšího spoje do stejného směru vyjádřit pomocí taktu.

Pro druhý odjíždějící spoj do směru $k \in K$ je možno psát:

$$(tod_{k1} + takt + x_k) - (t_{pi} + x_i + tpr) \leq h_{ikl} + M(1 - z_{ikl}) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

pro třetí odjíždějící spoj do směru $k \in K$ je možno psát:

$$(tod_{k1} + 2 \cdot takt + x_k) - (t_{pi} + x_i + tpr) \leq h_{ikl} + M(1 - z_{ikl}) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

obecně, pro l -tý spoj do směru $k \in K$ je možno psát

$$(tod_{k1} + (l - 1) \cdot takt + x_k) - (t_{pi} + x_i + tpr) \leq h_{ikl} + M(1 - z_{ikl}) \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$$

Třetí typ omezující podmínky bude mít tvar:

$$\sum_{l \in L} z_{ikl} = 1 \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i$$

Čtvrtý typ omezujících podmínek zajistí nepřekročení maximálních dovolených časových posunů spojů v jednotlivých směrech.

- $x_i \leq a_i \quad i \in I$

Poslední typ podmínek vymezení definičních oborů proměnných použitých v modelu.

- $x_i \geq 0 \quad i \in I$
- $h_{ikl} \geq 0 \quad i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$
- $z_{ikl} \in \{0,1\} \text{ pro } i \in I, k \in K, k \neq i, l \in L$

6.5 Redukce množiny koordinovaných linek pouze na páteřní linky a množiny koordinovaných spojů pouze na dopolední dopravní sedlo

Na ukázkou, se kterou bude pracováno v optimalizačním softwaru Xpress-IVE, bude počítáno s páteřními linkami MHD v Třebíči, na kterých bude uplatňována jedna hodnota taktu 30 minut stejná pro všechny linky koordinované páteřní linky. Ty tvoří základ systému městské hromadné dopravy a přestupní vazby mezi nimi jsou řádově více využívány ve srovnání s přestupními vazbami na ostatní doplňkové linky. Stejná hodnota taktu na všech páteřních linkách dále umožní výrazně redukovat počet omezujících podmínek na nezbytný počet (viz dále), aniž by došlo ke zkreslení hodnoty účelové funkce. Stačí se totiž omezit pouze na jeden příjíždějící spoj z každého směru (na každé páteřní lince) a dva odjíždějící (po sobě jedoucí) spoje do každého směru (na každé páteřní lince).

Otázkou zůstává, kterou kombinaci spojů vybrat, aby výsledky byly dostatečně reprezentativní (pokud možno nezkreslené). Aby nedošlo ke zkreslení výsledné hodnoty účelové funkce, stačí v podmínkách taktového provozu kumulovat počty přestupujících cestujících za celé koordinační období a vztáhnout je ke zvolené kombinaci koordinovaných spojů.

V dalším textu budou vytvořeny omezující podmínky pro všechny možné kombinace přestupů těchto 3 linek, kterých bude celkem 54. Šest z nich bude prvního typu, 12 druhého typu, 6 třetího typu, 3 čtvrtého typu a 27 posledního typu.

Matematický model pro koordinaci páteřních linek v přestupním uzlu Karlovo náměstí má tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, y, z, h) = & f_{12} \cdot h_{121} + f_{12} \cdot h_{122} + f_{13} \cdot h_{131} + f_{13} \cdot h_{132} + f_{21} \cdot h_{211} + f_{21} \cdot h_{212} \\ & + f_{23} \cdot h_{231} + f_{23} \cdot h_{232} + f_{31} \cdot h_{311} + f_{31} \cdot h_{312} + f_{32} \cdot h_{321} + f_{32} \cdot h_{322} \end{aligned}$$

za podmínek:

$$(tod_{21} + x_2) - (tp_1 + x_1) - tpr \geq M(z_{121} - 1)$$

$$(tod_{31} + x_3) - (tp_1 + x_1) - tpr \geq M(z_{131} - 1)$$

$$(tod_{11} + x_1) - (tp_2 + x_2) - tpr \geq M(z_{211} - 1)$$

$$(tod_{31} + x_3) - (tp_2 + x_2) - tpr \geq M(z_{231} - 1)$$

$$(tod_{11} + x_1) - (tp_3 + x_3) - tpr \geq M(z_{311} - 1)$$

$$(tod_{21} + x_2) - (tp_3 + x_3) - tpr \geq M(z_{321} - 1)$$

$$(tod_{21} + x_2) - (tp_{p1} + x_1) - tpr \leq h_{121} + M(1 - z_{121})$$

$$(tod_{21} + 30 + x_2) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{122} + M(1 - z_{122})$$

$$(tod_{31} + x_3) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{131} + M(1 - z_{131})$$

$$(tod_{31} + 30 + x_3) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{132} + M(1 - z_{132})$$

$$(tod_{31} + x_3) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{231} + M(1 - z_{231})$$

$$(tod_{31} + 30 + x_3) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{232} + M(1 - z_{232})$$

$$(tod_{11} + x_1) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{211} + M(1 - z_{211})$$

$$(tod_{11} + 30 + x_1) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{212} + M(1 - z_{212})$$

$$(tod_{11} + x_1) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{311} + M(1 - z_{311})$$

$$(tod_{11} + 30 + x_1) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{312} + M(1 - z_{312})$$

$$(tod_{21} + x_2) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{321} + M(1 - z_{321})$$

$$(tod_{21} + 30 + x_2) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{322} + M(1 - z_{322})$$

$$z_{121} + z_{122} = 1$$

$$x_1 \leq 29$$

$$z_{131} + z_{132} = 1$$

$$x_2 \leq 29$$

$$z_{211} + z_{212} = 1$$

$$x_3 \leq 29$$

$$z_{231} + z_{232} = 1$$

$$x_1 \geq 0$$

$$z_{311} + z_{312} = 1$$

$$x_2 \geq 0$$

$$z_{321} + z_{322} = 1$$

$$x_3 \geq 0$$

$$h_{121} \geq 0$$

$$z_{121} = \{0; 1\}$$

$$h_{122} \geq 0$$

$$z_{122} = \{0; 1\}$$

$$h_{131} \geq 0$$

$$z_{131} = \{0; 1\}$$

$$h_{132} \geq 0$$

$$z_{132} = \{0; 1\}$$

$$h_{211} \geq 0$$

$$z_{211} = \{0; 1\}$$

$$h_{212} \geq 0$$

$$z_{212} = \{0; 1\}$$

$$h_{231} \geq 0$$

$$z_{231} = \{0; 1\}$$

$$h_{232} \geq 0$$

$$z_{232} = \{0; 1\}$$

$$h_{311} \geq 0$$

$$z_{311} = \{0; 1\}$$

$$h_{312} \geq 0$$

$$z_{312} = \{0; 1\}$$

$$h_{321} \geq 0$$

$$z_{321} = \{0; 1\}$$

$$h_{322} \geq 0$$

$$z_{322} = \{0; 1\}$$

7 Optimalizační software Xpress-IVE

Po sestavení matematického modelu časové koordinace přestupních vazeb MHD v Třebíči je třeba účelovou funkci a podmínky transformovat do optimalizačního software. Jedním z možných software určených pro řešení úloh lineárního programování je optimalizační software Xpress-IVE.

V následujících odstavcích bude popsáno základní fungování programu pro potřeby využití při řešení optimalizační úlohy o uzlové koordinaci spojů. Je pracováno s anglickou verzí softwaru. Názvy příkazů však odpovídají svou funkcí českému významu.

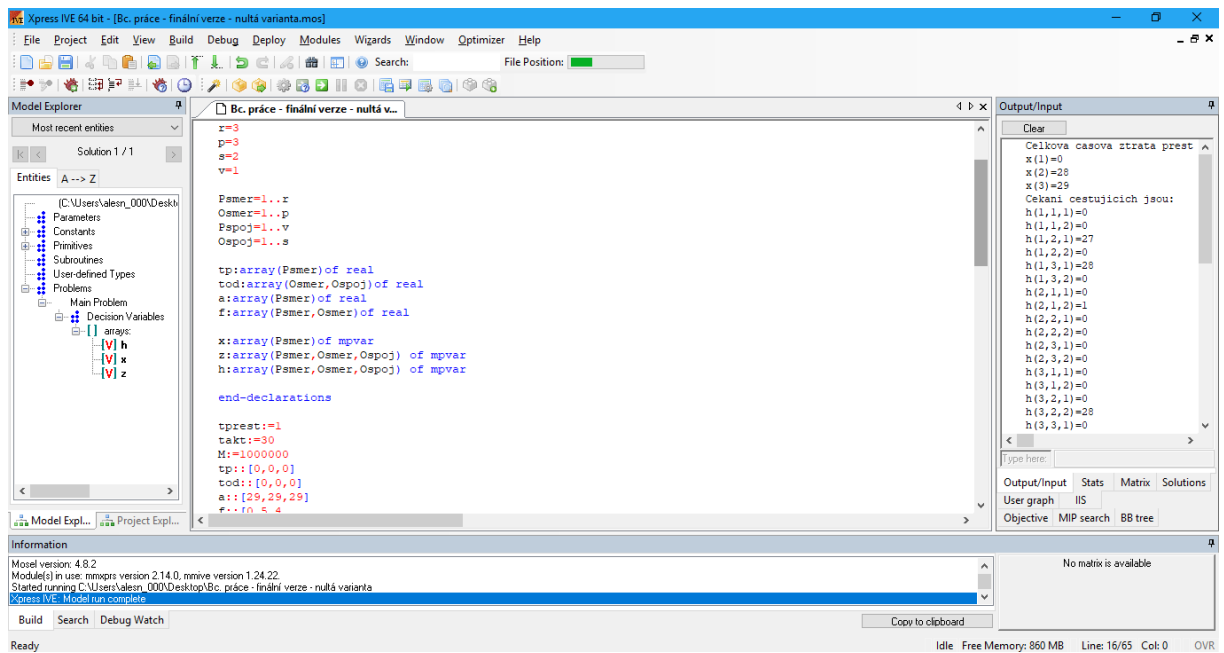
Na úvod je třeba zadefinovat hodnoty a proměnné. K tomu je využívána tzv. deklarační část, která začíná výrazem „declarations“ a končí slovním spojením „end-declarations“. V tomto oddíle jsou definovány prvky (indexy), které jsou obsaženy v množinách Psmer (příjíždějící linka/směr), Osmer (odjíždějící linka/směr) a Ospoj (odjíždějící linky). V programu množina Psmer odpovídá množině I , množina Osmer odpovídá množině K a množina Ospoj odpovídá množině L . Dále zde definujeme konstanty reprezentující hodnoty nejdříve možných časů příjezdů a odjezdů spojů do/z přestupního uzlu. Protože se jedná o veličiny typu pole, použijeme pro definování klíčové slovo „array of real“. Dále definujeme proměnné, které jsou taktéž typu pole a zavádějí se pomocí klíčového slova „array of mpvar“. Údaje v kulatých závorkách, např. (Psmer), značí, že příslušná proměnná pracuje s hodnotami, které jsou obsaženy v množině Psmer.

V další části programu jsou zadávány konkrétní vstupní hodnoty, kterých budou jednotlivé konstanty nabývat. Jedná se o hodnoty, které jsou jedinečné pro každý model a které vycházejí z příslušných situací z provozu. Podklady pro zmíněné hodnoty jsou získávány z jízdních řádů a z průzkumů zaměřených na počty přestupujících mezi koordinovanými spoji.

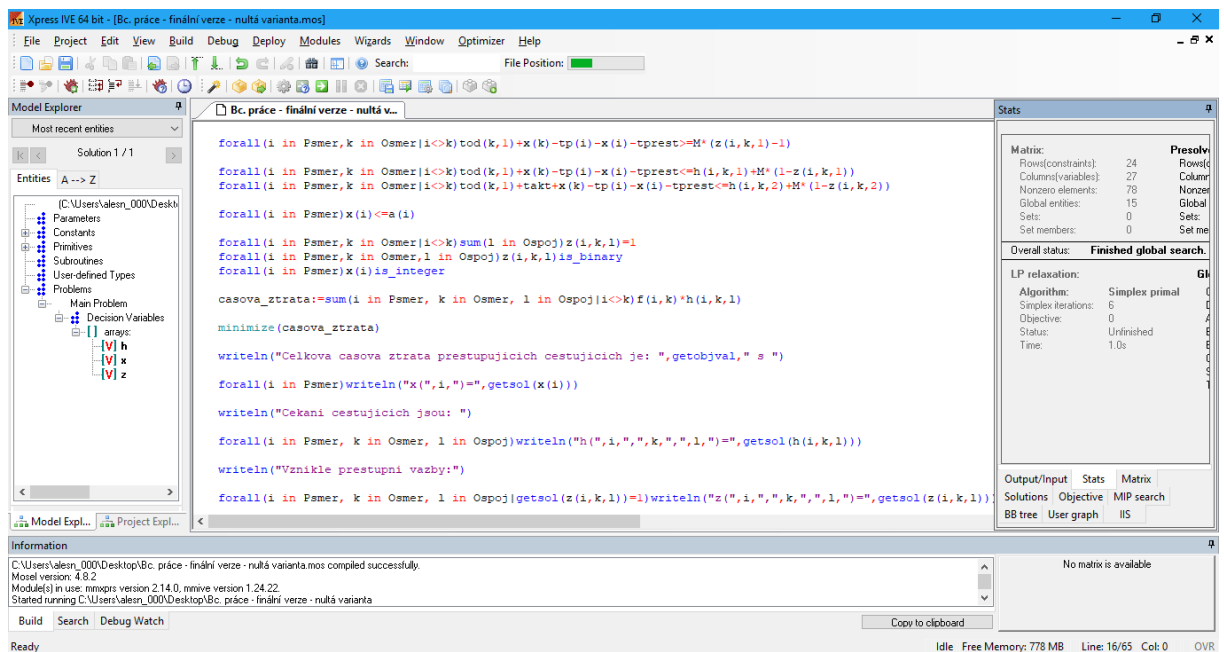
Poslední část zadání specifikuje samotné podmínky a příkazy, které musí software vyhodnotit, a které vychází ze sestaveného matematického modelu. Klíčové slovo „forall“ v software znamená pro všechna. Za tímto výrazem následuje kulatá závorka s indexy, které budou v podmínce využity. Symbol <> v programu značí, že hodnoty před a za ním se nerovnájí. Software dále pracuje s klíčovými slovy „is_binary“, který značí, že proměnná může nabýt pouze hodnot 0 nebo 1 – jedná se tedy o binární proměnnou. Klíčové slovo „sum“ je ekvivalentním vyjádřením sumy v psaném projevu. Rovněž je využíváno příkazu „writeln“, který slouží k vypsání řetězce znaků na obrazovku. Důležitým příkazem je „minimize“, jenž minimalizuje účelovou funkci. Posledními dvěma příkazy, které jsou v programu důležité, jsou „getobjval“ a „getsol“. Jak již zkratky napovídají, v prvním případě se

volným překladem jedná o příkaz „získej účelovou funkcí“, ve druhém „získej řešení“ (kromě účelové funkce).

Celý model je v samém úvodu zahájen klíčovým slovem „model“ a ukončen klíčovým slovem „end-model“. Výsledky zadání se následně zobrazují v pravém bočním panelu, kde je možné je prozkoumat z několika hledisek. Ukazují se např. výstupy a vstupy, statistiky, výsledky. Ty jsou zčásti vidět na obrázku č. 15 a obrázku č. 16.



Obrázek č. 15: Pracovní prostředí programu Xpress-IVE s výpisem výsledků.



Obrázek č. 16: Pracovní prostředí programu Xpress-IVE se stavovým hlášením.

8 Výpočetní experimenty s navrženým modelem

Tzv. nultá varianta časové koordinace spojů na centrálním přestupním uzlu „Karlovo náměstí“ vycházela ze základního předpokladu, respektive reálné situace, kdy všechny spoje, jež se sjíždí do přestupního uzlu, mají stanoven příjezd i odjezd ve stejnou minutu. Jedná se tak například o příjezd v X:00 a odjezd v X:00. Dále budou v modelu využity hypotetické hodnoty počtu přestupujících cestujících, které však lze v případě potřeby získat. Konstanta M je stanovena řádově výše, než zbývající hodnoty z důvodu zajištění funkčnosti celého modelu. Její hodnota je modelová.

Po transformaci modelu podle pravidel uvedených v kapitole 7 jsme získali následující program:

```
model Bc_prace  
uses "mmxprs"
```

```
declarations
```

```
r=3
```

```
p=3
```

```
s=2
```

```
v=1
```

```
Psmer=1..r
```

```
Osmer=1..p
```

```
Pspoj=1..v
```

```
Ospoj=1..s
```

```
tp:array(Psmer)of real
```

```
tod:array(Osmer,Ospoj)of real
```

```
a:array(Psmer)of real
```

```
f:array(Psmer,Osmer)of real
```

```
x:array(Psmer)of mpvar
```

```
z:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar
```

```
h:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar
```

```
end-declarations
```

```

tpr:=1
takt:=30
M:=1000000
tp::[0,0,0]
tod::[0,0,0]
a::[29,29,29]
f::[0,5,4,
12,0,20,
4,1,0]

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+x(k)-tp(i)-x(i)-tpr>=M*(z(i,k,1)-1)

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+x(k)-tp(i)-x(i)-tpr<=h(i,k,1)+M*(1-z(i,k,1))
forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+takt+x(k)-tp(i)-x(i)-tpr<=h(i,k,2)+M*(1-z(i,k,2))

forall(i in Psmer)x(i)<=a(i)

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)sum(l in Ospoj)z(i,k,l)=1
forall(i in Psmer,k in Osmer,l in Ospoj)z(i,k,l)is_binary
forall(i in Psmer)x(i)is_integer

casova_ztrata:=sum(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj|i<>k)f(i,k)*h(i,k,l)

minimize(casova_ztrata)

writeln("Celkova casova ztrata prestupujicich cestujicich je: ",
getobjval," s ")

forall(i in Psmer)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))

writeln("Cekani cestujicich jsou: ")

forall(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj)writeln("h(",i,","k,","l,")=",getsol(h(i,k,l)))

writeln("Vznikle prestupni vazby:")

```

```
forall(i in Psmer, k in Osmer, l in spoj|getsol(z(i,k,l))=1)
writeln("z(",l, ", ",k, ", ",l,")=",getsol(z(i,k,l)))
```

end-model

Výsledky sestaveného modelu jsou následující a jsou přímo převzaty z programu Xpress-IVE:

Celková časová ztráta přestupujících cestujících je: 287 min

$x(1)=0$

$x(2)=28$

$x(3)=29$

Čekání cestujících jsou:

$h(1,1,1)=0$

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

$h(1,2,1)=27$

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

$h(1,3,1)=28$

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

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

$h(2,1,2)=1$

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

$h(2,2,2)=0$

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

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

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

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

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

$h(3,2,2)=28$

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

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

Vzniklé přestupní vazby:

$$z(1,2,1)=1$$

$$z(1,3,1)=1$$

$$z(2,1,2)=1$$

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

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

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

Interpretace výsledku

Hodnoty $x(i)$ mají v tomto případě hodnotu 0, 28 a 29 minut. Tím se rozumí časový posun přijíždějících spojů vzhledem k nejdříve možnému času příjezdu spoje ze směru $i \in I$. Ve všech případech vzniknou přestupní vazby, což naznačují hodnoty $z_{ikl} = 1$, ovšem s rozdílem, zda na první odjíždějící spoj, nebo na druhý. Jelikož jsme v zadání zvolili, že přestupní doba bude rovna jedné minutě, ze dvou linek cestující první přípoj nestihnou a vyčkají na zastávce příjezdu následujícího spoje.

Protože však bylo získáno optimální řešení z hlediska časových ztrát přestupujících cestujících, musí platit, že bylo dosaženo minimálních časových ztrát. V takto jednoduchém případě je možno ověřit správnost daného tvrzení alespoň jednoduchou úvahou. V prvé řadě je nutno vědět, že při nastavené kladné přestupní době a kladných intenzitách přestupujících cestujících nelze očekávat, že by příjezdy a odjezdy spojů z přestupního uzlu byly nastaveny na současných hodnotách (spoje všech linek by přijížděly a zároveň odjížděly ve stejnou minutu). Je totiž zřejmé, že cestující by nestihli přestoupit ani z jednoho spoje. Časy příjezdů a odjezdů spojů tedy nastanou odchylně. Jednoduchá úvaha vedoucí k logickému ověření správnosti vychází z hodnot intenzit přestupujících cestujících. Nejvíce cestujících přestupuje z linky č. 2, což znamená, že by spoj linky č. 2 měl přijet do přestupního uzlu nejdříve. To je v navrženém řešení splněno, protože spoje v navrženém řešení přijíždějí v časových polohách X:28 a X:58. Na linku č. 1 přestupuje průměrně 12 cestujících a na linku č. 3 přestupuje průměrně 20 cestujících. Dá se tedy očekávat, že jako další v pořadí by měl přijet spoj linky č. 3, protože intenzita přestupujících cestujících je vyšší. Také tento předpoklad se v navrženém řešení naplnil. Spoj linky č. 3 budou podle navrženého řešení přijíždět v časových polohách X:29 a X:59. Jako poslední v pořadí přijede do přestupního uzlu spoj linky č. 1 a to v časových polohách X:00 a X:30. Ukázka jízdního řádu s osou symetrie v X:00, konkrétně v 8:00, je v tabulce č. 5.

Tabulka č. 5: Fragment jízdního řádu tří páteřních linek při přestupní době 1 minuta na Karlově náměstí.

Linka č. 1	Čas	Linka č. 2	Čas	Linka č. 3	Čas
Za Rybníkem	7:48	Poliklinika	8:13	Týn	8:14
Komenského nám.	7:57	Komenského nám.	8:25	Cyrilometodějská	8:26
Karlovo nám. (příj.)	8:00	Karlovo nám. (příj.)	8:28	Karlovo nám. (příj.)	8:29
Karlovo nám. (odj.)	8:00	Karlovo nám. (odj.)	8:28	Karlovo nám. (odj.)	8:29
Nádražní	8:05	Cyrilometodějská	8:33	Komenského nám.	8:32
Poliklinika	8:11	Atom hotel	8:45	Za Rybníkem	8:42

Kdyby byla přestupní doba hypoteticky stanovena na hodnotu nula minut, byla by časová ztráta přestupujících cestujících nulová. Ovšem, nastala by nežádoucí situace popsaná v úvodu předchozího odstavce. Kromě neschopnosti cestujících přestoupit v přestupní době 0 minut má tento stav i další zásadní nevýhodu, kterou je nízká odolnost vůči zpoždění jednotlivých linek. V praxi tak velmi často dochází ke zbytečnému ujetí přípoje a cestující jsou tak nuceni vyčkat hodnotu téměř shodnout s hodnotou taktu na další přípoj. Podobná situace panuje u přípojů doplňkových linek, kde je problém ještě umocněn vyššími intervaly mezi spoji, což je v případě ujetí přípoje pro přestupujícího cestujícího nepříjemné. Proto budou v následující kapitole uvedeny dva typy úprav, které by měly minimalizovat časovou ztrátu všech přestupujících cestujících.

8.1 Model první varianty

První možností, jak zlepšit spolehlivost přestupních vazeb systému MHD v Třebíči, je přistoupení na rozdílný čas příjezdu a odjezdu linek do přestupního uzlu. Samozřejmostí je zachování osy symetrie při půlhodinovém nebo hodinovém taktu. Vzor můžeme nalézt ve významnějších vlakových stanicích, kde je i bez křižování vlaků stanoven pobyt. Ten je zpravidla nastaven na 2 minuty. Reálně by situace mohla vypadat např. tak, že příjezd by byl stanoven na L:59 a odjezd z taktového uzlu v S:01. „L“ je označení pro lichou hodinu, „S“ pro sudou.

Při využití této inovace se naskýtají dvě možnosti formálního řešení tohoto posunu. V prvním případě by změny byly zaneseny nejen do systému pracujícím s optimalizací přestupních vazeb a do souvisejícího plánování, ale též do jízdních řádů pro cestující. Ve druhé variantě by se s těmito hodnotami pracovalo pouze interně a jízdní řády by reálně zůstaly nezměněné. První možnost přináší z pohledu cestujícího určitý „pocit bezpečí“, že v přestupním bodě je

vytvořena dostatečná časová rezerva na uskutečnění přestupů mezi spoji. Pozitiva druhé varianty pak spočívají v zachování odjezdových a příjezdových časů v zapamatovatelných polohách pro cestující, např. X:00, X:15, X:30, X:45.

Případný typ aplikace změn do jízdnicích řádů však není nutné rozhodnout před samotným vytvořením modelu. Jelikož je časová koordinace spojů vytvářena především pro cestující a jimi uskutečňované přestupní vazby, jako vhodnější se jeví varianta č. 2, která bude pro cestující pochopitelnější. V konečném důsledku se z jejich hlediska nic nezmění, ovšem v reálném provozu budou vytvořené přestupní vazby pohodlnější a spolehlivější.

Matematický model první varianty vychází z nulté. Budou ovšem upraveny omezující podmínky. Změna bude spočívat ve zpětné náhradě proměnné „ x_k “ proměnnou „ y_{kl} “ u výpočtu času odjezdu spoje z přestupního uzlu. Tato úprava zaručí rozdílnost času příjezdu a času odjezdu spojů z taktového uzlu a vytvoří pobyt spoje v přestupním uzlu. Ve výpočetním experimentu byla doba pobytu nastavena minimálně na 2 minuty. To tedy znamená, že model je nutno doplnit o podmínky typu $y_{kl} \geq x_k + 2$. Zároveň také musí platit, že $x_k \leq 29$ a současně $y_{kl} \leq 29$ (v případě půlhodinového taktu).

Matematický model pro první variantu bude mít tvar:

$$\min f(x, y, z, h) = f_{12} \cdot h_{121} + f_{12} \cdot h_{122} + f_{13} \cdot h_{131} + f_{13} \cdot h_{132} + f_{21} \cdot h_{211} + f_{21} \cdot h_{212} \\ + f_{23} \cdot h_{231} + f_{23} \cdot h_{232} + f_{31} \cdot h_{311} + f_{31} \cdot h_{312} + f_{32} \cdot h_{321} + f_{32} \cdot h_{322}$$

za podmínek:

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_1 + x_1) - tpr \geq M(z_{121} - 1)$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_1 + x_1) - tpr \geq M(z_{131} - 1)$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_2 + x_2) - tpr \geq M(z_{211} - 1)$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_2 + x_2) - tpr \geq M(z_{231} - 1)$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_3 + x_3) - tpr \geq M(z_{311} - 1)$$

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_3 + x_3) - tpr \geq M(z_{321} - 1)$$

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{121} + M(1 - z_{121})$$

$$(tod_{21} + 30 + y_{22}) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{122} + M(1 - z_{122})$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{131} + M(1 - z_{131})$$

$$(tod_{31} + 30 + y_{32}) - (tp_1 + x_1) - tpr \leq h_{132} + M(1 - z_{132})$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{231} + M(1 - z_{231})$$

$$(tod_{31} + 30 + y_{32}) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{232} + M(1 - z_{232})$$

$$\begin{aligned}
& (tod_{11} + y_{11}) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{211} + M(1 - z_{211}) \\
& (tod_{11} + 30 + y_{12}) - (tp_2 + x_2) - tpr \leq h_{212} + M(1 - z_{212}) \\
& (tod_{11} + y_{11}) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{311} + M(1 - z_{311}) \\
& (tod_{11} + 30 + y_{12}) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{312} + M(1 - z_{312}) \\
& (tod_{21} + y_{21}) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{321} + M(1 - z_{321}) \\
& (tod_{21} + 30 + y_{22}) - (tp_3 + x_3) - tpr \leq h_{322} + M(1 - z_{322})
\end{aligned}$$

$$\begin{array}{lllll}
z_{121} + z_{122} = 1 & x_1 \leq 29 & y_{11} \leq 29 & y_{11} \geq 0 & y_{11} \geq x_1 + 2 \\
z_{131} + z_{132} = 1 & x_2 \leq 29 & y_{12} \leq 29 & y_{12} \geq 0 & y_{12} \geq x_1 + 2 \\
z_{211} + z_{212} = 1 & x_3 \leq 29 & y_{21} \leq 29 & y_{21} \geq 0 & y_{21} \geq x_2 + 2 \\
z_{231} + z_{232} = 1 & x_1 \geq 0 & y_{22} \leq 29 & y_{22} \geq 0 & y_{22} \geq x_2 + 2 \\
z_{311} + z_{312} = 1 & x_2 \geq 0 & y_{31} \leq 29 & y_{31} \geq 0 & y_{31} \geq x_3 + 2 \\
z_{321} + z_{322} = 1 & x_3 \geq 0 & y_{32} \leq 29 & y_{32} \geq 0 & y_{32} \geq x_3 + 2
\end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
h_{121} \geq 0 & z_{121} = \{0; 1\} \\
h_{122} \geq 0 & z_{122} = \{0; 1\} \\
h_{131} \geq 0 & z_{131} = \{0; 1\} \\
h_{132} \geq 0 & z_{132} = \{0; 1\} \\
h_{211} \geq 0 & z_{211} = \{0; 1\} \\
h_{212} \geq 0 & z_{212} = \{0; 1\} \\
h_{231} \geq 0 & z_{231} = \{0; 1\} \\
h_{232} \geq 0 & z_{232} = \{0; 1\} \\
h_{311} \geq 0 & z_{311} = \{0; 1\} \\
h_{312} \geq 0 & z_{312} = \{0; 1\} \\
h_{321} \geq 0 & z_{321} = \{0; 1\} \\
h_{322} \geq 0 & z_{322} = \{0; 1\}
\end{array}$$

Po transformaci modelu do textu programu pro optimalizační softwaru Xpress-IVE máme:

```
model Bc_prace
```

```
uses "mmxprs"
```

```
declarations
```

```
r=3
```

```
p=3
```

```
s=1
```

```
v=2
```

```
Psmer=1..r
```

```
Osmer=1..p
```

```
Pspoj=1..s
```

```
Ospoj=1..v
```

```
tp:array(Psmer)of real
```

```
tod:array(Osmer,Ospoj)of real
```

```
a:array(Psmer)of real
```

```
b:array(Osmer,Ospoj)of real
```

```
f:array(Psmer,Osmer)of real
```

```
x:array(Psmer)of mpvar
```

```
y:array(Osmer,Ospoj)of mpvar
```

```
z:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar
```

```
h:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar
```

```
end-declarations
```

```
tpr:=1
```

```
takt:=30
```

```
M:=1000000
```

```
tp::[0,0,0]
```

```
tod::[0,0,0]
```

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

```
b::[29,29,29,
```

59,59,59]

f::[0,5,4

12,0,20,

4,1,0]

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k,l in Ospoj)tod(k,1)+y(k,l)-tp(i)-x(i)-tpr>=M*(z(i,k,1)-1)

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+y(k,1)-tp(i)-x(i)-tpr<=h(i,k,1)+M*(1-z(i,k,1))

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+takt+y(k,2)-tp(i)-x(i)-tpr<=h(i,k,2)+M*(1-z(i,k,2))

forall(i in Psmer)x(i)<=a(i)

forall(k in Osmer)y(k,1)<=b(k,1)

forall(k in Osmer)y(k,2)<=b(k,2)

forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)sum(l in Ospoj)z(i,k,l)=1

forall(i in Psmer,k in Osmer,l in Ospoj)y(k,l)>=x(i)+2

forall(i in Psmer,k in Osmer,l in Ospoj)z(i,k,l)is_binary

forall(i in Psmer)x(i)is_integer

casova_ztrata:=sum(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj|i<>k)f(i,k)*h(i,k,l)

minimize(casova_ztrata)

writeln("Celkova casova ztrata prestupujicich cestujicich je: ", getobjval," min ")

forall(i in Psmer)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))

forall(k in Osmer,l in Ospoj)writeln("y(",k,"," ,l,")=",getsol(y(k,l)))

writeln("Cekani cestujicich jsou: ")

forall(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj)writeln("h(",i,"," ,k,"," ,l,")=",getsol(h(i,k,l)))

writeln("Vznikle prestupni vazby:")

forall(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj)getsol(z(i,k,l))=1)writeln

`("z(",i,"",k,"",l,"")=?getsol(z(i,k,l))`

`end-model`

Řešení konkrétního případu je následující:

Celková časová ztráta přestupujících cestujících je: 46 min

$$x(1)=0$$

$$x(2)=0$$

$$x(3)=0$$

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

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

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

$$y(2,2)=2$$

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

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

Čekání cestujících jsou:

$$h(1,1,1)=0$$

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

$$h(1,2,1)=1$$

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

$$h(1,3,1)=1$$

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

$$h(2,1,1)=1$$

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

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

$$h(2,2,2)=0$$

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

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

$$h(3,1,1)=1$$

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

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

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

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

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

Vzniklé přestupní vazby:

$$z(1,2,1)=1$$

$$z(1,3,1)=1$$

$$z(2,1,2)=1$$

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

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

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

Interpretace výsledku

Tato varianta úpravy nulté varianty přináší při pohledu na výsledek zlepšení. Celková časová ztráta přestupujících cestujících, tedy celková doba čekání na navazující spoj, se výrazně snížila a činí pouze 46 minut ve srovnání s původními 287 minutami. V tomto případě, kdy je přestupní doba stanovena na 1 minutu, všichni přestupující cestující stihnou odjezd požadovaného přípoje. Zároveň je zde stanovena minutová rezerva pro případ zpoždění spojů koordinovaných linek, což je při vynásobení celkovým počtem přestupujících cestujících uvedená celková časová ztráta. I v tomto případě mohou být vstupní hodnoty upraveny v souvislosti s cílem výpočtu. Upravíme-li například přestupní dobu na 1,5 minuty, celková časová ztráta klesne na 23 minut. Zároveň je možné měnit minimální dobu pobytu, např. v důsledku zkrácení minimální doby pobytu se sníží časová rezerva pro přestupující cestující a spolehlivost přestupních vazeb, ale zároveň dojde ke snížení celkové časové ztráty přestupujících cestujících. Jízdní řád po této úpravě znázorňuje tabulka č. 6.

Tabulka č. 6: Fragment jízdního řádu získaného v důsledku povolení pobytu 2 minut v přestupním uzlu.

Linka č. 1	Čas	Linka č. 2	Čas	Linka č. 3	Čas
Za Rybníkem	7:48	Poliklinika	7:45	Týn	7:45
Komenského nám.	7:57	Komenského nám.	7:57	Cyrilometodějská	7:57
Karlovo nám. (příj.)	8:00	Karlovo nám. (příj.)	8:00	Karlovo nám. (příj.)	8:00
Karlovo nám. (odj.)	8:02	Karlovo nám. (odj.)	8:02	Karlovo nám. (odj.)	8:02
Nádražní	8:07	Cyrilometodějská	8:07	Komenského nám.	8:05
Poliklinika	8:13	Atom hotel	8:19	Za Rybníkem	8:15

Tato varianta však ještě nezohledňuje možnost změnit přestupní dobu mezi jednotlivými linkami. Změny byly prováděny pouze s jednou hodnotou stejnou pro všechny přestupní vazby. Proto je bude prozkoumána a navržena ještě jedna varianta, u které budou rozdílné přestupní doby mezi jednotlivými relacemi.

8.2 Model druhé varianty

V předchozích případech fungoval matematický model na principu shodné doby potřebné na přestup mezi jednotlivými vozidly. Nový model ovšem pracuje s rozdílnou dobou, která je potřebná na přestup mezi jednotlivými autobusy v centrálním bodě MHD Třebíč na Karlově náměstí. Pro jednotlivé kombinace přestupů je vytvořena matice, ve které jsou zaznamenány časové hodnoty potřebné k překonání cestujících mezi výstupními dveřmi prvního vozidla a nástupními dveřmi druhého vozidla. Ty jsou pro potřeby experimentu nastaveny pouze přibližně a v případě realizace tohoto návrhu je vhodné zjistit hodnoty průzkumem. Protože se přestupní doby mezi spoji dvou koordinovaných linek mohou v průběhu koordinačního období měnit (např. v závislosti na počtech přestupujících cestujících), je vhodné při požadavku na zachování taktu mezi spoji koordinovaných linek volit za hodnotu přestupní dobu odpovídající maximální přestupní době mezi spoji koordinovaných linek.

Na Karlově náměstí v Třebíči je největší vzdálenost mezi dvěma nástupišti určenými pro přestup 80 metrů. To způsobuje značné komplikace v přestupech mezi jednotlivými linkami, neboť cestující jsou nuceni překonávat velkou vzdálenost mezi stanovišti linek. Jelikož současné jízdní řády neobsahují dostatečnou časovou rezervu na vykrytí zpoždění, mnohdy dochází ke zcela zbytečnému ujetí přípoje z centrálního přestupního bodu.

V tomto případě se naskýtá zcela jednoduché řešení, které by přispělo ke zlepšení koordinace přestupních vazeb MHD v Třebíči. Tím je záměna uspořádání tří stanovišť linek městské hromadné dopravy tak, aby došlo k minimalizaci doby potřebné k zajištění přestupu cestujících. Tento návrh již byl předložen na třebíčském odboru dopravy. Rovněž byla zpracována anketa, zda by cestující tuto změnu uvítali. I přes kladný výsledek však ke změně zatím nedošlo s argumentem, že se plánuje revitalizace Karlova náměstí a úprava autobusových zastávek. To však ani po pěti letech od podání návrhu, tedy k roku 2018, nebylo realizováno.

Matematický model bude vycházet z 1. varianty s rozdílem, že hodnoty dob nutných pro přestup mezi stanovišti koordinovaných linek budou různé. Matematický model pro druhou variantu bude mít tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, y, z, h) = & f_{12} \cdot h_{121} + f_{12} \cdot h_{122} + f_{13} \cdot h_{131} + f_{13} \cdot h_{132} + f_{21} \cdot h_{211} + f_{21} \cdot h_{212} \\ & + f_{23} \cdot h_{231} + f_{23} \cdot h_{232} + f_{31} \cdot h_{311} + f_{31} \cdot h_{312} + f_{32} \cdot h_{321} + f_{32} \cdot h_{322} \end{aligned}$$

za podmínek:

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{12} \geq M(z_{121} - 1)$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{31} \geq M(z_{131} - 1)$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{21} \geq M(z_{211} - 1)$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{23} \geq M(z_{231} - 1)$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{31} \geq M(z_{311} - 1)$$

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{32} \geq M(z_{321} - 1)$$

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{12} \leq h_{121} + M(1 - z_{121})$$

$$(tod_{21} + 30 + y_{22}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{12} \leq h_{122} + M(1 - z_{122})$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{13} \leq h_{131} + M(1 - z_{131})$$

$$(tod_{31} + 30 + y_{32}) - (tp_1 + x_1) - tpr_{13} \leq h_{132} + M(1 - z_{132})$$

$$(tod_{31} + y_{31}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{23} \leq h_{231} + M(1 - z_{231})$$

$$(tod_{31} + 30 + y_{32}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{23} \leq h_{232} + M(1 - z_{232})$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{21} \leq h_{211} + M(1 - z_{211})$$

$$(tod_{11} + 30 + y_{12}) - (tp_2 + x_2) - tpr_{21} \leq h_{212} + M(1 - z_{212})$$

$$(tod_{11} + y_{11}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{31} \leq h_{311} + M(1 - z_{311})$$

$$(tod_{11} + 30 + y_{12}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{31} \leq h_{312} + M(1 - z_{312})$$

$$(tod_{21} + y_{21}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{32} \leq h_{321} + M(1 - z_{321})$$

$$(tod_{21} + 30 + y_{22}) - (tp_3 + x_3) - tpr_{32} \leq h_{322} + M(1 - z_{322})$$

$z_{121} + z_{122} = 1$	$x_1 \leq 29$	$y_{11} \leq 29$	$y_{11} \geq 0$	$y_{11} \geq x_1 + 2$
$z_{131} + z_{132} = 1$	$x_2 \leq 29$	$y_{12} \leq 29$	$y_{12} \geq 0$	$y_{12} \geq x_1 + 2$
$z_{211} + z_{212} = 1$	$x_3 \leq 29$	$y_{21} \leq 29$	$y_{21} \geq 0$	$y_{21} \geq x_2 + 2$
$z_{231} + z_{232} = 1$	$x_1 \geq 0$	$y_{22} \leq 29$	$y_{22} \geq 0$	$y_{22} \geq x_2 + 2$
$z_{311} + z_{312} = 1$	$x_2 \geq 0$	$y_{31} \leq 29$	$y_{31} \geq 0$	$y_{31} \geq x_3 + 2$
$z_{321} + z_{322} = 1$	$x_3 \geq 0$	$y_{32} \leq 29$	$y_{32} \geq 0$	$y_{32} \geq x_3 + 2$

$h_{121} \geq 0$	$z_{121} = \{0; 1\}$
$h_{122} \geq 0$	$z_{122} = \{0; 1\}$
$h_{131} \geq 0$	$z_{131} = \{0; 1\}$
$h_{132} \geq 0$	$z_{132} = \{0; 1\}$
$h_{211} \geq 0$	$z_{211} = \{0; 1\}$
$h_{212} \geq 0$	$z_{212} = \{0; 1\}$
$h_{231} \geq 0$	$z_{231} = \{0; 1\}$
$h_{232} \geq 0$	$z_{232} = \{0; 1\}$
$h_{311} \geq 0$	$z_{311} = \{0; 1\}$
$h_{312} \geq 0$	$z_{312} = \{0; 1\}$
$h_{321} \geq 0$	$z_{321} = \{0; 1\}$
$h_{322} \geq 0$	$z_{322} = \{0; 1\}$

Transformace do softwaru Xpress-IVE bude vypadat následovně:

model Bc_prace

uses "mmxprs"

declarations

r=3

p=3

s=1

v=2

Psmer=1..r

Osmer=1..p

Pspoj=1..s

Ospoj=1..v

tp:array(Psmer)of real

tod:array(Osmer,Ospoj)of real

```

tpr:array(Psmer,Osmer)of real
a:array(Psmer)of real
b:array(Osmer,Ospoj)of real
f:array(Psmer,Osmer)of real
x:array(Psmer)of mpvar
y:array(Osmer,Ospoj)of mpvar
z:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar
h:array(Psmer,Osmer,Ospoj) of mpvar

```

end-declarations

```
tpr::[0,0.4,0.4,0.1,0,0.3,0.2,0.4,0]
```

```
takt:=30
```

```
M:=1000000
```

```
tp::[0,0,0]
```

```
tod::[0,0,0]
```

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

```
b::[29,29,29,
```

```
59,59,59]
```

```
f::[0,5,4
```

```
12,0,20,
```

```
4,1,0]
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k,l in Ospoj)tod(k,1)+y(k,l)-tp(i)-x(i)-tpr(i,k)>=M*(z(i,k,1)-1)
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+y(k,1)-tp(i)-x(i)-tpr(i,k)<=h(i,k,1)+M*(1-z(i,k,1))
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)tod(k,1)+takt+y(k,2)-tp(i)-x(i)-tpr(i,k)<=h(i,k,2)+M*(1-z(i,k,2))
```

```
forall(i in Psmer)x(i)<=a(i)
```

```
forall(k in Osmer)y(k,1)<=b(k,1)
```

```
forall(k in Osmer)y(k,2)<=b(k,2)
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer|i<>k)sum(l in Ospoj)z(i,k,l)=1
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer,l in Ospoj)y(k,l)>=x(i)+2
```

```
forall(i in Psmer,k in Osmer,l in Ospoj)z(i,k,l)is_binary
```

```
forall(i in Psmer)x(i)is_integer
```



```
forall(k in Osmer,l in Ospoj)y(k,l)is_integer
```

```
casova_ztrata:=sum(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj|i<>k)f(i,k)*h(i,k,l)
```

```
minimize(casova_ztrata)
```

```
writeln("Celkova casova ztrata prestupujicich cestujicich je: ", getobjval," min ")
```

```
forall(i in Psmer)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))
```

```
forall(k in Osmer,l in Ospoj)writeln("y(",k, ", ",l,")=",getsol(y(k,l)))
```

```
writeln("Cekani cestujicich jsou: ")
```

```
forall(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj)writeln("h(",i, ", ",k, ", ",l,")=",getsol(h(i,k,l)))
```

```
writeln("Vznikle prestupni vazby:")
```

```
forall(i in Psmer, k in Osmer, l in Ospoj|getsol(z(i,k,l))=1)
```

```
writeln("z(",i, ", ",k, ", ",l, ")=",getsol(z(i,k,l)))
```

```
end-model
```

Celková časová ztráta přestupujících cestujících je: 51.4 min

$x(1)=0$

$x(2)=0$

$x(3)=0$

$y(1,1)=2$

$y(1,2)=2$

$y(2,1)=2$

$y(2,2)=2$

$y(3,1)=2$

$y(3,2)=2$

Čekání cestujících jsou:

$$h(1,1,1)=0$$

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

$$h(1,2,1)=0.8$$

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

$$h(1,3,1)=0.9$$

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

$$h(2,1,1)=1.3$$

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

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

$$h(2,2,2)=0$$

$$h(2,3,1)=1.1$$

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

$$h(3,1,1)=1.4$$

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

$$h(3,2,1)=0.6$$

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

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

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

Vzniklé přestupní vazby:

$$z(1,2,1)=1$$

$$z(1,3,1)=1$$

$$z(2,1,1)=1$$

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

$$z(3,1,1)=1$$

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

Interpretace výsledku

Upravený model s proměnlivou přestupní dobou ukazuje, že se jedná o důležitý parametr pro výpočet celkové časové ztráty všech přestupujících cestujících. Především také potvrzuje hypotézu, že je třeba co nejvíce snížit přestupní vzdálenost, kterou musí cestující překonat.

Stejně jako u první upravené varianty je vytvořena dostatečná časová rezerva, tudíž jsou v tomto případě zaručeny přestupní vazby z přijíždějícího spoje hned na první odjíždějící. Výrazně se tak redukuje doba čekání na další přípoj v pořadí.

Jelikož je přestupní doba mezi spoji různých linek rozdílná, lze při návrhu jízdního řádu uvažovat o rozdílném času odjezdu jednotlivých linek. Tato potřeba může vycházet z nutnosti snížit cestovní dobu z uzlu na konečnou zastávku za účelem snížení doby obratu vozidla nebo zabránit sjíždění autobusů v zastávkách ve společných úsecích.

Hodnoty použité pro tento model jsou pouze orientační a v případě aplikace optimalizačního přístupu by bylo nutné aktualizovat jejich přesnost. Stejná situace panuje u počtu přestupujících cestujících. Tabulka č. 7 ukazuje možnou podobu jízdního řádu s využitím rozdílné přestupní doby.

Tabulka č. 7: Fragment jízdního řádu získaný na základě rozdílných hodnot přestupních dob.

Linka č. 1	Čas	Linka č. 2	Čas	Linka č. 3	Čas
Za Rybníkem	7:48	Poliklinika	7:45	Týn	7:45
Komenského nám.	7:57	Komenského nám.	7:57	Cyrilometodějská	7:57
Karlovo nám. (příj.)	8:00	Karlovo nám. (příj.)	8:00	Karlovo nám. (příj.)	8:00
Karlovo nám. (odj.)	8:02	Karlovo nám. (odj.)	8:01	Karlovo nám. (odj.)	8:02
Nádražní	8:07	Cyrilometodějská	8:06	Komenského nám.	8:05
Poliklinika	8:13	Atom hotel	8:18	Za Rybníkem	8:15

9 Závěr

Městská hromadná doprava v Třebíči má poměrně vysoký potenciál. To je dáno jak sociální situací, tak geografickými poměry města. Proto je vhodné se zabývat možnostmi, jak MHD zatraktivnit a motivovat občany, aby ji využívali.

Odhlédneme-li od zkvalitňování městské hromadné dopravy technickými a technologickými prostředky, zůstává důležitým parametrem celková koncepce systému, předvídatelnost časových poloh spojů a přestupních vazeb. A právě na zkvalitnění přestupů mezi jednotlivými spoji je zaměřena tato práce.

Jejím výsledkem jsou tři zjištění a návrhy řešení. Prvním z nich je vytvoření matematického modelu, který popisuje současný stav přestupních vazeb na centrálním přestupním uzlu na Karlově náměstí. Nejprve došlo k sestavení účelové funkce a omezujících podmínek, které byly aplikovány na příjíždějící a odjíždějící linky. Následně byly tyto předpisy transformovány do optimalizačního softwaru Xpress-IVE, který již provedl požadované výpočty.

Matematický model, který popisuje aktuální stav městské hromadné dopravy, je rozšířen o dvě úpravy, které na sebe navazují. Jejich cílem je především zvýšit spolehlivost přestupních vazeb a zároveň minimalizovat časovou ztrátu přestupujících cestujících.

První úpravou je odlišení časové polohy příjezdu do přestupního uzlu a odjezdu z něj. To má za cíl zpřesnit přestupní vazby, respektive snížit pravděpodobnost ujetí přípoje. V přestupním uzlu bude vytvořena dostatečná časová rezerva, která na jednu stranu mírně prodlouží pobyt autobusů v zastávkách, v důsledku však výrazně sníží celkovou časovou ztrátu přestupujících cestujících. Snížení je způsobeno zajištěním přestupu již na první přípoj, a tak při standardní situaci (bez zpoždění a jiných negativních vlivů) není třeba vyčkávat na následující spoj. Vzhledem k delším intervalům mezi spoji v období dopoledního a odpoledního sedla, večerních hodin a víkendových dní, toto opatření napomůže k větší důvěryhodnosti veřejné dopravy. Cestující si totiž budou vědomi časových rezerv, které na přestupy vzniknou.

Druhá úprava modelu pracuje s rozdílnými přestupními dobami mezi jednotlivými relacemi (linkami). K tomuto rozšíření bylo přistoupeno především kvůli nevhodné vzdálenosti autobusových zastávek na Karlově náměstí určené k přestupům.

Výsledky jednotlivých výpočtů poukazují na několik možností, jak zkvalitnit přestupní vazby v trebíčském přestupním uzlu. Nejprve bude nutné zjistit reálné hodnoty, které budou do modelu dosazeny. V tomto případě se jedná o počty přestupujících cestujících a dobu potřebnou k přestupu mezi spoji. S hodnotami bude dále pracováno při výpočtu celkové časové ztráty přestupujících cestujících.

Základem upraveného systému tzv. rozjezdů by měla být odlišná časová poloha přijíždějících a odjíždějících spojů. Neměly by tedy být nadále stanoveny na stejnou minutu P:00 a O:00 či P:30 a O:30 (písmeno P značí přijíždějící spoje, písmeno O odjíždějící spoje), ale např. P:00 a O:02 či P:30 a O:32.

Aby bylo dosaženo ještě lepších výsledků a mohlo dojít i k minimalizaci pobytu vozidel v přestupním uzlu, měla by být využita i odlišná přestupní doba mezi stanovišti jednotlivých linek v přestupním uzlu. V tomto případě by mohly být stanoveny i odlišné minuty odjezdů přípoju z přestupního uzlu, např. P:00 a O:02 či P:00 a O:01.

Je však nutno také upozornit na jednu nevýhodu, která vyplývá ze stanovení nenulových pobytů spojů v přestupním uzlu. Tou je čekání (časová ztráta) cestujících, kteří se nacházejí ve vozidle a v přestupním uzlu nepřestupují. Je na zvážení, zda při optimalizačním výpočtu počítat i s těmito ztrátami či nikoliv.

Poslední úpravou, která nevyžaduje žádné finanční investice, je jiné uspořádání odjezdových stání páteřních linek v prostoru Karlova náměstí. Změna by plně korespondovala s již vytvořeným návrhem, který byl výše uvedenými výpočty potvrzen.

Tato práce může posloužit jako základ, který je následně možné rozšířit na celou síť MHD v Třebíči. Vhodné bude zapojení doplňkových linek do matematického modelu, u nichž je přestupní vazba na páteřní linky z hlediska kvality městské hromadné dopravy ještě důležitější. Dále se naskýtá možnost doplnění modelu o menší přestupní uzly, jako je například přestupní terminál u vlakového nádraží či zastávka Komenského náměstí, nebo přesunu centrálního přestupního uzlu mimo Karlovo náměstí do prostoru autobusového nádraží v Třebíči.

Všechny tyto možnosti mohou z provozního hlediska přinést výrazné kvalitativní zlepšení MHD v Třebíči. Současná situace je nevyhovující a úpravy jízdních řádů i systém tvorby přestupních vazeb jsou z drtivé části nahodilé. Chybí tedy systematická řešení. A právě tyto problémy je nutné řešit a nacházet optimální řešení pomocí matematických modelů sestavovaných na míru konkrétní situaci ve městě.

10 Použité zdroje

10.1 Literatura

CZECH CONSULT, *Analýza obsazenosti spojů městské hromadné dopravy v Třebíči*. Třebíč, 2016.

NOVÁK, Aleš. *60 let MHD Třebíč, aneb, Jízda do minulosti--: 1954-2014*. Třebíč: FiBox, 2014. ISBN 978-80-85571-23-3.

SUROVEC, Pavel. *Tvorba systému mestskej hromadnej dopravy*. Žilina: Žilinská univerzita, 1999, ISBN 80-7100-586-X.

TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace technologických procesů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2017. ISBN 978-80-248-3269-2.

10.2 Internetové zdroje

<https://www.doprava-trebic.cz>

<https://www.mapy.cz>

<https://www.szdc.cz>

11 Seznam obrázků

Obrázek č. 1: První linka třebíčské MHD.

Obrázek č. 2: Druhá linka třebíčské MHD.

Obrázek č. 3: Třetí linka třebíčské MHD.

Obrázek č. 4: Schéma linkového vedení k 1. 1. 2018.

Obrázek č. 5: Ukázka vytížení spoje v přepravní špičce na lince č. 4.

Obrázek č. 6: Schéma centrálního přestupního uzlu na Karlově náměstí.

Obrázek č. 7: Letecký pohled na přestupní uzel na Karlově náměstí.

Obrázek č. 8: Schéma poloh přestupních uzlů Karlovo náměstí, Komenského náměstí a Žerotínovo náměstí.

Obrázek č. 9: Návrh rozmístění linek na jednotlivé zastávky přestupního uzlu.

Obrázek č. 10: Ukázka jízdního řádu linky č. 12 s nekonceptně posunutými časy odjezdu z přestupního uzlu.

Obrázek č. 11: Demonstrace možné úpravy jízdního řádu s cílem dodržet jednotný interval mezi spoji.

Obrázek č. 12: Část jízdního řádu ukazující odjezdy doplňkové linky č. 12 v čase „rozjezdu“ páteřních linek.

Obrázek č. 13: Část jízdního řádu linky č. 12 s navrženými úpravami.

Obrázek č. 14: Zjednodušené schéma přijíždějících a odjíždějících linek do přestupního uzlu.

Obrázek č. 15: Pracovní prostředí programu Xpress-IVE s výpisem výsledků.

Obrázek č. 16: Pracovní prostředí programu Xpress-IVE se stavovým hlášením.

12 Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Linkové vedení MHD v Třebíči k 1. 1. 2018.

Tabulka č. 2: Varianty hodnot levých strana a jejich vazba na hodnoty proměnné z_{jl} .

Tabulka č. 3: Shrnutí variant u druhého typu podmínek.

Tabulka č. 4: Přečíslování linek pro potřeby modelu.

Tabulka č. 5: Fragment jízdního řádu tří páteřních linek při přestupní době 1 minuta na Karlově náměstí.

Tabulka č. 6: Fragment jízdního řádu získaného v důsledku povolení pobytu 2 minut v přestupním uzlu.

Tabulka č. 7: Fragment jízdního řádu získaného na základě rozdílných hodnot přestupních dob.