

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Koordinace páteřních linek veřejné hromadné
dopravy modelem matematického programování

Bc. Viliam Lábsky

Diplomová práce
2018

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viliam Lábsky**
Osobní číslo: **D16375**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Technologie a řízení dopravy**
Název tématu: **Koordinace páteřních linek veřejné hromadné dopravy
modelem matematického programování.**
Zadávací katedra: **Katedra technologie a řízení dopravy**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úvod

1. Optimalizace jízdních řádů.
2. Formulace modelu.
3. Aplikace modelu v reálném dopravním systému.
4. Zhodnocení.

Závěr

Rozsah grafických prací: 4 - 5

Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

(1) ČERNÁ, Anna a ČERNÝ, Jan. Manažerské rozhodování o dopravních systémech. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-849-7.

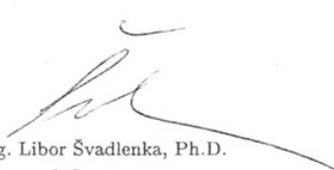
(2) ČERNÝ, Jan a KLUVÁNEK, Pavol. Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava : Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1991. ISBN 80-224-0099-8.

(3) TEICHMANN, Dušan. Optimalizace technologických procesů. Ostrava : Vysoká škola báňská Technická univerzita/Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-248-3269-2.

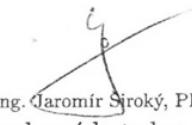
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Bulíček, Ph.D.
Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce: 5. února 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 18. května 2018


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.


doc. Ing. Jaromír Štoký, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 5. února 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2018

Viliam Lábsky

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci v první řadě poděkovat panu doc. Ing. Josefu Bulíčkoví, Ph. D. za odborné vedení a důkladné připomínkování mé diplomové práce.

Dále děkuji odpovědným pracovníkům Dopravního podniku města Pardubic a. s. za implementaci a ověření výsledků dosažených během tvorby diplomové práce v praxi.

ANOTACE

Práce se zabývá formulací optimalizačního modelu na bázi matematického programování pro časovou koordinaci spojů páteřních linek v systému veřejné hromadné dopravy. V první části se práce věnuje analýze možností pro hodnocení, navrhování a zkvalitňování jízdních řádů. Ve druhé části je provedena formulace modelu (metody). Část třetí je pak věnována aplikaci modelu v reálném dopravním systému (MHD Pardubice) a představuje touto cestou dosažený návrh koordinace páteřních linek. Diplomová práce je realizována s podporou programu Microsoft Excel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Evoluční algoritmus, Excel, jízdní řády, koordinace, matematický model, optimalizační model, Pardubice, páteřní linky, Řešitel, veřejná hromadná doprava

TITLE

Coordination of backbone public transport lines in the way of mathematical programming model.

ANNOTATION

This thesis deals with the formulation of optimization mathematical programming model for time coordination of backbone lines in public transport. The first part analyses the possibilities of evaluation, design and improvement of timetables. Formulation of the model and method is done in the second part. The third part is devoted to the application of model in real transport system and presents a proposal that is implemented through this model. The thesis is supported by Microsoft Excel.

KEYWORDS

Evolutionary algorithm, Excel, timetables, coordination, mathematical model, optimization model, Pardubice, backbone lines, Solver, public transport

OBSAH

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Seznam použitých zkratk	12
Úvod	13
1 Optimalizace jízdnic	15
1.1 <i>Důvody optimalizace</i>	15
1.2 <i>Koordinování jízdnic</i>	16
1.3 <i>Postup při optimalizaci</i>	17
1.4 <i>Optimalizace v Microsoft Excel</i>	18
1.5 <i>Hodnotící ukazatele</i>	19
1.5.1 <i>Součet čtverců rozestupů</i>	19
1.5.2 <i>Kvadratická míra nepravidelnosti</i>	20
1.5.3 <i>Odchylka od průměru nahoru</i>	21
1.5.4 <i>Odchylka od průměru dolů</i>	21
1.6 <i>Specifika optimalizačních metod</i>	22
1.6.1 <i>Omezující podmínky</i>	22
1.6.2 <i>Jednotka časových údajů</i>	23
1.7 <i>Metody pro koordinaci jízdnic na úsecích</i>	23
1.7.1 <i>Pravidelné n-segmenty na kružnici</i>	23
1.7.2 <i>Metoda KOS</i>	25
1.7.3 <i>Jednosměrná neomezená časová koordinace</i>	28
1.8 <i>Metody pro koordinaci jízdnic v uzlech</i>	30
1.9 <i>Metody pro koordinaci jízdnic v uzlech a na úsecích</i>	32
1.10 <i>Další metody pro optimalizaci jízdnic</i>	32
1.10.1 <i>Metoda GOP-1</i>	32
1.10.2 <i>Metoda GOP-2</i>	32
1.11 <i>Software pro konstrukci jízdnic</i>	33
1.11.1 <i>Skeleton</i>	33
1.11.2 <i>SOCKET</i>	33
1.11.3 <i>Magnus</i>	34
1.11.4 <i>OptimeTable</i>	34
1.12 <i>Shrnutí optimalizace jízdnic</i>	34

2	Metoda síťové koordinace páteřních linek	36
2.1	<i>Optimalizační model</i>	36
2.1.1	Formulace modelu	36
2.1.2	Příklady rozšiřujících omezujících podmínek	40
2.1.3	Ohodnocování úseků vahami	46
2.2	<i>Algoritmus řešení</i>	47
2.3	<i>Model sítě linek (prokladové schéma).....</i>	48
2.3.1	Selekce linek	49
2.3.2	Výběr významných zastávek a úseků	49
2.3.3	Tvorba sítě (prokladové schéma).....	49
2.3.4	Výpočtové vzorce – MS Excel	53
2.4	<i>Formulace modelu v MS Excel.....</i>	56
2.4.1	Proměnné modelu	57
2.4.2	Omezující podmínky modelu.....	57
2.4.3	Další nastavení	58
2.5	<i>Provedení optimalizace</i>	59
2.5.1	Základní optimalizace.....	59
2.5.2	Vyrovňovací čas.....	60
2.5.3	Váhy úseků	61
2.5.4	Přestupy	62
2.5.5	Minimalizace počtu vozidel.....	64
2.6	<i>Komentář k ilustračnímu řešení</i>	66
3	Aplikace v reálném systému	67
3.1	<i>Vytipování problému</i>	67
3.2	<i>Výběr řešitelů problému</i>	68
3.3	<i>Organizační schéma</i>	68
3.4	<i>Analýza organizačního schématu.....</i>	69
3.5	<i>Verbální model</i>	69
3.5.1	Požadovaný výstup a řešení.....	69
3.5.2	Kritéria kvality řešení	70
3.5.3	Omezující podmínky.....	70
3.5.4	Dostupné údaje	70
3.6	<i>Tvorba modelu sítě DPMP.....</i>	71
3.6.1	Selekce linek	71

3.6.2	Výběr uzlů a úseků pro model	75
3.7	<i>Rozšiřující omezující podmínky v síti DPMP</i>	79
3.7.1	Délka doby čekání na konečné	79
3.7.2	Umístění bezpečnostních přestávek.....	80
3.7.3	Bezkoliznost	81
3.7.4	Energetická omezení.....	81
3.8	<i>Zavedené návrhy koordinací</i>	82
3.8.1	Víkend léto 2017 (8–19 hodin).....	82
3.8.2	Víkend léto 2017 (6–8 hodin).....	85
3.8.3	Víkend léto 2017 (21–23 hodin).....	89
3.8.4	Pracovní den – prázdniny 2017 (8–13 hodin).....	93
4	Zhodnocení	96
4.1	<i>Zhodnocení optimalizační metody</i>	96
4.1.1	Možnosti využití metody	96
4.1.2	Tvorba schématu a nastavení optimalizačního modelu	96
4.1.3	Rozdíly oproti metodě KOS	97
4.2	<i>Zhodnocení implementace do praxe</i>	98
4.2.1	Porovnání optimalizovaných období	98
4.2.2	Vlastnosti sítě linek DPMP ve vztahu k implementaci metody	99
4.2.3	Využitelnost v jiných sítích	99
4.3	<i>Závěr zhodnocení</i>	99
	Závěr	100
	Seznam použitých zdrojů	101
	Seznam příloh	103
	Přílohy	104

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Optimalizace rozmístění n -úhelníků na kružnici	25
Obrázek 2 Zobrazení optimalizace metodou KOS na kružnici	27
Obrázek 3 Ilustrace dvou variant grafikonu s dopadem na počet nasazených vozidel.....	44
Obrázek 4 Schéma fiktivní sítě linek ukázkového modelu.....	50
Obrázek 5 Základ prokladového schématu bez vzorců	52
Obrázek 6 Zdrojový kód funkce „rozestupy“ pro rozestupy mezi spoji.....	55
Obrázek 7 Zdrojový kód funkce „kvadr_mira“ pro kvadratickou míru nepravidelnosti.....	56
Obrázek 8 Okno „Parametry Řešitele“	57
Obrázek 9 Výsledek prosté optimalizace.....	60
Obrázek 10 Výsledek optimalizace s využitím vyrovnávacího času.....	61
Obrázek 11 Výsledek optimalizace s využitím vah úseků	62
Obrázek 12 Výsledek optimalizace s důrazem na přestupy	63
Obrázek 13 Výsledek optimalizace s minimalizací počtu nasazených vozidel.....	65
Obrázek 14 Organizační schéma řešení problému	68
Obrázek 15 Schéma sítě modelu pro síťovou koordinaci páteřních linek DPMP	78
Obrázek 16 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (8–19 h).....	83
Obrázek 17 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (6–8 h).....	87
Obrázek 18 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (21–23 h).....	90
Obrázek 19 Výřez z prokladového schématu z období Prázdniny 2017 (8–13 h)	93

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání hodnot ukazatelů u různých metod optimalizace	28
Tabulka 2 Počet možných odjezdů všech linek z výchozí zastávky.....	48
Tabulka 3 Jízdní doby linek na fiktivním prokladovém schématu	50
Tabulka 4 Nastavení omezujících podmínek pro vzorový model	58
Tabulka 5 Minimální potřebné počty vozidel nasazených na linky	64
Tabulka 6 Přehled výsledků řešených příkladů	66
Tabulka 7 Trasování trolejbusových linek DPMP k 1. 4. 2017 (bezvýlukový stav)	71
Tabulka 8 Trasování autobusových linek DPMP k 1. 4. 2017 (bezvýlukový stav)	72
Tabulka 9 Linkové intervaly (trolejbusy)	73
Tabulka 10 Linkové intervaly (autobusy).....	74
Tabulka 11 Přehled konečných zastávek zařazených do modelu	75
Tabulka 12 Přehled nácestných zastávek zařazených do modelu.....	76
Tabulka 13 Přehled hodnocených úseků	77
Tabulka 14 Přehled minimálních dob obratu vybraných linek DPMP	79
Tabulka 15 Umístění pevných sociálních zařízení DPMP	80
Tabulka 16 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (8–19 h)	84
Tabulka 17 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (6–8 h)	88
Tabulka 18 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (21–23 h)	91
Tabulka 19 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Prázdniny 2017 (8–13 h).....	94
Tabulka 20 Přehled změn u jednotlivých navržených období	98

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DP	dopravní podnik
DPMP	Dopravní podnik města Pardubic a. s.
EA	evoluční algoritmus
GOP	Grafikony-OPtimalizace (metoda)
JŘ	jízdní řád(y)
KMN	kvadratická míra nepravidelnosti
KOS	Koordinace spojů (metoda)
MHD	městská hromadná doprava
MS	Microsoft
PERT	Program Evaluation and Review Technique (metoda)
ROPID	Regionální organizátor Pražské integrované dopravy
SePD	sedlo pracovního dne
ŠpPD	špička pracovního dne
VBA	Microsoft Visual Basic for Applications
VD	víkend – den
VR	víkend – ráno

ÚVOD

Subjekty plánující veřejnou dopravu (dopravní podniky, koordinátoři veřejné dopravy) se v rámci tvorby jízdních řádů a jejich kvality zabývají také problémem koordinací spojů na společných úsecích nebo v uzlech. Z pohledu metodiky řešení těchto úloh se jedná o dva různé optimalizační problémy. V případě koordinace na společném úseku je za úkol snížit nerovnoměrnost dopravy, naopak v uzlech je potřeba soustředit se na minimalizaci doby přestupu mezi návaznými spoji. V některých případech tato koordinace nebývá nijak náročná, jedná-li se o jednoduchou síť čítající jen několik málo linek. Se zvětšující se velikostí obsluhovaného území, zpravidla města nebo kraje, však dochází k nárůstu počtu obsluhovaných uzlů a úseků, topologie sítě se stává složitější a zvyšuje se počet provozovaných linek a zajišťovaných spojů. S rostoucí složitostí systému začíná být složitější i koordinace jízdních řádů a může docházet k nerovnoměrnému rozložení spojů na jednotlivých úsecích. Zde se naskytá otázka, zda (a hlavně jak) lze časové polohy spojů efektivně optimalizovat pomocí dostupných prostředků. Proto **cílem práce je návrh optimalizačního modelu pro časovou koordinaci páteřních linek ve veřejné hromadné dopravě a jeho aplikace na reálný dopravní systém**. K tomu bude využito prostředí rozšířeného a dostupného softwaru ze sady kancelářských aplikací Microsoft Office (Excel), doplnku Řešitel a evolučního algoritmu.

Záměrem diplomové práce není programovat specializovanou aplikaci pro koordinaci páteřních linek, ale pouze ukázat, že toto řešení je dopravně-technologicky možné.

Páteřní linka je v této práci uvažována jako taková linka, která je nosným prvkem celé sítě a většina cest v síti je aspoň částečně realizována po této podsíti. Práce je zaměřena na koordinaci páteřních linek právě z toho důvodu, že jsou provozovány v periodickém režimu a časovým zkoordinováním těchto linek na základním prokladovém schématu jsou vyřešeny časové polohy všech spojů páteřních linek po určitou část dne. Pokud by i nepáteřní linka byla periodického charakteru, je pak při koordinaci takovéto linky možno postupovat shodně jako v případě linky páteřní.

Využití navrhovaného modelu se předpokládá primárně v oblasti městské hromadné dopravy (autobusy, tramvaje a trolejbusy), avšak uplatnění by mohl nalézt i v jiných dopravních systémech, kde je zapotřebí časově zkoordinovat spoje v rámci obsluhované sítě (např. dálková i místní železniční doprava).

Práce je rozdělena do tří částí – první část se zabývá současným poznáním v oblasti optimalizace jízdních řádů. Ve druhé části je navržena metoda pro časovou koordinaci páteřních

linek. Třetí část pak aplikuje navrženou metodu v reálném prostředí, představuje dosažené výsledky a tyto hodnotí.

V rámci práce jsou v souvislosti s časovou koordinací spojů používány pojmy interval a rozestup. Interval (kromě matematického významu pro rozsah hodnot) je myšlen jako linkový interval udávající frekvenci spojů dané linky. Rozestup zase označuje následné intervaly mezi spoji všech linek na společném úseku.

1 OPTIMALIZACE JÍZDNÍCH ŘÁDŮ

V první kapitole diplomové práce je věnována pozornost obecně problematice optimalizace jízdních řádů.

Optimalizace v oboru operační výzkum je proces, při kterém se hledá takové řešení, které minimalizuje nebo maximalizuje účelovou (cílovou, nákladovou) funkci za daných omezujících podmínek. Pro optimalizaci lze využít exaktních metod (např. lineární programování), nebo heuristik, které však nemusí zaručit nejlepší výsledek. Mohou ale najít lokální extrém účelové funkce – takovou heuristikou je například evoluční algoritmus (EA), jehož použití bude pro tuto práci významné. Čím je úloha složitější, tím může být čas řešení delší a může se zhoršit schopnost nacházet nejlepší řešení.

V současnosti lze pro řešení optimalizačních úloh využít výpočetní techniku. Pro některé úlohy již existuje specializovaný software, jiné úlohy je možné formulovat a naprogramovat individuálně např. ve velmi rozšířeném tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Vhodné je i použití jiných matematických a optimalizačních programů. Úlohu lze také zadat specializovanému subjektu formou studie či projektu.

1.1 Důvody optimalizace

Obecnou snahou jakékoliv firmy by mělo být efektivní využívání zdrojů a minimalizace nákladů. Předmětem optimalizace dopravních procesů u dopravních podniků (DP) či koordinátorů dopravy nejsou pouze jízdní řády, ale podle (1) také například:

- turnusy,
- linkové vedení, trasování,
- umístění zastávek, dep, servisních středisek apod.,
- vozový park, náklady na provoz, vytěžování,
- nabídka spojů,
- atd.

Řešení všech uvedených problémů je komplexní úloha. Například navržené linkové vedení ovlivňuje počet potřebných spojů a maximální linkový interval pro posuzované období. Z toho vyplývá minimální obrátový čas a počet nasazených vozidel na jednotlivé linky pro zajištění dostatečné kapacity. Dále vzniká potřeba koordinace spojů na společných úsecích nebo v přestupních uzlech. Pro některé oblasti, kde není zaveden periodický jízdní řád, je zapotřebí určit optimální časové polohy spojů tak, aby vyhovovaly poptávce. S jízdními řády spojů zase

úzce souvisí turnusy náležitostí (jízdni řády pro vozidla, řidiče...). Dílčí problémy jsou zatíženy omezujícími podmínkami, o kterých je řeč v podkapitole 1.6.1. Úlohou DP je tak najít kompromis mezi dílčími problémy a určit optimální variantu.

Pro obecné řešení multikriteriálních optimalizačních problémů existuje několik různých přístupů a metod, které jsou uvedeny např. v (2). U tvorby jízdni řádů může být aplikován přístup takový, že účelové funkce ostatních úloh (např. minimalizace počtu vozidel a potřebného personálu) jsou převedeny na omezující podmínky. Po určení veškerých omezujících podmínek může být započato s tvorbou daného jízdniho řádu. Účelovou funkcí v tomto případě zůstanou časové ztráty cestujících při čekání na spoj.

Vzhledem k tomu, že navrhnout kompletní jízdni řád je časově velice náročné na to, aby bylo vytvořeno mnoho jeho variant, mezi kterými se vybírá ta optimální, je postup s převedením optimální hodnoty účelové funkce dílčího problému na omezující podmínku snazší. Ovšem je nutné tyto podmínky nastavit racionálně. V opačném případě nelze sestavit přípustné řešení a je třeba omezující podmínky upravit. Přístup, kdy by byly méně podstatné podmínky při návrhu optimálních jízdni řádů z hlediska časové koordinace spojů zanedbány, lze také volit v případě, že by formulace těchto podmínek byla náročná a pravděpodobnost nastání případu, který odporuje podmínce, relativně nízká. V takovém případě je nutné každé řešení podrobit revizi, zda splňuje i podmínky, které byly z modelu optimalizační úlohy pro zjednodušení vypuštěny.

1.2 Koordinování jízdni řádů

Důvodem, proč optimalizovat koordinaci jízdni řádů z hlediska časových poloh spojů, může být zabránění hromadění vozidel v zastávkách. Situace, kdy do zastávky přijede více vozidel zároveň, bývá pro cestující nepřehledná a prodlužuje dobu odbavení zastávky u dalších vozidel, která nestojí první nebo druhá u označníku. Třetí vozidlo poté musí znovu zastavovat u označníku, čímž může dojít ke zpoždění spoje. Povinnost zastavit u označníku může nastat také u druhého vozidla v případě, kdy u označníku stojí např. nevidomá osoba. V situaci, kdy se vozidlo nedostane do prostoru zastávky z důvodu jejího obsazení jinými vozidly vůbec, dojde i k zablokování jízdniho pruhu a omezení ostatních účastníků silničního provozu.

Výhodou koordinovaných jízdni řádů je minimalizace časových ztrát cestujících, které vznikají čekáním na „jejich“ spoj. To je důležité při přestupech i při cestování po úsecích obsluhovaných zároveň více linkami. (1 str. 169)

Dále je také účelné snížit riziko přeplnění vozidla, které by jelo po předchozím v delším časovém rozestupu. Na zastávkách by se totiž shromáždilo více cestujících než u předchozího vozidla. Pokud budou spoje ve společných úsecích rovnoměrně rozložené, lze také očekávat rovnoměrnější vytížení vozidel za předpokladu, že cestující přicházejí na zastávku náhodně a je jim jedno, který spoj využijí (při velké četnosti spojů např. při cestě ze sídliště do centra města). Tato hypotéza je předmětem bádání bakalářské práce (3) zpracovávané současně s touto diplomovou prací.

V některých případech naopak není zcela vhodné, aby spoje obsluhující určité uzly v síti, byly rovnoměrně rozložené v čase. Jedná se převážně o situace, kdy je potřeba přepravit větší množství cestujících ze zdroje nebo do cíle cesty v krátkém časovém intervalu. Příkladem může být návoz zaměstnanců do větších závodů, začátek a konec školního vyučování, případně zajištění přípojů k vlakovému nádraží, odkud vlaky odjíždějí a kam přijíždějí jen v určitých časových polohách (např. jednou za hodinu). Tento problém ale není předmětem řešení této diplomové práce. V praxi je potřeba k těmto případům přistupovat individuálně.

1.3 Postup při optimalizaci

Při řešení optimalizačního problému je obecný postup podle (1) následující:

- a) vytipování problému,
- b) výběr řešitelů rozhodovacích problémů,
- c) vytvoření organizačního schématu,
- d) analýza organizačního schématu,
- e) verbální model problému,
- f) (matematický) model problému,
- g) řešení problému,
- h) implementace v praxi.

Ad a) V první fázi je nejdříve nutné problém vytipovat, tj. poukázat na procesy, které neprobíhají dle představ a formulovat kritérium, jehož hodnota by měla být zlepšena. V této fázi není nutné, aby daný pracovník, který problém vytipuje, uměl problém i řešit. Základní chybou bývá hledání problému k existující metodě a šablonovitý přístup. Důležité je každý problém řešit naprosto individuálně, v opačném případě to může vést ke škodám.

V kontextu této práce je problém vytipován zpravidla na základě toho, že ve zkoumaném systému dochází k souběžné jízdě spojů více linek, příp. při navrhování nových jízdních řádů se technik jízdních řádů potýká s problémy v rámci koordinace časových poloh spojů. V již

platných jízdních řádech lze problém identifikovat buď z grafikonů na společných úsecích linek nebo pozorováním v terénu. Pokud dochází v síti k nelogickým souběhům (např. odjezd dvou linek stejným směrem v nepoměrně krátkém časovém intervalu), lze začít uvažovat o tom, že je zde prostor pro zlepšení.

Ad b) Pro řešení každého problému se sestavuje specializovaný tým, jehož složení odpovídá povaze řešeného problému. Tento tým je interdisciplinární a skládá se nejčastěji z technologů, ekonomů, systémových analytiků a dalších odborníků, kteří mají k problému „co říct“.

Pokud se jedná o jízdní řády a koordinaci na společných úsecích, případně v uzlech, bude členem řešitelského týmu např. ředitel DP, vedoucí příslušného střediska, technik jízdních řádů, pracovník odpovědný za turnusy náležitostí a pracovník odpovědný za infrastrukturu. Jestliže je zvolena optimalizace za pomoci specializovaného subjektu, pak i tento se stává součástí řešitelského týmu.

Další příklady ke každému bodu lze najít v literatuře, ze které byla tato podkapitola čerpána. (1 str. 36 – 48)

1.4 Optimalizace v Microsoft Excel

Tabulkový procesor Microsoft (MS) Excel lze využít v širokém záběru každodenních činností i pro řešení rozličných typů matematických úloh. Hlavními výhodami programu jsou velké rozšíření (ve firmách, školách, domácnostech) a uživatelská přívětivost. Obsahuje doplněk **Řešitel**, který nabízí řešení zadané úlohy pomocí tří metod. Bližší informace k doplňku i způsob, jak jej aktivovat, jsou uvedeny na stránkách oficiální podpory sady MS Office (4). Nevýhodou může být, že Řešitel je schopen pracovat s maximálně 200 proměnnými. Pro Excel také existují komerční doplňky, které tento problém řeší, avšak počet 200 proměnných je pro účely této práce dostačující.

První metodou je **simplexová metoda**, která je vhodná pro lineární problémy. V oblasti operačního výzkumu není třeba tuto metodu blíže představovat, jelikož patří k základním metodám řešení lineárních problémů. Případné další informace o metodě lze získat např. v (5).

Dále je možné využít **gradientní metodu**, kterou lze uplatnit i na nelineární, avšak hladké problémy. Hladkým problémem se rozumí, že je vyjádřen diferencovatelnou funkcí (ve všech bodech funkce existuje její diferenciál). Metoda pracuje na principu postupného prohledávání

okolí zvoleného výchozího bodu. Jakmile narazí na bod, jehož okolí nelze lépe ohodnotit, zastaví se. Více např. v (6).

Pro řešení některých úloh optimalizace jízdnicích řádů je vhodné použít metodu, která umožní řešit nehladké a nelineární problémy. To vyplývá z použití hodnotících ukazatelů, jejichž výpočet je nelineární (kvadratická míra nepravidelnosti apod.) a zároveň průběh funkce není hladký (v případě jízdnicích řádů jsou okamžiky odjezdů spojů diskrétní). Takovou úlohu lze v Excelu řešit pouze pomocí EA. Algoritmus napodobuje evoluční principy, které probíhají v přírodě – pracuje s velkou množinou přípustných řešení, která neustále mutují a kříží se mezi sebou, tím vznikají řešení nová a „přežívají“ jen ta nejkvalitnější (nejsilnější). (7)

Využití EA se nabízí tam, kde nelze provést výpočty např. z toho důvodu, že množina všech řešení problému je příliš velká (až neomezená), aby byla zpracována výpočetní technikou. V takovém případě jsou tyto algoritmy oproti exaktním metodám schopny najít suboptimální řešení mnohem rychleji. Nevýhodou však zůstává, že toto řešení nemusí být nejlepší, ale pouze přibližné. Algoritmus totiž není schopen projít celou množinu přípustných řešení. Útěchou může být to, že při řešení složitých kombinatorických problémů by výpočet všech přípustných řešení mohl zabrat i stovky let, kdežto heuristickými metodami, mezi něž EA patří, lze k uspokojivému výsledku dospět i v řádu minut.

1.5 Hodnotící ukazatele

Pro hodnocení kvality jízdnicího řádu lze použít různých ukazatelů. Ty se pak použijí do účelové funkce. Podkapitola shrnuje ty ukazatele, jež jsou použity v následujícím textu.

U jízdnicích řádů se lze setkat se dvěma druhy ukazatelů. První kategorií jsou ukazatele, které určují časové ztráty cestujících čekajících na svůj spoj. Výsledek takových ukazatelů je však závislý na počtu spojů a tato práce již uvažuje nabídku spojení jako vstupní parametr, a tak bude vhodnější od celkových časových ztrát upustit a zabývat se druhou kategorií. Ta hodnotí pravidelnost spojení na společných úsecích. Na definovaných společných úsecích je totiž cílem mít co nejpravidelnější nabídku spojů. (8 str. 198)

1.5.1 Součet čtverců rozestupů

První ukazatel je založený na matematickém tvrzení, že *pokud má n nezáporných čísel daný součet, tak součet čtverců těchto čísel je minimální, pokud jsou tato čísla shodná* (9 str. 228). Jinými slovy, pokud jsou rozestupy mezi spoji shodné, součet jejich druhých mocnin bude nejmenší. Pokud se tento součet mocnin vynásobí přepravním proudem a součin se vydělí

dvěma, pak výsledkem jsou časové ztráty při shromažďování všech cestujících jedoucích po zkoumaném úseku. To vyjadřuje vzorec (1) uvedený v literatuře (9). Předpokládá se, že při periodickém provozu se bude hodnotit koordinace spojů během jednoho koordinačního období (cyklu), po kterém se rozestupy mezi spoji opět opakují. Vztah (2), který lze nazvat „doplňkem“, poté určuje poslední člen do součtu řady ve vzorci (1). Tento doplněk je vlastně první odjezd z následujícího koordinačního období a je nutné jej pro kompletnost do výpočtu zahrnout.

$$s = \frac{q}{2} \sum_{i=1}^n (t_{i+1} - t_i)^2 \quad (1)$$

kde:

s časová ztráta všech cestujících [min^2]

q intenzita přepravního proudu cestujících na daném úseku [-],

t_i čas odjezdu i -tého spoje [min],

t_{n+1} $t_1 + c$, (2)

c koordinační období [min],

n počet spojů za koordinační období.

Časové ztráty jsou tedy úměrné součtu druhých mocnin rozestupů. Pro hodnocení pravidelnosti však stačí součet těchto mocnin.

1.5.2 Kvadratická míra nepravidelnosti

Význam předchozího ukazatele pro pravidelnost má však nevýhodu v tom, že nelze posoudit, jak moc doprava na úseku opravdu pravidelná je, protože při existenci nenulové intenzity přepravního proudu výsledek nebude nikdy roven 0. (1) Pro lepší představu o pravidelnosti dopravy slouží ukazatel „kvadratická míra nepravidelnosti“ (KMN), viz vzorec (3) uváděný v (1 str. 165).

$$f_q(I_1, \dots, I_n) = I_1^2 + \dots + I_n^2 - \frac{(I_1 + \dots + I_n)^2}{n} \quad (3)$$

kde:

f_q kvadratická míra nepravidelnosti [min^2],

$I_i = (t_{i+1} - t_i)$ i -tý rozestup mezi spoji [min],

n počet rozestupů mezi spoji.

V případě, kdy jsou všechny rozestupy mezi spoji shodné, bude funkce nabývat hodnoty 0. To lze chápat tak, že na úseku je nulová nepravidelnost. Čím je hodnota KMN vyšší, tím vyšší je i nepravidelnost na hodnoceném úseku. Další možností interpretace je hodnocení nadbytečnosti ztrát cestujících oproti zcela pravidelnému provozu. (1 str. 165)

1.5.3 Odchylka od průměru nahoru

Pravidelnost dopravy na úseku lze hodnotit také pomocí maximální odchylky rozestupů spojů od průměru nahoru. Tento ukazatel hodnotí, o kolik časových jednotek je delší největší rozestup mezi spoji oproti průměrnému intervalu na hodnoceném úseku. Ideálním stavem je hodnota 0, což koresponduje s tím, že doprava v úseku je naprosto pravidelná. Čím vyšší odchylka směrem nahoru je, tím spíše bude docházet k přetěžování vozidel. (1)

Výpočet odchylky od průměru nahoru je vyjádřen vzorcem (4) uvedeným v (1 str. 165).

$$f_h(I_1, \dots, I_n) = \max\{I_1, \dots, I_n\} - \frac{(I_1 + \dots + I_n)}{n} \quad (4)$$

kde:

f_h odchylka od průměru nahoru [min],

$I_i = (t_{i+1} - t_i)$ i -tý rozestup mezi spoji [min],

n počet rozestupů mezi spoji.

1.5.4 Odchylka od průměru dolů

Podobně jako odchylku od průměru nahoru lze vyjádřit i odchylku od průměru dolů. Výpočet se provede podle vzorce (5) uvedeném ve zdroji (1 str. 165). Hodnota tohoto ukazatele ukazuje nejhorší možný případ v rozestupech mezi spoji, který může nastat. To je důležité

například při posuzování rozestupů vozidel elektrické trakce nebo hromadění vozidel v zastávkách. (1)

$$f_d(I_1, \dots, I_n) = \frac{(I_1 + \dots + I_n)}{n} - \min\{I_1, \dots, I_n\} \quad (5)$$

kde:

f_d odchylka od průměru dolů [min],

$I_i = (t_{i+1} - t_i)$ i -tý rozestup mezi spoji [min],

n počet rozestupů mezi spoji.

1.6 Specifika optimalizačních metod

Tato podkapitola přibližuje specifické rysy optimalizačních úloh pro jízdní řády, které je nutné si uvědomit při řešení optimalizačních problémů.

1.6.1 Omezující podmínky

Každá úloha má soustavu omezujících podmínek, které při jejím řešení stanovují jisté hranice využitelnosti potřebných zdrojů. Při návrhu grafikonů se konstruktér setkává s řadou omezujících podmínek, jež do značné míry ovlivňují výslednou podobu jízdních řádů. Nejčastějšími omezeními, které se objevují při řešení praktických příkladů a tím pádem by se měly objevit ve většině optimalizačních metod pro periodické jízdní řády a stanovování potřebného počtu vozidel na trasách, podle (8) jsou:

- a) dostatečná nabídka kapacity pro uspokojení poptávky,
- b) počet vozidel vozového parku,
- c) technické parametry úseku.

Mezi další podmínky lze zařadit například podmínky pro dobu obratu vozidel na konečné zastávce, čerpání zákonných přestávek, čerpání těchto přestávek na konečných zastávkách se sociálním zařízením, bezkoliznost spojů apod.

U elektrické trakce jsou jistá omezení v počtu vozidel na jednom napájecím úseku. Je žádoucí, aby na jednom napájecím úseku měnirny nedocházelo k hromadění více odebírajících vozidel. Napájení každého úseku je navrhováno pro určitý maximální odběr proudu. Při zvýšených nárocích na odběr elektrické energie z napájecí sítě může být v krajním případě kontrolním systémem vyhodnoceno přetížení a následně dojde k odpojení úseku od zdroje

elektrické energie. V některých systémech může tak být jedním z kritérií i počet vozidel, která obsluhují určitý úsek zároveň.

Dále je nutné podotknout, že v každém dopravním systému mohou v závislosti na různých faktorech vznikat další, mnohokrát pro konkrétní systém i specifické, podmínky, jež se v jiných systémech vyskytovat nemusí.

1.6.2 Jednotka časových údajů

Základní časový formát, jak je vnímán lidstvem, jsou hodiny a minuty (hh.mm). Ovšem pro optimalizační úlohy, které pracují s časovými údaji, je vhodné formát „hh.mm“ převést na minuty, hlavně v případech, kdy jsou tyto údaje zpracovávány výpočetní technikou. Proto se u optimalizačních metod pro jízdní řády lze setkat s následujícími postupy:

- a) Převedení hodinového formátu na minutu odjezdu spoje od začátku dne, tedy spoj $t_i \in \langle 0; 1440 \rangle$. Potom třeba spoj odjíždějící v 6.44 h je v minutách vyjádřen číslem 404, spoj ve 21.27 h zase číslem 1287 atp. (1)
- b) Zavedením nulového okamžiku T_0 , od kterého se vyjádří přírůstkem v minutách odjezdy následujících spojů. Čas T_0 musí být volen nejpozději v okamžiku, kdy odjíždí (nebo přijíždí) první spoj uvažovaný v optimalizační úloze. Např. pokud první spoj v úloze odjíždí ve 4.31 h, je jako T_0 zvolen právě tento čas a má hodnotu 0. Práce dále může teoreticky pokračovat v intervalu $t_i \in \langle 0; \infty \rangle$. Spoj ve 4.59 h téhož dne bude přepočítán na hodnotu 28, spoj v 8.16 h bude zastupovat hodnota 225. (10)

Volba správného přístupu závisí na délce optimalizovaného období. Postup a) bude vhodné použít při optimalizaci jízdních řádů v rámci celého dne, b) zase v případech, kdy se řešitel problému zabývá kratším (izolovaným) časovým úsekem v řádech maximálně jednotek hodin a kdy je také nepravděpodobné, že by např. v budoucnu při úpravě řešení byly uvažovány spoje mimo zvolené období.

1.7 Metody pro koordinaci jízdních řádů na úsecích

Následující podkapitola uvádí přehled několika metod pro časovou koordinaci spojů na společných úsecích.

1.7.1 Pravidelné n -segmenty na kružnici

Úlohy o rozmístování pravidelných n -úhelníků na kružnici patří k nejlépe představitelným, a to díky grafickému znázornění odjezdů spojů jako n -úhelníků vepsaných do kružnice.

Podrobnější informace včetně důkazů k tomuto tématu a různých příkladů jsou dopodrobna uvedeny v literatuře (9 str. 229 – 255). Kružnice v tomto případě zobrazuje jednu periodu a vrcholy jednotlivých n -úhelníků představují odjezdy spojů jednotlivých linek. Délka jednoho koordinačního období je dlouhá jako nejmenší společný násobek intervalů koordinovaných linek, nejčastěji však 60 minut. Úlohou je natočit n -úhelníky vůči sobě takovým způsobem, aby vzdálenost mezi sousedními vrcholy byla co největší. Na začátku se zvolí libovolná výchozí poloha všech uvažovaných n -úhelníků. Poté je jeden z n -úhelníků natáčen o jeden dílek vpřed nebo zpět. Sledováním součtu druhých mocnin vzdáleností sousedních vrcholů se určí, zda došlo ke zlepšení nebo zhoršení situace.

Účelová funkce úlohy je interpretována vztahem (6), který vychází ze vztahu (1).

$$\min: f = \sum_{i=1}^n (t_{i+1} - t_i)^2 \quad (6)$$

kde:

$(t_{i+1} - t_i)$ i -tý rozestup mezi spoji [min],

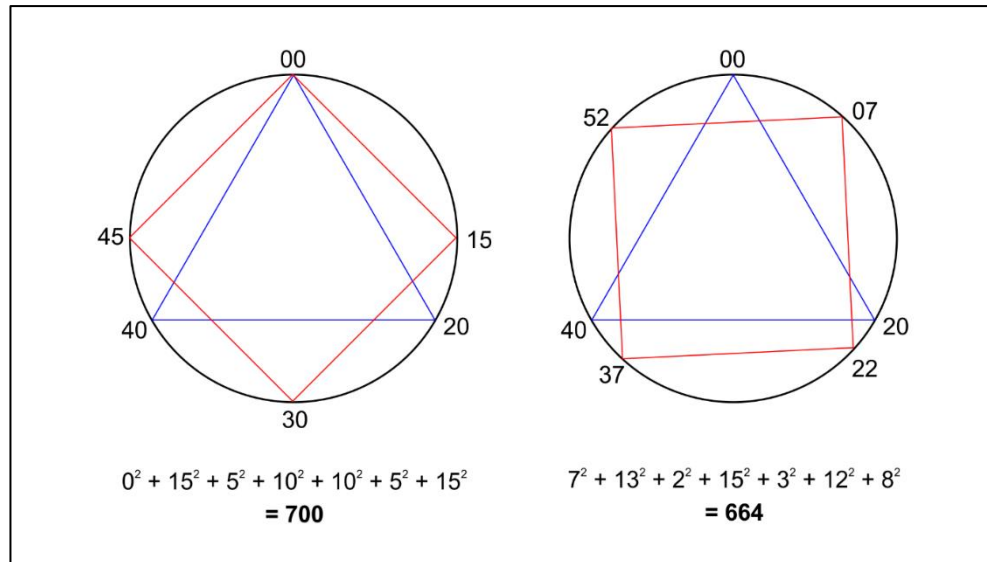
t_{n+1} $t_1 + c$.

Samotnou optimalizaci lze uvést na následujícím příkladu. Na úseku u jsou společně provozovány linky 1 a 2. Linka 1 má interval 20 minut, linka 2 interval 15 minut. Odjezdy linky 1 jsou v 00, 20, 40 minut. Linka 2 odjíždí v 00, 15, 30, 45 minut. Pro tuto konfiguraci je nejmenší společný násobek 60 minut, tudíž kružnice bude mít délku 60 jednotek. Odjezdy spojů ze zastávky do společného úseku jsou tedy v 00, 00, 15, 20, 30, 40, 45 minut. Nesmí se opomenout odjezd prvního spoje z následujícího koordinačního období, který v tomto případě bude nabývat hodnoty 60. Lze si povšimnout, že v 00 minut odjíždějí současně dva spoje, největší rozestup mezi spoji je 15 minut. Součet druhých mocnin rozestupů je **700 min²**. Pro ilustraci je tato konfigurace nejhorší možná.

Opožděním odjezdu všech spojů linky 2 o počet jednotek uvedených v závorce se získají následující hodnoty účelové funkce: **676 min²** (+ 1), **664 min²** (+ 2), **664 min²** (+ 3), **676 min²** (+ 4), **700 min²** (+ 5), **676 min²** (+ 6), **664 min²** (+ 7), **664 min²** (+ 8), atd. Nejnižší hodnota funkce je 664 min², a tudíž je výhodné zvolit takové natočení n -úhelníku, jež této hodnoty dosahuje. V tomto případě se nejdelší rozestup mezi spoji nezmenší, ale nedojde k žádnému současnému odjezdu více spojů. Odjezdy všech spojů v jednom koordinačním

období ze zastávky do společného úseku pak po natočení n -úhelníku linky 2 o 7 jednotek po směru hodinových ručiček vypadají takto: 00, 07, 20, 22, 30, 37, 40, 52 min.

Grafické znázornění lze vidět na obrázku 1, kde vlevo je výchozí stav před optimalizací a vpravo výsledek optimalizace.



Obrázek 1 Optimalizace rozmístění n -úhelníků na kružnici

Zdroj: (Autor)

Pro vyjádření časových ztrát všech cestujících jedoucích po úseku je nutno ještě hodnoty vynásobit počtem nastupujících a zároveň vystupujících cestujících v úseku u a vydělit dvěma.

Pro každý výsledek existuje ještě $c - 1$ dalších variant pootočení celého obrazce. V tomto případě, kdy $c = 60$, lze najít dalších 59 stejných řešení. To lze využít například při zohlednění síťových požadavků a natočit výsledný obrazec tak, aby došlo k lepší koordinaci s ostatními linkami, vyrovnání přepravních nerovnoměrností (konec školního vyučování, příjezdy vlaků, ...) apod. Další možností, jak tento poznatek využít, je fixace prvního odjezdu první linky v určité časové poloze. Tím dojde ke zmenšení výpočetních nároků při řešení problému pomocí výpočetní techniky.

1.7.2 Metoda KOS

Metoda KOS (KOordinace Spojů), uváděná v (1 str. 170, 171), je oproti metodě pravidelných n -segmentů na kružnici aplikovatelná pro koordinaci spojů na více úsecích zároveň. Této metodě je třeba věnovat bližší pozornost, protože na obdobném principu bude postaven optimalizační model navrhovaný v kapitole 2.

V úloze je dána **počáteční množina všech spojů** S_0 , každý spoj má dānu množinu $T(s)$ pŕipustnŕých odjezdů z vŕychozŕı zastāvky.

Dále je na sŕıti dāna množina vŕech orientovanŕch ŕusekŕ U . Každŕy ŕusek mā dān pŕočet cestujŕıch nastupujŕıch a zāroven vŕstupujŕıch v tomto ŕuseku q_u a množinu spojů S_u , kterē obsluhujŕı ŕusek u . Pro každŕy spoj je dāna jŕızdŕı doba d_{su} , kdy vstupuje do ŕuseku po odjezdu z vŕychozŕı zastāvky, viz vztah (7).

$$t_{osu} = t_0(s) + d_{su} \quad (7)$$

kde:

t_{osu} čas vstupujı spoje s do ŕuseku u [min],

$t_0(s)$ čas odjezdu spoje s ze vŕychozŕı zastāvky [min],

d_{su} jŕızdŕı doba spoje s z vŕychozŕı zastāvky do ŕuseku u [min].

Z tēchto dat je odvozena vŕychozŕı množina T_{0u} časů vŕstupu vŕech spojů z množiny S_u do ŕusekŕ U . Z časů vŕstupu spojů do ŕuseku se dle vztahu, kterŕy je uveden v kapitole 1.5.2, vypočŕıtā pro každŕy ŕusek kvadratickā mŕıra nepravidelnosti f_q .

Ŕcelovā funkce pro tuto ŕlohu bude vyjadŕovat celkovē časovē ztrāty vŕech cestujŕıch, kterŕı vyzuŕıvajŕı spoje z množiny S_u pro jŕızdu po ŕusecŕıch U . Tato funkce, vyjādŕenā vzorcem (8) se bude minimalizovat.

$$\min: w(U, t) = \sum_{u \in U} q_u \cdot f_q(I(u, t, 1), I(u, t, 2), \dots) \quad (8)$$

kde:

q_u pŕočet cestujŕıch nastupujŕıch a vŕstupujŕıch na ŕuseku u [-],

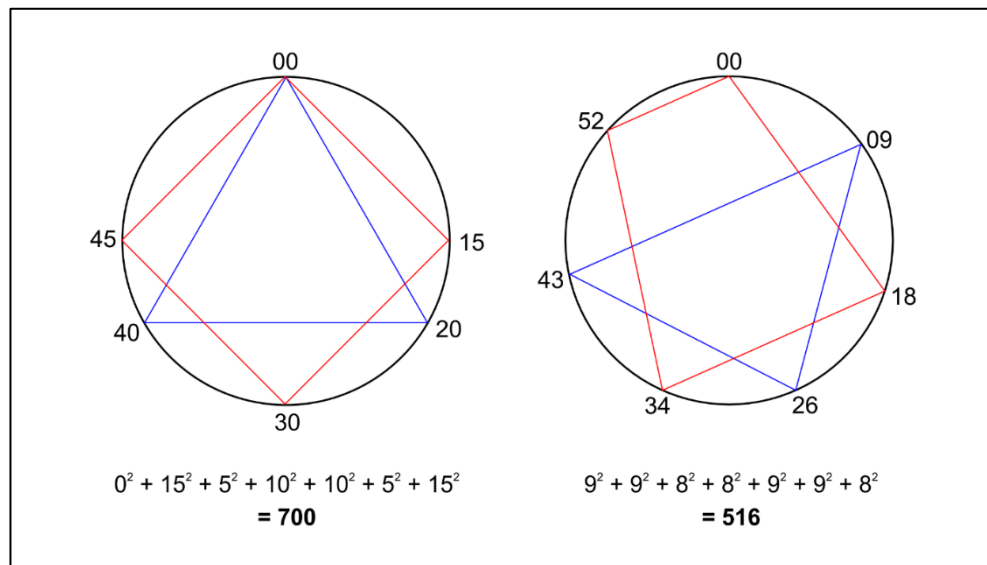
f_q kvadratickā mŕıra nepravidelnosti v ŕuseku u [min²].

Ŕkolem je nynŕı určit odjezdy vŕech spojů $s \in S_0$ tak, aby hodnota ŕcelovē funkce byla minimalizovāna.

V dalŕım kroku je **potŕeba zvolit vhodnŕy zlepŕujŕıcŕı algoritmus**, kterŕy ŕcelovou funkci vylepŕı. Metoda lineārŕıho programovānŕı se zde vylučuje pouŕıtŕım vztahů, kterē obsahujŕı exponenty. Ideālŕı je **metoda jednotkovŕch posunů**, kterā se postupnē aplikuje na vŕsechny

spoje. Každá hodnota $t_0(s)$ je postupně nahrazována hodnotou $t_0(s) \pm 1$ v rozmezí přípustných odjezdů daného spoje. Pokud dojde ke zlepšení hodnoty účelové funkce, je provedena výměna. Může být provedena výměna při prvním zlepšení (první bere), nebo se provede posunutí spoje napříč celým přípustným řešením a vybere se ta výměna, která hodnotu účelové funkce sníží nejvíce (větší bere). (1 str. 167)

Pro ilustraci je na obrázku 2 pomocí kružnice znázorněno, jakým způsobem může vypadat provedená optimalizace metodou KOS. Příklad je shodný jako ten v kapitole 1.7.1.



Obrázek 2 Zobrazení optimalizace metodou KOS na kružnici

Zdroj: (Autor)

Kvadratická míra nepravidelnosti ve výchozím návrhu nabývá hodnoty $185,714 \text{ min}^2$, po optimalizaci se hodnota snížila na $1,714 \text{ min}^2$, to je snížení o 184 min^2 . Ovšem na úsecích, kde jsou linky provozovány jednotlivě, dochází k vysoké nepravidelnosti. Rozestupy mezi spoji u linky 1 jsou v minutách 17-17-26 a u linky 2 to je 18-16-18-8. Proto metoda KOS také uvažuje počty cestujících, kteří jsou přepraveni i na ostatních úsecích. Pokud by na společném úseku linek 1 a 2 bylo přepraveno většinové množství cestujících a v ostatních úsecích by intenzity přepravního proudu byly zanedbatelné, pak by se takováto optimalizace vyplatila.

Pro demonstraci efektu optimalizace je v tabulce 1 provedeno srovnání hodnot ukazatelů po provedení optimalizace metodou rozložení pravidelných n -segmentů na kružnici a metodou KOS. Hodnocení je provedeno následujícími ukazateli: Součet mocnin rozestupů $\sum I^2$, kvadratická míra nepravidelnosti (KMN), odchylka od průměru nahoru f_h a odchylka od průměru dolů f_d . Pro úplnost je uvedena hodnota průměrného úsekového intervalu \bar{I} , jež zůstává stejná, protože počet spojů během koordinačního období zůstává nezměněn.

Tabulka 1 Srovnání hodnot ukazatelů u různých metod optimalizace

Varianta	Ukazatel				
	$\sum I^2$ [min ²]	KMN [min ²]	\bar{T} [min]	f_h [min]	f_d [min]
Výchozí	700	185,714	8,571	6,429	8,571
<i>n</i> -segmenty	664 (-36)	149,714 (-36)	8,571	6,429 (-0)	6,571 (-2)
KOS	516 (-184)	1,714 (-184)	8,571	0,429 (-6)	0,571 (-8)

Zdroj: (Autor)

U snížení hodnoty ukazatelů $\sum I^2$ a KMN lze pozorovat, že oba ukazatele jsou pro účely optimalizace (zejména na jednom úseku) matematicky ekvivalentní. KMN je vhodnější pro vyjádření pravidelnosti na úsecích v případě, kdy je potřeba porovnat míru koordinovanosti na více úsecích s rozdílnou četností obsluhujících spojů, případně pro porovnání jednoho úseku ve více koordinačních obdobích. Pro jednoduchou optimalizaci na jednotlivých úsecích postačí součet čtverců rozestupů.

Pro zpravidlení provozu na daném úseku je výrazně lepší použít metodu KOS, která spoje rozloží téměř rovnoměrně. To lze sledovat i na odchylnkách od průměru směrem nahoru a dolů, jež jsou metodou KOS téměř vynulovány.

1.7.3 Jednosměrná neomezená časová koordinace

Mírně odlišný způsob, jak zkoordinovat spoje jedoucí v jednom úseku (stejným směrem), uvádí článek (11). Uváděný postup nezohledňuje omezující podmínky jako jsou obrátové časy mezi spoji apod. Tato metoda jednosměrné časové koordinace má zadány pevně první spoj K_1 a poslední spoj K_2 , mezilehlé spoje, kterých je n , nejsou fixovány a lze je posunovat po časové ose. Čas odjezdu každého spoje je t_j .

V prvním kroku je určena délka jednoho časového úseku o (těch bude $n + 1$), viz rov. (9).

$$o = \frac{K_2 - K_1}{n + 1} [\text{min}] \quad (9)$$

kde:

o délka jednoho časového úseku [min],

K_1 čas odjezdu prvního spoje [min],

K_2 čas odjezdu druhého spoje [min],

n počet koordinovaných spojů [min].

Ve druhém kroku jsou vzorcem (10) určeny ideální časové polohy \bar{t}_i „pohyblivých spojů“.

$$\bar{t}_i = K_1 + o \cdot i [\text{min}] \quad (10)$$

kde:

\bar{t}_i ideální časová poloha i -tého spoje [min],

K_1 čas odjezdu prvního spoje [min],

o délka jednoho časového úseku [min].

Poté je sestavena matice odchylek dle vzorce (11), kdy jsou vypočteny odchylky každého spoje od všech ideálních poloh.

$$c_{ij} = |\bar{t}_i - t_j| \quad (11)$$

kde:

c_{ij} matice odchylek [min],

\bar{t}_i ideální časová poloha i -tého spoje [min],

t_j časová poloha j -tého spoje [min].

V další fázi je řešen přiřazovací problém, kdy se původní spoje přiřazují k ideálním polohám tak, aby suma odchylek u všech posunutých spojů byla minimální. Výraz $x_{ij} = 1$ znamená přiřazení spoje k nové časové poloze. Účelová funkce je vyjádřena rovnicí (12).

$$\min f(x) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (12)$$

kde:

c_{ij} matice odchylek [min],

x_{ij} matice přiřazení spojů [-].

Postup a omezující podmínky, kdy jsou určeny nejdříve a nejpозději možné odjezdy jednotlivých spojů z výchozí stanice, je uveden v další části článku (11).

Lze očekávat, že výsledek optimalizace touto metodou by byl shodný s výsledkem metody KOS, akorát by k němu bylo dospěno pomocí lineárního programování. Nevýhodou však je, že tato metoda je vhodná pouze pro koordinaci na jednom úseku, nezohledňuje žádné další úseky, a tak KOS je použitelná i ve složitějších systémech.

1.8 Metody pro koordinaci jízdních řádů v uzlech

Přestupování mezi spoji různých linek je pro část cestujících nevyhnutelnou záležitostí, jelikož neexistuje a ani nemůže existovat přímé spojení mezi všemi dvojicemi zastávek v provozované dopravní síti. Tento problém má dvě části – topologickou (odkud kam umožnit přestup) a metrickou (posun časových odjezdů). (1)

Tyto metody lze vyjádřit lineárně, ačkoliv k tomu je zapotřebí vytvořit pomocné proměnné. Vzhledem k tomu, že metody jsou založeny na podobném principu, je vybrán jeden zástupce z (10 str. 103), další formulace lze najít např. v (1).

Metoda koordinace spojů v uzlech, jejímž autorem je RNDr. Jaroslav Janáček, CSc. z Fakulty riadiena a informatiky Žilinskej univerzity v Žiline, umožňuje koordinaci spojů v jednom přestupním uzlu s předpokladem, že tento uzel je izolovaný. To znamená, že lze koordinovat jen a pouze přestupy v tomto uzlu bez ohledu na to, co nastane v ostatních uzlech sítě. Úlohu lze řešit exaktně pomocí lineárního programování.

Vstupními údaji jsou příjíždějící spoje $i \in I$, odjíždějící spoje $j \in J$ a intenzity cestujících přestupujících ze spojů f_i . Dále je znám údaj o čase potřebném k přestupu t_{prest} , ve kterém je potřeba počítat s výstupem a nástupem do vozidla i s časovou vzdáleností nástupišť. Úkolem je rozhodnout o časových posunech příjíždějících a odjíždějících spojů v daném uzlu tak,

aby došlo k minimalizaci čekání cestujících při přestupu. Pro posuny příjíždějících spojů se zavádí proměnné x , pro odjíždějící spoje proměnné y .

Pro správnou funkci lineárního programování je nutné časové hodnoty příjezdu/odjezdu spojů převést na nejdříve možný příjezd/odjezd. Tím dojde k vyřešení problému, kdy by některý spoj mohl být v čase posunut zpět (záporné znaménko – proměnná v modelu lineárního programování nemůže nabývat záporné hodnoty).

Účelovou funkcí je suma časových ztrát všech přestupujících cestujících (vzorec (13)).

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (13)$$

kde:

x_i časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ [min],

y_j časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ [min],

z_{ij} matice přestupních vazeb mezi příjíždějícími a odjíždějícími spoji,

f_i intenzity přestupujících cestujících [-],

h_i doba čekání jednoho cestujícího při přestupu [min].

Řešením optimalizační úlohy jsou údaje o posunech příjíždějících a odjíždějících spojů (proměnné x , resp. y). Ty je poté pro získání konkrétních časů odjezdů a příjezdů spojů potřeba přičíst k údajům o nejdříve možných příjezdech nebo odjezdech spojů.

Kompletní formulace modelu je uvedena v (10 str. 104–105).

1.9 Metody pro koordinaci jízdních řádů v uzlech a na úsecích

Existují-li metody pro koordinaci jízdních řádů v uzlech a na společných úsecích, je otázkou, zda existují i takové metody, které by zahrnovaly oba problémy zároveň. Při studiu literatury a vyhledávání dalších informací však nebyla nalezena žádná zmínka o takových metodách. Každá z nalezených metod se zabývala buď koordinací na úsecích, nebo v uzlech bez kladení důrazu na druhý problém. Při řešení takových problémů nejspíš nezbyvá nic jiného, než uplatnit tzv. „zkušenostní přístup“, kdy zaměstnanec DP na základě svých zkušeností a znalostí místního prostředí koordinuje časové polohy spojů metodou „tužka + papír“ nebo pomocí jednoduchého modelu v tabulkovém procesoru. V některých případech takový postup může být dostačující, ale s využitím sofistikovanějších metod by mohlo být dosaženo lepších výsledků a nabízené služby by byly zkvalitněny s žádnými nebo jen minimálními provozními náklady navíc. (1)

1.10 Další metody pro optimalizaci jízdních řádů

Pro doplnění předchozího textu tato kapitola udává přehled i jiných metod, které lze využít při optimalizaci jízdních řádů.

1.10.1 Metoda GOP-1

Zkratka této metody vychází ze spojení Grafikonu-OPTimalizace a je vhodná pro optimalizaci jízdního řádu jednoho spoje s cílem dosáhnout podmínek pro určitou míru spolehlivosti provozu. Metoda je založena na určité podobnosti s metodou PERT, která je známá ze síťové analýzy. Určuje jízdní doby a doby odbavení ve stanicích s přihlédnutím k tomu, že tyto hodnoty jsou náhodné veličiny. Proto se stanovují také hodnoty tolerovatelného zpoždění a přípustná míra rizika, že zpoždění bude vyšší než tolerovatelné. Úlohou je pak minimalizovat jednotlivé časy optimalizovaného spoje ve všech úsecích jízdy nebo odbavování ve stanici. Výsledkem je pak jízdní řád spoje, který bude dodržován s určitou pravděpodobností. Metoda je vhodná spíše pro dálkovou dopravu. (1)

1.10.2 Metoda GOP-2

Druhá metoda z „rodiny“ GOP se zabývá časovým rozložením daného počtu spojů na dané relaci s ohledem k přepravní poptávce. Východiskem je zjištění poptávaných časů odjezdů cestujícími. Cílem je pak minimalizovat časové ztráty všech cestujících, kteří uskutečňují cestu v daný den. Taktéž tato metoda je vhodná spíše pro dálkové spoje, případně pro příměstskou dopravu především s neperiodickým jízdním řádem. Výsledkem jsou optimální odjezdy spojů v rámci jednoho dne na zkoumané přepravní relaci. (1)

1.11 Software pro konstrukci jízdních řádů

Cílem této podkapitoly je nastínit existující softwarové možnosti pro návrh a konstrukci jízdních řádů dostupné českým dopravcům. Pro potřeby práce je podkapitola zaměřena na skutečnost, zda využívaný software umožňuje optimalizaci časové koordinace spojů na společných úsecích nebo v přestupních uzlech.

1.11.1 Skeleton

Software Skeleton, který vyvíjí firma FS Software, s.r.o., patří mezi městskými dopravními podniky v ČR k nejpoužívanějšímu informačnímu systému, který kromě nástrojů pro konstrukci jízdních řádů obsahuje také např. dispečerský deník, nástroje pro sledování kvality dopravy, vytváření statistik, systém pro technické prohlídky, intranet pro zaměstnance apod. a tvoří ucelené softwarové vybavení pro konstrukci jízdních řádů a plánování dopravy. S tímto systémem se lze setkat např. v Pardubicích, Plzni, Opavě, Hradci Králové a ve Zlíně.

Ze základní charakteristiky produktu pro konstrukci jízdních řádů lze usuzovat, že vytvářet a kontrolovat přestupní vazby a koordinaci linek na společných úsecích je možné pomocí grafického znázornění jízdních řádů. O automatizovaném návrhu a optimalizaci jízdních řádů ze sledovaného hlediska zmínka nalezena nebyla, dopravní podniky (Pardubice, Zlín) takto software nepoužívají. Naopak je dle této charakteristiky možné software využít v souladu se zvolenou metodou práce konstruktéra dopravy. (12)

1.11.2 SOCRET

Tento software, jenž vyvíjí firma CHAPS spol. s r.o., je využíván u větších dopravních podniků v ČR a koordinátorů dopravy – Dopravní podnik hlavního města Prahy, a.s., Dopravní podnik města Brna, a.s., Dopravní podnik Ostrava a.s., ROPID a KORDIS JMK, a.s. Dle uvedených informací software umožňuje sledovat koordinaci linek na úsecích a v uzlech. Lze se tedy domnívat, že automaticky optimalizovat časovou koordinaci linek software neumí. (13)

1.11.3 Magnus

Relativním nováčkem na českém trhu v oblasti konstrukce jízdnicích řádů je firma PTT Software, s.r.o. se svým softwarem Magnus. Dá se říci, že rozsahem svého systému konkuruje FS Softwaru. V ČR se lze s tímto systémem setkat v Dopravním podniku města Liberec a Jablonec nad Nisou.

Software je konstruován s důrazem na optimalizaci oběhů vozidel a směn řidičů. V oblasti koordinace linek v uzlech a na společných úsecích nabízí pouze analytické nástroje. (14)

1.11.4 OptimeTable

Systém OptimeTable navržený v práci (15), je vytvořen pro optimalizaci jízdnicích řádů podle pravidelných požadavků cestujících a jako základ slouží informace o těchto požadavcích v celém systému. K návrhu jízdnicích řádů využívá genetický algoritmus a následně navržený jízdnicí řád hodnotí. Hodnotícími kritérii jsou zde poměr čisté a hrubé cestovní doby všech cestujících a poměr vytížení vozidel. Z podstaty práce (15) je možné dedukovat, že určitá koordinace spojů nastane právě kvůli vytíženosti vozidel a minimalizaci času přestupu, ale nelze říci, že by práce (15) byla zaměřena na koordinaci časových poloh spojů z takového hlediska, jako uvedené optimalizační metody, případně nezohledňuje periodicitu provozu. Z pohledu této diplomové práce je však důležitým utvrzením, že **využití EA v oblasti jízdnicích řádů je možné a proveditelné.**

1.12 Shrnutí optimalizace jízdnicích řádů

Kapitola 1 uvádí do problematiky optimalizace jízdnicích řádů z hlediska časové koordinace a představuje důvody, proč by měla tato optimalizace probíhat. Také jsou uvedeny některé ukazatele pro hodnocení kvality navržených jízdnicích řádů z hlediska časové koordinace spojů na společných úsecích.

Dále jsou zmíněny základní specifické rysy optimalizačních úloh v oblasti jízdnicích řádů. Pro koordinaci na úsecích to jsou metody **rozmístění pravidelných n -segmentů na kružnici, metoda KOS a neomezená časová koordinace.**

Princip rozmístování pravidelných n -úhelníků na kružnici bude vhodné uplatnit v případě jednoduché sítě linek periodické dopravy na malém počtu koordinovaných úseků. Pokud navíc koordinované linky budou mít (polo)jednotný interval, je tato metoda nejvhodnější z toho důvodu, že zachovává periodický charakter všech linek i na jiných úsecích, než jen na optimalizovaném. Naopak v případě koordinace více linek s nejednotným či nepravidelným

intervalem bude lepší použít metodu KOS, která dokáže odjezdy spojů nastavit takovým způsobem, aby se zmenšila celková míra nepravidelnosti v celé síti i v závislosti na přepravních intenzitách. Metoda jednosměrné časové koordinace se jeví jako jistá modifikace metody KOS, avšak vhodná pouze pro koordinaci na jednom úseku, zato s využitím lineárního programování. Uplatnění by našla například při rozvrhování spojů na příměstských trasách.

Pro koordinaci návazných spojů v uzlech také existují metody, avšak nevýhodou těchto metod se zdá být, že jsou využitelné pouze v izolovaných případech, nikoliv v celé síti zároveň.

Analýzou autorovi známých softwarových možností pro podporu tvorby JŘ bylo zjištěno, že prakticky neexistuje software, který by dokázal (pomocí některé z uváděných metod) navrhnout časovou koordinaci jízdních řádů na společných úsecích a v uzlech. Vše tedy závisí na konstruktérovi a jeho přístupu k tvorbě jízdních řádů.

Východiskem pro další části diplomové práce je poznání, že časová koordinace jízdních řádů na více úsecích současně není možná pomocí exaktních metod (zejména lineárního programování), protože k vyjádření míry koordinace se využívají nelineární vztahy a optimalizační metody pro tuto koordinaci jsou heuristické.

2 METODA SÍŤOVÉ KOORDINACE PÁTEŘNÍCH LINEK

V této fázi práce navazuje na bakalářskou práci autora, v jejímž rámci bylo využito autorem navržené interaktivní prokladové schéma vytvořené s podporou MS Excel. Díky interaktivnímu prokladovému schématu bylo možné jednoduše sledovat změny vyvolané posunem odjezdů linek z výchozích zastávek v celé síti. (16)

Diplomovou prací se podstatně rozšíří možnosti využití takového prokladového schématu o vyhledání (sub)optimálních časových poloh spojů páteřních linek podle stanovených omezujících podmínek.

Diplomová práce ve druhé kapitole **navrhuje optimalizační metodu pro síťovou koordinaci páteřních linek**. To se skládá z:

- **formulace optimalizačního modelu,**
- **výběru algoritmu řešení,**
- **matematického popisu modelu sítě linek** (prokladového schématu).

Poté je předvedena aplikace metody na vzorové síti linek a přístup k řešení různých modifikací optimalizačního problému.

Pro použití navrhované metody se předpokládají tyto skutečnosti:

- **Již je zadán požadovaný „optimální“ rozsah dopravy** (počet spojů za období). Model totiž neřeší, zda nabízená kapacita je dostatečná či nikoliv.
- **Linky jsou provozovány v pravidelném intervalu.** To značně zjednodušuje koordinační problém. Pro koordinaci spojů nepravidelných linek slouží jiné metody.
- **Není brán v úvahu vliv zpoždění spojů.** Velikost zpoždění je stochastická a nelze ji přesně určit (liší se např. v jednotlivých dnech). V případě pravidelného zpoždování je třeba zvážit úpravu základní jízdní doby.

2.1 Optimalizační model

Kapitola formuluje optimalizační model, základní a rozšiřující omezující podmínky.

2.1.1 Formulace modelu

Na síti páteřních linek jsou provozovány linky z množiny L . Každá linka má zpravidla dva směry (cesta tam a zpět). Každý směr linky proto bude uvažován jako samostatná linka jedním směrem – např. linka 5 vedená dvěma směry bude rozdělena na dvě linky 5A a 5B. Protože je metoda zaměřena na linky provozované v pravidelném intervalu, je každé lince $l \in L$ přiřazen

linkový interval I_l . Pro každou linku a každý její směr je v rámci uvažovaného koordinačního období c (které začíná vždy v čase $t_o = 0$) dán odjezd prvního spoje této linky v daném směru z výchozí zastávky x_l^p , kde $x \in \langle 0; c \rangle$.

Dále je nutné určit první odjezdy linky z významných zastávek y_l^z celé sítě v rámci koordinačního období. Významnou zastávkou je taková zastávka (uzel), ve které začíná/končí linka nebo zde dochází ke směrovému dělení linek. Mezilehlé zastávky, kde nedochází ke směrovému dělení, není třeba uvažovat, protože z hlediska koordinace linek na úsecích nejsou podstatné. Výběr pouze významných zastávek je i v zájmu racionalizace řešení.

Odjezdy z každé následné významné zastávky dané linky daného směru se získají přičtením jízdní doby $t_l^{p \rightarrow z}$ k prvnímu odjezdu z předchozí významné zastávky y_l^p .

Aby dopočítaný odjezd nebyl větší než hodnota linkového intervalu (nejednalo by se tedy o správnou hodnotu prvního odjezdu v rámci koordinovaného období), je potřeba hodnotu linkového intervalu od součtu $y_l^p + t_l^{p \rightarrow z}$ odečíst tolikrát, kolikrát je hodnota I_l ve „výsledku“ obsažena. Viz vztah (14).

$$y_l^z = (y_l^p + t_l^{p \rightarrow z}) - \left\lfloor \frac{(y_l^p + t_l^{p \rightarrow z})}{I_l} \right\rfloor I_l \quad (14)$$

kde:

y_l^z první odjezd linky daného směru z uvažované významné zastávky [min],

$y_l^z \in \langle 0; c \rangle$,

y_l^p první odjezd linky z předchozí významné zastávky [min],

$t_l^{p \rightarrow z}$ doba jízdy linky z předchozí na uvažovanou významnou zastávku [min],

I_l linkový interval [min].

V případě, že předchozí významná zastávka je výchozí zastávkou, tak platí $y_l^p = x_l^p$. Vzorec (14) po úpravě je vyjádřen vzorcem (15).

$$y_l^{z'} = (x_l^p + t_l^{p \rightarrow z}) - \left\lfloor \frac{(x_l^p + t_l^{p \rightarrow z})}{I_l} \right\rfloor I_l \quad (15)$$

kde:

$y_l^{z'}$ první odjezd linky daného směru z uvažované významné zastávky [min],

$y_l^z \in \langle 0; c \rangle$,

x_l^p odjezd prvního spoje linky v daném směru z výchozí zastávky [min],

$t_l^{p \rightarrow z}$ doba jízdy linky z předchozí na uvažovanou významnou zastávku [min],

I_l linkový interval [min].

Odjezdy následných spojů linky l z významné zastávky jsou dopočítány podle vztahu (16):

$$n_{i_l}^z = y_l^z + i \cdot I_l \quad (16)$$

kde:

$n_{i_l}^z$ i -tý následný odjezd linky l z uvažované významné zastávky [min],

$n_{i_l}^z \in \langle 0; c \rangle$,

y_l^z první odjezd linky l z uvažované významné zastávky [min],

I_l linkový interval [min].

Tímto jsou dopočítány veškeré časové údaje odjezdů (resp. příjezdů) všech linek z významných zastávek. To ovšem pro hodnocení koordinace spojů na společných úsecích nestačí. Dále je potřeba určit společné úseky linek a vypočítat pro tyto úseky hodnoty kritérií nepravidelnosti dopravy. Do tohoto výpočtu jsou zahrnuty časové údaje linek z té zastávky, ze které linky vstupují do společného úseku nebo ze které odjíždějí stejným přepravním směrem („fiktivní“ společný úsek). V případě, že některá linka není v daném úseku pro koordinaci důležitá, je možno ji z hodnocení vypustit.

Jednotlivé úseky a přepravní směry vytvářejí množinu U . Pro samotnou optimalizační metodu není ani tak potřebné znát konkrétní hodnoty rozestupů mezi spoji, ale tyto rozestupy vhodně ohodnotit. Lze se opět inspirovat metodou KOS, kdy je v úvahu brána právě KMN.

Pro každý společný úsek $u \in U$ tedy bude nutné nejdříve vzít všechny odjezdy spojů uvažovaných linek t_i^u vstupujících do úseku u v rámci koordinačního období bez ohledu na linku. Kvadratická míra nepravidelnosti f_q úseku u se pak vypočítá dle vzorce (17):

$$f_{q_u} = \sum_{i=1}^n (t_{i+1}^u - t_i^u)^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_{i+1}^u - t_i^u)}{n} \quad (17)$$

kde:

f_{q_u} kvadratická míra nepravidelnosti úseku u [min^2],

t_i^u i -tý čas vstupu do společného úseku [min],

$(t_{i+1}^u - t_i^u)$... i -tý rozestup mezi spoji [min],

n počet rozestupů mezi všemi spoji uvažovaných linek [-].

Podobně jako u metody KOS je i zde vhodné **každý společný úsek u rozlišit dle důležitosti**, protože každý úsek u může být v rámci sítě jinak vytížen a časová koordinace některých (např. silně vytížených) úseků může mít mnohem větší význam než koordinace linek na méně vytížených úsecích. **Proto se KMN každého úseku násobí vahou g_u** . Ohodnocováním úseků vahami se zabývá kapitola 2.1.3.

Úkol této metody je velmi podobný jako v případě metody KOS, s tím rozdílem, že není třeba určit odjezdy všech jednotlivých spojů, nýbrž stačí **určit všechny první odjezdy linek z výchozích zastávek x_l^v** tak, aby se **minimalizovala** hodnota **účelové funkce** vyobrazující celkovou váženou kvadratickou míru nepravidelnosti v síti. **Účelová funkce** je vyjádřena vztahem (18).

Omezující podmínky tvoří dvě skupiny. **První skupina** základních podmínek je určena podstatou optimalizačního modelu a bude platit obecně v každém optimalizovaném systému. **Druhá skupina** („rozšiřující“) je volena řešitelem konkrétní úlohy a reflektuje omezení vznikající v praxi při individuálním řešení problému (povolené rozmezí odjezdů vybraných linek, přestupní vazby apod.).

Základní podmínky jsou vyjádřeny vztahy (19) a (20). Vztah (19) omezuje hodnotu prvního odjezdu linky l z výchozí zastávky horní hranicí, kterou je hodnota linkového intervalu minus

jedna (protože čas prvního odjezdu může být v 0 minut). Vztah (20) určuje, že hodnota prvního odjezdu linky z výchozí zastávky bude v oboru přirozených nezáporných čísel (včetně nuly).

$$\min f(x_l^v) = \sum_{u \in U} g_u \cdot f_{q_u} \quad (18)$$

za podmínek:

$$x_l^v \leq (I_l - 1) \quad \forall l \in L \quad (19)$$

$$x_l^v \in \mathbb{N}^0 \quad \forall l \in L \quad (20)$$

kde:

x_l^v odjezd prvního spoje této linky v daném směru z výchozí zastávky [min],

g_u váha úseku u [-],

f_{q_u} kvadratická míra nepravidelnosti úseku u [min²] – viz vztah (17),

I_l interval linky l [min].

Touto formulací je **základ metody** určen pro **koordinaci jízdních řádů na úsecích**. Pro **rozšíření metody** je nutno formulovat **rozšiřující omezující podmínky**, které mohou být pro praktické uplatnění důležité. Příklady rozšiřujících podmínek jsou uvedeny v následující podkapitole.

2.1.2 Příklady rozšiřujících omezujících podmínek

V této podkapitole jsou uvedeny příklady rozšiřujících omezujících podmínek, které mohou v praxi při řešení koordinací páteřních linek nastat. Některé z těchto podmínek jsou poté využity při praktickém řešení a některé slouží k nastínění možností uplatnění metody. S využitím rozšiřujících podmínek se metoda stává mnohem variabilnější a je ji možno využít v libovolném systému s periodickými jízdními řády.

Délka doby obratu na konečné

Minimální délka doby obratu na konečné vychází z legislativního rámce. V podmínkách ČR se například v městské hromadné dopravě vychází z *Narižení vlády č. 589/2006 Sb. (17)*, které stanovuje řidičům v MHD bezpečnostní přestávku v délce 30 minut nejpozději po 4 hodinách řízení. Tuto přestávku lze rozdělit i na více částí čerpaných během 4h intervalu, z nichž každá musí mít minimálně 10 minut. Během 4 hodin tedy musí proběhnout minimálně

3 přestávky dlouhé alespoň 10 minut. Maximální délka doby oběhu vozidla, aby bylo možné ve stanoveném časovém intervalu dodržet bezpečnostní přestávky, se zjistí dosazením do vztahu (21):

$$o_{max} = \frac{t_{\check{r}}^{BEZ}}{(t^{BEZ} \div t_{min}^{BEZ})} \quad (21)$$

kde:

o_{max} maximální délka doby oběhu [h],

$t_{\check{r}}^{BEZ}$ čas řízení, po kterém musí být čerpána celá bezp. přestávka [h],

t^{BEZ} celková délka bezpečnostní přestávky [min]

t_{min}^{BEZ} minimální délka bezpečnostní přestávky [min].

Dosazením do vzorce je vypočtena hodnota 1,33 h, což je 1 h 20 min (80 min). Pokud bude celková doba oběhu jednoho vozidla na lince (včetně doby čekání na konečných zastávkách) dané linky dlouhá maximálně 80 minut, lze dělit bezpečnostní přestávku až na 3 části dlouhé alespoň 10 minut.

Na delších linkách je poté nutné zajistit delší doby obratu na konečných zastávkách tak, aby bylo dodrženo čerpání zákonných přestávek.

Umístění bezpečnostních přestávek

V některých provozech MHD není zaveden režim „střídačů“, kdy by mohl být řidič na dobu čerpání zákonné přestávky vystřídán jiným řidičem, kdykoliv je to potřeba. Proto je vhodné v provozech bez „střídačů“ zajistit čerpání přestávek (*bezpečnostních a na jídlo a oddech*) na konečné zastávce, která je vybavena sociálním zařízením pro řidiče. Matematicky to lze vyjádřit vzorcem (22).

$$t_{o_l}^A \vee t_{o_l}^B \geq t_{min}^{BEZ} \quad (22)$$

kde:

$t_{o_l}^A$ doba obratu linky l na první konečné vybavené soc. zařízením [min],

$t_{o_l}^B$ doba obratu linky l na druhé konečné vybavené soc. zařízením [min],

t_{min}^{BEZ} minimální délka bezpečnostní přestávky [min].

Pokud tuto podmínku nelze dodržet, přidá se na linku další vozidlo a doba obratu této linky na požadované konečné bude prodloužena o hodnotu linkového intervalu. Vzroste tak počet náležitostí nasazených na linku a tím i provozní náklady.

Počet vozidel

V praxi je snahou potřebný počet vozidel nasazených na lince minimalizovat z důvodu optimalizace nákladů (finanční a lidské zdroje). Pro následující text platí předpoklad, že vozidla nebudou na konečných zastávkách přejíždět mezi linkami a obsluhovat spoje více linek. Tento postup je vhodný například kvůli stabilitě jízdního řádu, aby se případné zpoždění vznikající na jedné lince nepřenášelo na druhou linku.

Minimální počet nasazených vozidel je ovlivněn jízdní dobou oběma směry linky, minimální dobou obratu na konečných zastávkách linky a linkovým intervalem. Minimální doba obratu zahrnuje přístavnou a odstavnou jízdu, rezervu pro dorovnání zpoždění, případně také zákonné přestávky.

Minimální počet vozidel nasazených na linku lze vyjádřit vztahem (23).

$$n_{v_{min}}^l = \left\lceil \frac{t_j^{A \rightarrow B} + t_{ominl}^B + t_j^{B \rightarrow A} + t_{ominl}^A}{I_l} \right\rceil \quad (23)$$

kde:

$n_{v_{min}}^l$ minimální počet vozidel nasazených na linku l [vozidla],

$t_j^{A \rightarrow B}$ doba jízdy linky l z A do B [min],

t_{ominl}^B minimální doba obratu linky l v B [min],

$t_j^{B \rightarrow A}$ doba jízdy linky l z B do A [min],

t_{ominl}^A minimální doba obratu linky l v A [min],

I_l linkový interval [min].

Podmínka pro minimalizaci počtu vozidel je pak vyjádřena vztahem (24).

$$n_v^l = n_{v_{min}}^l \quad (24)$$

kde:

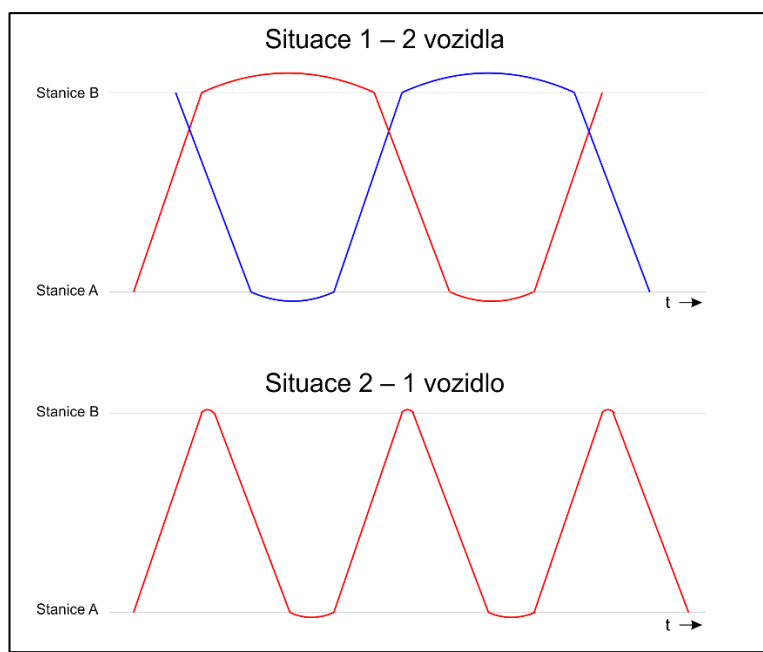
n_v^l počet vozidel nasazených na linku l [vozidla],

$n_{v_{min}}^l$ minimální počet vozidel nasazených na linku l [vozidla].

Obrázek 3 ilustruje dvě situace – první situace znázorňuje odjezd spoje ze zastávky B těsně před příjezdem spoje ze zastávky A (obratové spoje na sebe nenavazují). Následné obratové časy v obou stanicích jsou evidentně delší, než je minimálně požadováno a doba oběhu vozidla je vyšší než minimální. Tato situace si žádá nasazení dvou vozidel.

Ve druhé situaci jsou odjezdy spojů ze stanice B opožděny tak, aby odjížděly chvíli po příjezdu spojů ze stanice A s předpokladem, že je dodržena minimální doba obratu. Tím se dosáhne zkrácení prostoje vozidla během obratu v obou stanicích a je vyžadováno nasazení pouze jednoho vozidla.

V obou situacích je dodržen stejný linkový interval.



Obrázek 3 Ilustrace dvou variant grafikonu s dopadem na počet nasazených vozidel

Zdroj: (Autor)

Toto omezení sice může mít vliv na možnosti koordinace této linky s ostatními linkami, ale ušetřené zdroje z provozního hlediska převýší užitek z „dokonale“ zkoordinovaných jízdnicích řádů.

Přestupní doby

V některých případech mohou být požadovány přestupy mezi spoji některých linek. Pokud jsou obě linky provozovány ve stejném intervalu, lze tyto přestupy definovat v rámci rozšiřujících omezujících podmínek. Omezující podmínky pro přestup vyjadřuje soustava podmínek (25) a (26).

$$t_{přest}^{l1 \rightarrow l2} \leq t_{přest}^{max} \quad (25)$$

$$t_{přest}^{l1 \rightarrow l2} \geq t_{přest}^{min} \quad (26)$$

kde:

$t_{přest}^{l1 \rightarrow l2}$ doba přestupu mezi 1. a 2. linkou vzniklá v řešení [min],

$t_{přest}^{max}$ maximální požadovaná přestupní doba [min],

$t_{přest}^{min}$ minimální požadovaná přestupní doba [min].

Bezkoliznost

Problém kolizí může nastat například u jednokolejných tramvajových tratí, při předjíždění trolejbusů na jednostopých konečných zastávkách (tím vznikající nutnost manipulace se sběrači) nebo při rozdílných jízdních dobách více linek na společném úseku, kde by mohlo dojít k předjíždění spojů daných linek na trati (např. expresní spoje nezastavující ve všech zastávkách).

Příklad omezující podmínky pro zajištění bezkoliznosti na jednokolejně trati vyjadřuje vzorec (27).

$$n_{vmax_c}^u \leq 1 \quad (27)$$

kde:

$n_{vmax_c}^u$ maximální počet vozidel současně jedoucích na úseku u v rámci koordinačního období c [vozidla].

Energetická omezení

Tato omezení mohou vznikat v subsystémech s elektrickou trakcí. Napájení každého úseku elektrickou energií je omezeno parametry měřirny. V některých provozech by mohlo dojít k požadavku na maximální počet vozidel jedoucích zároveň v jednom úseku. Poté by do modelu musel být zahrnut i výpočet maximálního počtu vozidel jedoucích v jednom napájecím úseku v rámci koordinačního období. Omezující podmínka (vzorec (28)) by vypadala následovně:

$$n_{vmax_c}^u \leq q_{max}^u \quad (28)$$

kde:

$n_{vmax_c}^u$ maximální počet vozidel na úseku u v rámci koordinačního období c [vozidla],

q_{max}^u maximální současný přípustný počet vozidel na úseku u [vozidla].

Tato podmínka nebyla v praktické části práce aplikována z důvodu dostatečné kapacity napájecích úseků v řešené síti (viz kap. 3.7.4). V případě, že by bylo potřebné takovouto podmínku v síti řešit, bylo by nutné vytvořit funkci pro výpočet maximálního počtu vozidel na úseku v rámci koordinačního období. To by vypadalo tak, že by algoritmus této funkce prošel vstupy a výstupy vozidel do a z úseku minutu po minutě v rámci období a vypočítal by, kolik se v každé minutě na úseku nachází vozidel. Z toho by pak vybral nejvyšší hodnotu a vrátil jako výsledek. Ten by nesměl překročit nastavený limit.

2.1.3 Ohodnocování úseků vahami

Ohodnocením vahami lze úsekům udělit důležitost a prioritu pro koordinaci linek v rámci celé sítě. K tomuto hodnocení lze přistupovat různými způsoby. Lze vyjít např. z metody KOS, kdy je touto **vahou počet cestujících přepravených v rámci společného úseku**. Ovšem pro zjištění těchto hodnot by bylo zapotřebí provést velmi detailní průzkum přepravní poptávky a stanovit intenzitu přepravních proudů na každém z úseků. V případě, že tato data již existují, je možné z nich vycházet. V takovém případě však může díky kolísající poptávce po přepravě na úsecích během dne vzniknout např. každou hodinu potřeba rozdílné koordinace linek. Proto může být vhodnější požadovat koordinaci na všech úsecích shodně.

Dalším způsobem může být určení váhy každého úseku **dle významnosti úseku**. Hodnota váhy může být od nuly po libovolně velké kladné číslo. Nulovou hodnotou je řečeno, že na koordinaci úseku absolutně nezáleží. To lze aplikovat např. v úsecích, do kterých již linky vstupují zkoordinovány z jiného úseku, nebo v úsecích se specifickou potřebou rozložení spojů v čase (návozy cestujících na určitý časový okamžik). Vyšší vahou (kterou si určí řešitel problému a dále ji může upřesňovat v rámci kalibrace modelu) je dána důležitost každému konkrétnímu úseku. Čím tato hodnota bude vyšší, tím větší pak bude snaha o snížení hodnoty nepravidelnosti na daném úseku. Váha úseků pak může být například nastavena takto:

- 0 pro úseky, na nichž nezáleží na koordinaci linek,
- 1 pro úseky, na nichž záleží na koordinaci linek,
- 2 pro důležitější úseky,
- 3 pro prioritní úseky se snahou o co nejlepší koordinaci (např. centrum – sídliště apod.).

Toto nastavení vah není závazné a záleží pouze na řešiteli problému, jakým způsobem hodnoty vah nastaví. V případě požadavku na (téměř) pravidelné rozestupy mezi všemi spoji na některém z úseků je možné nastavit váhu na libovolně vysokou hodnotu (např. 100), čímž dojde ke snaze o nulovou nepravidelnost na tomto úseku, avšak na úkor jiných úseků s menší vahou.

Váha úseku je vstupem optimalizačního modelu a zároveň kalibračním parametrem.

2.2 Algoritmus řešení

Základní matematický model metody je formulován. Pro řešení je nutno zvolit vhodný algoritmus nebo postup, kterým se dospěje k optimálnímu řešení. Z podstaty výpočtů je jisté, že nelze využít žádnou exaktní metodu – funkce není lineární (lineární programování je vyloučeno) a spojitá taktéž není (časové okamžiky odjezdu spojů jsou diskrétní). **Je třeba zvolit heuristiku.** Například metoda jednotkových posunů jako u KOS by teoreticky mohla připadat v úvahu, ale hrozí, že zlepšení nebude tak patrné a nebude možné prohledávat jiná řešení, ke kterým se pouhým posunutím odjezdů linky z výchozí zastávky o jednu minutu nedospěje.

Další (avšak nereálnou) možností je prohledat veškerá existující řešení. To by znamenalo vytvořit z prvků množin všech možných odjezdů D_l^v linky l v daném směru z výchozí zastávky v veškeré kombinace, které mohou v síti nastat, a z nich poté vybrat optimální řešení. Počet takových kombinací se určí pomocí kombinatorického pravidla součinu a obecně je určen vztahem (29).

$$k = \prod_{l=1}^n |D_l^v| \quad (29)$$

kde:

k počet kombinací [-],

D_l^v množina možných odjezdů linky l z výchozí zastávky v [-].

Proč je tato možnost nereálná, lze demonstrovat na konkrétním příkladu z kapitoly 3.8.1, kde je řešen koordinační problém v síti DPMP. Tabulka 2 udává mohutnost množiny D_l^v pro každou linku l z výchozí zastávky v (linky jsou směrově rozděleny).

Tabulka 2 Počet možných odjezdů všech linek z výchozí zastávky

Linka	1A	1B	2A	2B	3A	3B	5A	5B	6A	6B	7A	7B	8	11A	11B	13A	13B	33A	33B
Výchozí zastávka	JES	SLO	POL	PAR	HLN	BOH	DKT	DUB	OHR	DKN	VOZ	GLO	DUB	GLO	DUB	SLU	DUB	HLN	GLO
$ D_l^v $	30	8	30	4	1	6	9	30	30	3	30	7	30	6	30	6	30	30	7

Zdroj: (Autor)

Všechny linky jsou provozovány v 30min intervalu. V jednom směru je povolena zpravidla libovolná časová poloha odjezdu prvního spoje z výchozí zastávky, ve druhém směru je počet možností odjezdu omezen rozšiřující omezující podmínkou. Počet všech možných kombinací je přibližně $1,8 \cdot 10^{20}$. I kdyby vyřešení jedné možnosti včetně posouzení splnění omezujících podmínek zabralo 1 ms, doba výpočtu všech možností by zabrala asi 5,7 miliard let (stáří vesmíru je odhadováno na přibližně 14 miliard let). Je zřejmé, že většina z těchto možností by navíc nesplňovala omezující podmínky, a tak by velká část výpočetního výkonu proběhla zbytečně.

Dále připadá v úvahu využití EA, který optimální řešení „vyšlechtí“ v řádu minut pouhou změnou hodnot x_l^v s ohledem na omezující podmínky. Proto **jako algoritmus řešení optimalizační úlohy bude zvolen právě EA**, který je mimo jiné i součástí Řešitele MS Excel. Tím je algoritmus relativně snadno dostupný a nabízí se jeho uplatnění v praxi.

2.3 Model sítě linek (prokladové schéma)

Vzhledem k uživatelské přívětivosti a relativní jednoduchosti realizace úloh na počítači (to bylo již ověřeno v autorově bakalářské práci), se softwarová podpora MS Excel pro programování a řešení optimalizační úlohy jeví jako zcela dostačující. V rámci této kapitoly také bude vytvořena a řešena ilustrativní vzorová situace se smyšleným linkovým vedením.

Tvorba optimalizačního modelu by měla probíhat v těchto krocích:

- 1) Selektce linek, které budou do modelu zahrnuty.
- 2) Výběr významných zastávek a úseků pro hodnocení.
- 3) Vytvoření sítě (prokladové schéma).
- 4) Vložení výpočtových vzorců.
- 5) Provedení optimalizace.

Požadavkem je mít celou situaci ohledně odjezdů spojů a jejich koordinace zobrazenou přehledně a zároveň. Proto je uvažováno o schematickém vyobrazení významných zastávek a mezizastávkových úseků. Dalším požadavkem je zobrazení odjezdů všech spojů uvažovaných linek v rámci zkoumaného koordinačního období. Toto lze rozšířit o výpočet obrátového času každé linky na konečné zastávce, dobou přestupu mezi spoji dvou linek (při stejném intervalu těchto linek), celkovým počtem potřebných vozidel atd.

2.3.1 Selektce linek

V každé síti veřejné hromadné dopravy existuje určitý počet linek. Ze všech linek ve zkoumaném systému je potřeba pro metodu selektovat právě ty linky, jež mají pro optimalizaci význam. To budou takové linky, které jsou „páteřní“, nebo které jsou provozovány v pravidelných intervalech (aspoň v určitou část dne). Pokud existuje předpoklad, že by neperiodická linka mohla být v budoucnu zpravidelněna, je lepší ji do schématu také zahrnout pro budoucí využití. Účelové linky, jejichž počet spojů se pohybuje v jednotkách za den, nemá význam do schématu zahrnovat, neboť jejich jízdní řád je zpravidla ovlivněn i jejich podstatou – např. požadovanými příjezdy k objektům, pro jejichž obsluhu jsou tyto linky zavedeny.

2.3.2 Výběr významných zastávek a úseků

Pro schéma je vhodné vybrat pouze významné zastávky, ve kterých linky začínají nebo končí, případně kde dochází ke směrovému rozdělení vybraných linek. Pro tyto zastávky budou počítány odjezdy spojů linek, které v zastávce zastavují. Nemá význam zobrazovat všechny zastávky selektovaných linek, protože by narůstaly nároky na výpočty, příprava prokladového schématu by trvala déle a situace v schématu by byla méně přehledná. Navíc tyto údaje nemají pro funkci metody význam, časovou polohu spojů na ostatních zastávkách lze snadno odvodit z dané jízdní doby.

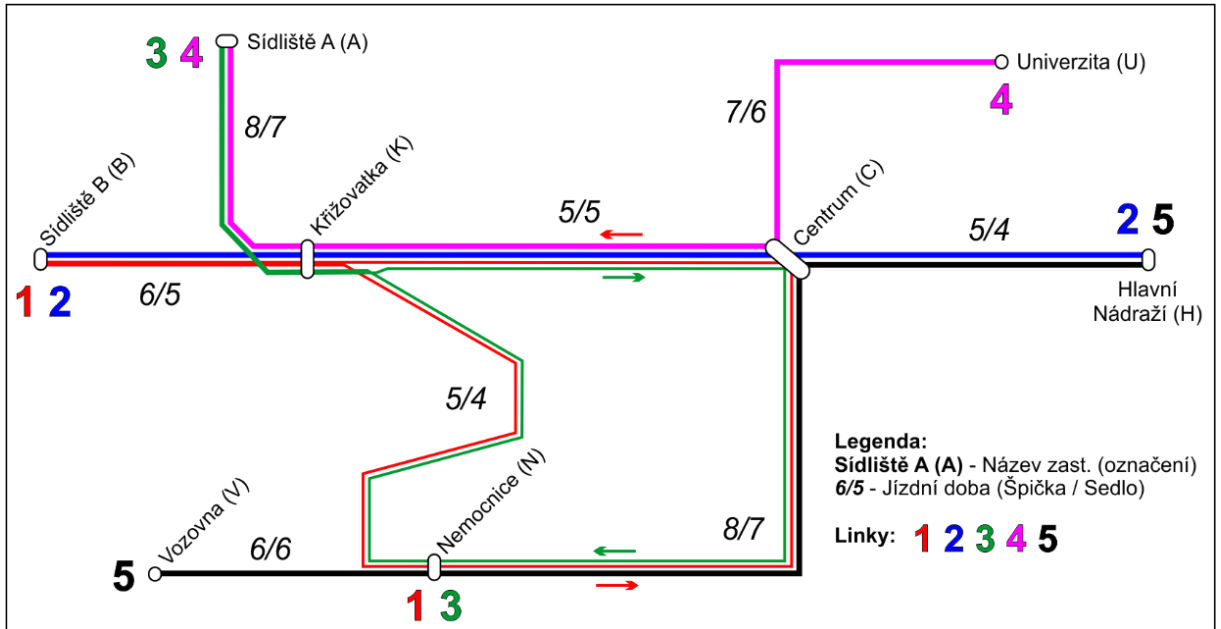
Mezi významnými zastávkami poté vznikají podle trasování linek jednotlivé úseky.

2.3.3 Tvorba sítě (prokladové schéma)

Po selekci zahrnovaných linek, jejich významných zastávek a společných úseků lze začít s tvorbou sítě prokladového schématu. Tu lze vyjádřit jako graf $G = (Z, U)$, kde Z je množina významných zastávek a U je množina úseků mezi těmito zastávkami.

Z důvodu abstraktnosti obecné definice bude demonstrativně uvažována fiktivní síť páteřních linek s významnými zastávkami dle obrázku 4. Celkem je dáno 5 linek (č. 1–5). Byly

také záměrně vytvořeny 2 polokružní linky (linka č. 1 a linka č. 3), které mají určením času odjezdu z výchozí zastávky dán i čas návratu. Tím se předpokládá mírná komplikace při koordinaci takového systému páteřních linek. Zároveň bude umožněno těmto linkám udělit vyrovnávací čas do určené přípustné výše v zastávce *Nemocnice*, jenž dovolí alespoň částečně s časem návratu manipulovat, a tím vylepšit řešení.



Obrázek 4 Schéma fiktivní sítě linek ukázkového modelu.

Zdroj: (Autor)

Celkový přehled jízdních dob linek 1–5 je uveden v tabulce 3. Polookružní linky 1 a 3 byly rozděleny do dvou směrů A (z výchozí zastávky do zastávky *Nemocnice*) a B (ze zast. *Nemocnice* do konečné zastávky). Jízdní doby jsou pevně dány, v modelu lze vybírat pouze, která chronometráž bude uvažována do výpočtu.

Tabulka 3 Jízdní doby linek na fiktivním prokladovém schématu

Linka l	Špička		Sedlo	
	$t_j^{A \rightarrow B} [min]$	$t_j^{B \rightarrow A} [min]$	$t_j^{A \rightarrow B} [min]$	$t_j^{B \rightarrow A} [min]$
1	11	19	9	17
2	16	16	14	14
3	21	13	19	11
4	20	20	18	18
5	19	19	17	17

Zdroj: (Autor)

Tvorba modelu sítě probíhá v prostředí tabulkového procesoru MS Excel, což znamená prostředí, kde v každé buňce probíhá jednotlivý výpočet dle zadaných vzorců.

Pro každou významnou zastávku je zapotřebí vytvořit tabulku s odjezdy linek z této zastávky každým směrem. Počet buněk pro odjezdy každé linky je vhodné volit dle nejkratšího možného zvažovaného intervalu a uvažované délky koordinačního období dle vzorce (30).

$$n_{b_l} \geq \left\lceil \frac{c}{I_{l_{min}}} \right\rceil \quad (30)$$

kde:

n_{b_l} počet buněk pro odjezdy linky l [-],

$I_{l_{min}}$ nejkratší uvažovaný interval linky l [min],

c délka koordinačního období [min].

Pokud bude uvažován pro všechny linky nejkratší možný interval 7,5 minuty, tak při délce koordinačního období 60 minut je zapotřebí mít pro každou linku alespoň 8 buněk s časovými údaji na každé zastávce. Kratší intervaly nebudou pro ukázkové schéma uvažovány z důvodu nárůstu potřebného počtu buněk, ale teoreticky je možné pracovat s intervaly od hodnoty 1 minuta. V reálném systému by bylo vhodné dále zkoumat, do jaké hodnoty linkového intervalu má smysl koordinace linek řešit (s ohledem na vnímání cestujících).

V ukázkovém schématu budou výchozí zastávky podbarveny zeleně, mezilehlé žlutě a konečné červeně.

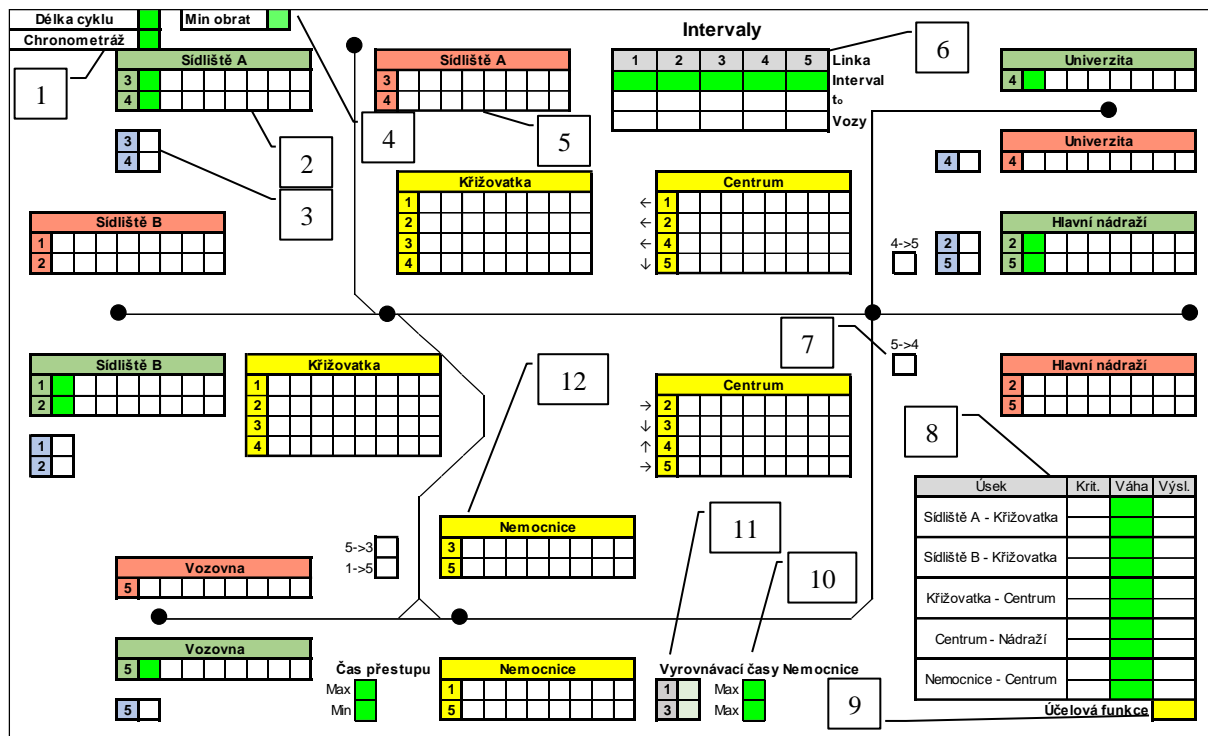
Dále je nutné mít buňky s údaji o linkových intervalech a údaje o ohodnocení úseků a jejich vahách. Podstatnou součástí je vypočtená hodnota účelové funkce v samostatné buňce.

Údaje o chronometráži je vhodné uvést do samostatného listu, na který poté lze odkazovat vzorci.

Pro každou linku lze uvést dobu obratu na konečných zastávkách. Do dalších buněk je možné uvést celkovou dobu obratu linky a počet vozidel nasazených na lince.

V případě hlídání přestupních vazeb je možné vypočítat dobu přestupu mezi vybranými linkami.

Sestavené prokladové schéma před vyplněním výpočtovými vzorci je uvedeno na obrázku 5. **Funkční verze prokladového schématu** v souboru *.xslm s vyplněnými vzorci a přednastaveným optimalizačním modelem pro vyzkoušení **je obsažena v příloze J na CD. Soubor byl vytvořen v Excelu 2016. V jiných verzích softwaru nemusí fungovat správně!**



Legenda: 1 – délka koordinačního období a volba profilu chronometráže; 2 – tabulka odjezdů linky l z výchozí zastávky; 3 – doba obratu linky l na konečné; 4 – minimální doba aspoň jednoho obratu vozidla v rámci jednoho oběhu; 5 – tabulka příjezdů linky l na konečnou zastávku; 6 – tabulka s údaji o linkovém intervalu, dobách oběhu a počtu nasazených vozidel na každé lince; 7 – doba přestupu mezi vybranými linkami; 8 – tabulka hodnot kritérií a vah úseků; 9 – hodnota účelové funkce; 10 – maximální přípustná délka vyrovnávacího času; 11 – vyrovnávací čas linky; 12 – tabulka odjezdů linky l z významné nácestné zastávky

Obrázek 5 Základ prokladového schématu bez vzorců

Zdroj: (Autor)

Světle zelená barva znázorňuje zamýšlené volitelné buňky a tedy vstupy.

Vstupy a výstupy zvýrazněné v následujících výčtech tučně jsou bezpodmínečně nutné pro funkci navržené metody. Ostatní vstupy a výstupy jsou „doplňkové“ pro lepší využití optimalizačního modelu (v navržené fiktivní síti).

Vstupy jsou rozděleny na dvě kategorie: **volitelné konstanty**, které musí podle řešené situace zvolit řešitel problému a **proměnné**, jejichž výsledné hodnoty jsou nalezeny pomocí EA. Výpočetní list není určen pouze pro optimalizaci pomocí EA, ale lze jej využít i pro posouzení libovolné konkrétní varianty řešení.

Volitelné konstanty prokladového schématu jsou:

- **linkové intervaly,**
- **váha jednotlivých úseků,**
- doba délky koordinačního období,
- profil chronometráže,
- minimální doba aspoň jednoho obratu vozidla v rámci jednoho oběhu,
- maximální a minimální doba na přestup,
- maximální dovolený vyrovnávací čas pro polookružní linky u zastávky *Nemocnice*.

Proměnné jsou:

- **odjezdy prvních spojů linek z výchozí zastávky,**
- délka vyrovnávacího času pro polookružní linky u zastávky *Nemocnice*.

Výstupy schématu po doplnění vzorců budou:

- **odjezdy prvních spojů z nácestných a příjezdy prvních spojů do konečných zastávek,**
- **následné odjezdy spojů všech linek ze všech zastávek,**
- **ohodnocení všech úseků kvadratickou mírou nepravidelnosti,**
- **hodnota účelové funkce,**
- rozestupy mezi spoji na úsecích,
- doba obratu linky l na konečné zastávce,
- doba oběhu linky l ,
- minimální počet nasazených vozidel na lince,
- doba přestupu mezi linkami na vybrané zastávce,
- zvolená délka vyrovnávacího času u zastávky *Nemocnice*.

Takto vytvořené prokladové schéma lze v praxi doplnit o další požadované výpočty.

2.3.4 Výpočtové vzorce – MS Excel

Vytvořené prokladové schéma je nutno „naprogramovat“. To se provede vložením výpočtových vzorců. Vzorce jsou tvořeny předdefinovanými funkcemi MS Excel.

Kromě předdefinovaných základních funkcí v Excelu lze vytvořit i funkce vlastní v Microsoft Visual Basic for Applications (VBA). Tyto funkce je vhodné tvořit v případě, kdy by výsledný vzorec obsahoval nespočet dílčích funkcí a stal se tak nepřehledným

a komplikovaným. V tomto případě je vhodné vytvořit funkce zejména pro výpočet hodnotících ukazatelů a zobrazení rozestupů mezi spoji na jednotlivých úsecích. Návod, jak takovou funkci vytvořit, lze najít například ve zdroji (18). Vytvořená funkce je uložena pouze v excelovském sešitu, který však musí podporovat makra (přípona souboru *.xslm). Uložení funkce v souboru *.xslm je zajištěna distribuce kódu vytvořené funkce mezi všemi počítači. V případě ztráty tohoto souboru by bylo nutné funkce vytvořit znova. Pokud by byl vytvářen nový soubor, je třeba kódy funkcí zkopírovat z výchozího souboru, resp. zkopírovat původní soubor.

Další text podkapitoly představuje vzorce použité v modelu sítě. Ty jsou zapsány ve formátu používaném Excelem. Názvy funkcí jsou zvýrazněny tučně, odkazy na buňky jsou zobecněny.

Dále jsou uvedeny funkce naprogramované autorem ve VBA.

První odjezd z významné zastávky

Matematická formulace pro první odjezd z významné zastávky je uvedena v kapitole 2.1.1 ve vzorci (14). Vzorec pro Excel (31) dopočítá první odjezd z významné zastávky v závislosti na prvním odjezdu z předchozí zastávky. Pokud by buňka s předchozím odjezdem byla prázdná, vrátí také prázdnou hodnotu.

Vzorec přičte k odjezdu z předchozí zastávky hodnotu jízdní doby. Pro případ, že by hodnota „výsledku“ byla větší než linkový interval, je podílem „výsledku“ a linkového intervalu zjištěno, kolikrát je hodnota linkového intervalu obsažena ve „výsledku“ a případně je příslušný násobek linkového intervalu od „výsledku“ odečten, čímž je dosaženo požadované hodnoty prvního odjezdu dané linky z významné zastávky.

$$=KDYŽ(y_l^p="" ; "" ; (y_l^p + t_l^{p \rightarrow z}) - (\text{ROUNDDOWN}(((y_l^p + t_l^{p \rightarrow z}) / I_l); 0)) * I_l) \quad (31)$$

Následný odjezd

Vzorec (32) pro výpočet následného odjezdu linky l z významné zastávky je navázán na již vypočítaný odjezd předchozího spoje. V případě, že předchozí odjezd je prázdná hodnota, vrátí prázdnou hodnotu. Pokud by hodnota buňky ve výsledku dosáhla shodné nebo vyšší hodnoty, než je uvažované koordinační období c , buňka bude vracet prázdnou hodnotu.

$$=\text{KDYŽ}(\text{předch_odj}="" ; "" ; \text{KDYŽ}((\text{předch_odj}+I_l \geq c) ; "" ; \text{předch_odj}+I_l)) \quad (32)$$

Rozestupy mezi spoji

Vytvořit vzorec pomocí funkcí Excelu, který by znázornil rozestupy mezi jednotlivými spoji všech linek na posuzovaných úsecích ve formátu XX-XX-XX, by sice bylo možné, ale takový vzorec by byl velmi obsáhlý a složitý. V tomto případě je vhodné naprogramovat vlastní funkci ve VBA. Autorovo provedení funkce je uvedeno na obrázku 6.

```
Function rozestupy(spoje, pom)
Dim i As Integer, c As Double, d As Double, q As String, r As String

For i = 1 To Application.WorksheetFunction.Count(spoje) - 1

    c = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Small(spoje, i + 1), 0)
    d = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Small(spoje, i), 0)
    q = Str(c - d)
    r = r + q + "-"
Next i

c = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Min(pom), 0)
d = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Max(spoje), 0)
q = Str(c - d)
r = r + q
rozestupy = Replace(r, " ", "")

End Function
```

Obrázek 6 Zdrojový kód funkce „rozestupy“ pro rozestupy mezi spoji

Zdroj: (Autor)

Funkce není nijak složitá, ve VBA zabere pouze 14 řádků. Na funkci se potom lze odvolat přímo z buňky jako na jakoukoliv jinou funkci Excelu. Rozestupy mezi spoji z vybrané oblasti buněk se pak vypočítají zadáním vzorce (33).

$$=\text{rozestupy}(\text{Oblast_buněk}) \quad (33)$$

Výpočet KMN

Podobně jako pro rozestupy mezi spoji je vhodné naprogramovat vlastní funkci ve VBA i pro výpočet kvadratické míry nepravidelnosti. Provedení funkce autorem je uveden na obrázku 7.

```

Function kvadr_mira(spoje, pom)
Dim i As Integer, c As Double, d As Double, q As Double, r As Double

For i = 1 To Application.WorksheetFunction.Count(spoje) - 1

    c = Application.WorksheetFunction.Round((Application.WorksheetFunction.Small(spoje, i + 1)), 0)
    d = Application.WorksheetFunction.Round((Application.WorksheetFunction.Small(spoje, i)), 0)
    q = q + (c - d) ^ 2
    r = r + (c - d)
Next i

c = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Min(pom), 0)
d = Application.WorksheetFunction.Round(Application.WorksheetFunction.Max(spoje), 0)
q = q + (c - d) ^ 2
r = r + (c - d)

kvadr_mira = Application.WorksheetFunction.Round((q - (r * r) / Application.WorksheetFunction.Count(spoje)), 0)
End Function

```

Obrázek 7 Zdrojový kód funkce „kvadr_mira“ pro kvadratickou míru nepravidelnosti

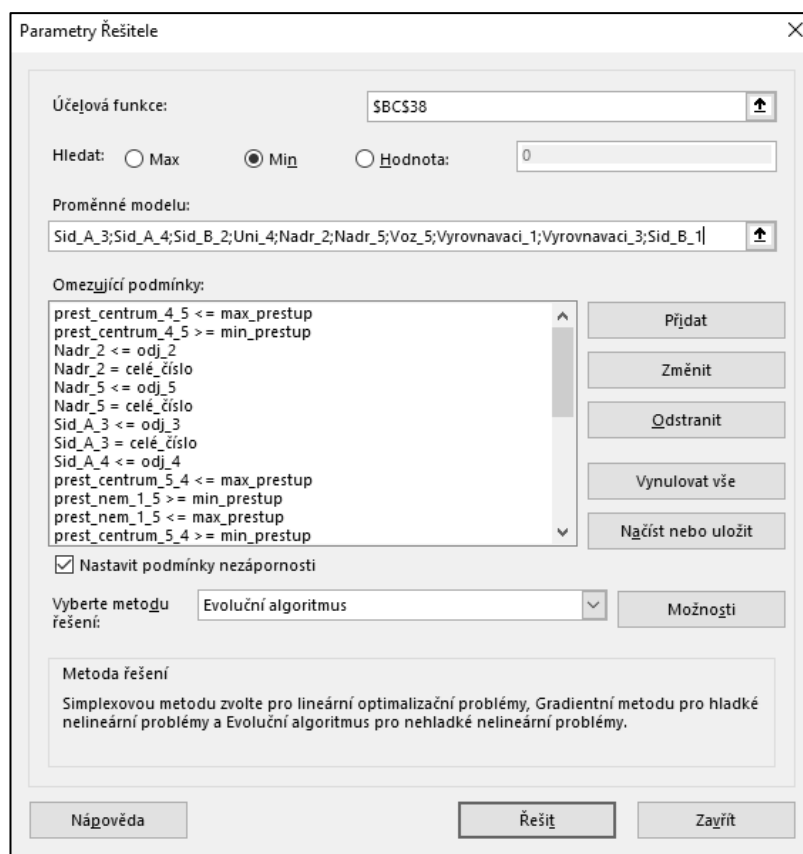
Zdroj: (Autor)

Výpočet v buňce se provede vložením vzorce (34).

$$=rozestupy(Oblast_buněk) \quad (34)$$

2.4 Formulace modelu v MS Excel

Tato kapitola uvádí postup nastavení optimalizačního modelu v Řešiteli pro optimalizaci. V prvním kroku je nutné nejdříve nastavit Řešitele pro řešení optimalizačního problému. Obrázek 8 představuje parametry v okně „Parametry řešitele“ nastavené pro řešení optimalizační úlohy na vzorovém prokladovém schématu.



Obrázek 8 Okno „Parametry Řešitele“

Zdroj: (MS Excel, autor)

V tomto okně je potřeba nastavit buňku s účelovou funkcí, určit hledaný výsledek (maximální, minimální, nebo konkrétní hodnota), označit veškeré proměnné buňky, nastavit omezující podmínky a zvolit metodu řešení.

2.4.1 Proměnné modelu

Do proměnných modelu je potřeba zadat veškeré buňky, které budou měněny řešitelem. Z formulace matematického modelu vyplývá, že to budou buňky obsahující první odjezd linky z výchozí zastávky. V případě, že je tento odjezd dopočítán přičtením doby obratu (nebo vyrovnávacího času) k času příjezdu spoje do konečné zastávky, je potřebné do proměnných modelu přidat buňky obsahující dobu obratu nebo vyrovnávací čas. Ve vzorovém prokladovém schématu je použito 10 proměnných buněk.

2.4.2 Omezující podmínky modelu

Dále je nutné nastavit základní a rozšiřující omezující podmínky. To se provede kliknutím na tlačítko „Přidat“ a formulací podmínky. Výčet omezujících podmínek použitých ve vzorovém řešení je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4 Nastavení omezujících podmínek pro vzorový model

Č.	Formulace podmínky v modelu	Komentář
1	$Nadr_2 \leq odj_2$	Nastavení horní meze pro první odjezd linky z výchozí zastávky ($odj_LINKA = I_l - 1$). Spodní mez nastavena zaškrtnutím políčka „nastavit podmínky nezápornosti“. Ke každé podmínce je doplněna podmínka o celočíselnosti ve formátu BUŇKA=CELÁ.ČÁST(BUŇKA)
2	$Nadr_5 \leq odj_5$	
3	$Sid_A_3 \leq odj_3$	
4	$Sid_A_4 \leq odj_4$	
5	$Sid_B_1 \leq odj_1$	
6	$Sid_B_2 \leq odj_2$	
7	$Uni_4 \leq odj_4$	
8	$Voz_5 \leq odj_5$	
9	$Vyrovnavaci_1 \leq max_vyrov_1$	Nastavení maximálního vyrovnávacího času pro linky 1 a 3 v zastávce <i>Nemocnice</i>
10	$Vyrovnavaci_3 \leq max_vyrov_3$	
11	$prest_centrum_4_5 \leq max_prestup$	Nastavení horní a dolní meze pro přestup z linky 4 na linku 5 (<i>Centrum</i>)
12	$prest_centrum_4_5 \geq min_prestup$	
13	$prest_centrum_5_4 \leq max_prestup$	Nastavení horní a dolní meze pro přestup z linky 5 na linku 4 (<i>Centrum</i>)
14	$prest_centrum_5_4 \geq min_prestup$	
15	$prest_nem_1_5 \leq max_prestup$	Nastavení horní a dolní meze pro přestup z linky 1 na linku 5 (<i>Nemocnice</i>)
16	$prest_nem_1_5 \geq min_prestup$	
17	$prest_nem_5_3 \leq max_prestup$	Nastavení horní a dolní meze pro přestup z linky 5 na linku 3 (<i>Nemocnice</i>)
18	$prest_nem_5_3 \geq min_prestup$	
19	$pocet_vozu_linka \leq max_pocet$	Počet vozů nasazených na linku l bude menší nebo roven stanovené hodnotě.

Zdroj: (Autor)

Pro zjednodušení je vhodnější pravou stranu podmínky definovat jako odkaz na buňku s konkrétní hodnotu než zadávat konkrétní hodnotu do podmínky. To umožní jednodušeji modifikovat model např. pro jiné období dne, kdy jsou linky provozovány v odlišných intervalech.

2.4.3 Další nastavení

Z dalšího nastavení pro řešení koordinačního problému je důležité se zaměřit na čas běhu EA. Nastavení tohoto se provede v „Možnostech“ u metody řešení v okně „Parametry Řešitele“. Evoluční algoritmus je ukončen, pokud Řešitel nenalezne lepší řešení během nastavené doby. V základním nastavení je tato hodnota nastavena na 30 s, ovšem je vhodnější, zvláště u složitějších sítí, tento čas nastavit na větší hodnotu. Pro příklady optimalizace na fiktivní síti bude dostačujících 90 s, pro řešení sítě DPMP byly použity hodnoty 120 s a více. To umožní Řešiteli prohledat více řešení a zvýšit šanci na přiblížení se optimálnímu řešení.

Dále lze nastavit následující parametry, které při řešení optimalizací byly ponechány ve výchozím nastavení (údaj v závorkách): konvergence (0,0001), frekvence mutací (0,075), velikost základního souboru (100) a náhodné číslo (0).

S tímto nastavením modelu budou zpracovávány veškeré optimalizační příklady v následující kapitole.

2.5 Provedení optimalizace

Na vytvořeném vzorovém modelu fiktivní sítě páteřních linek jsou v této kapitole provedeny ilustrační optimalizace a její modifikace pomocí navrženého matematického modelu. První případ představuje základní variantu metody bez rozšiřujících omezujících podmínek a bez rozlišení důležitosti úseků vahami. Další případy pak tuto základní variantu modifikují a ukazují rozšířené možnosti optimalizace, čímž se stává metoda lépe využitelná pro praxi. Snahou je brát ohled i na technologické hledisko konstrukce jízdních řádů.

Jako modifikace základního optimalizačního modelu pro vylepšení koordinace linek na důležitých úsecích bude ukázáno využití vah úseků a využití vyrovnávacího času v zastávkách. Dále budou ilustrovány modifikace se zohledněním přestupních vazeb a minimalizací počtu vozidel.

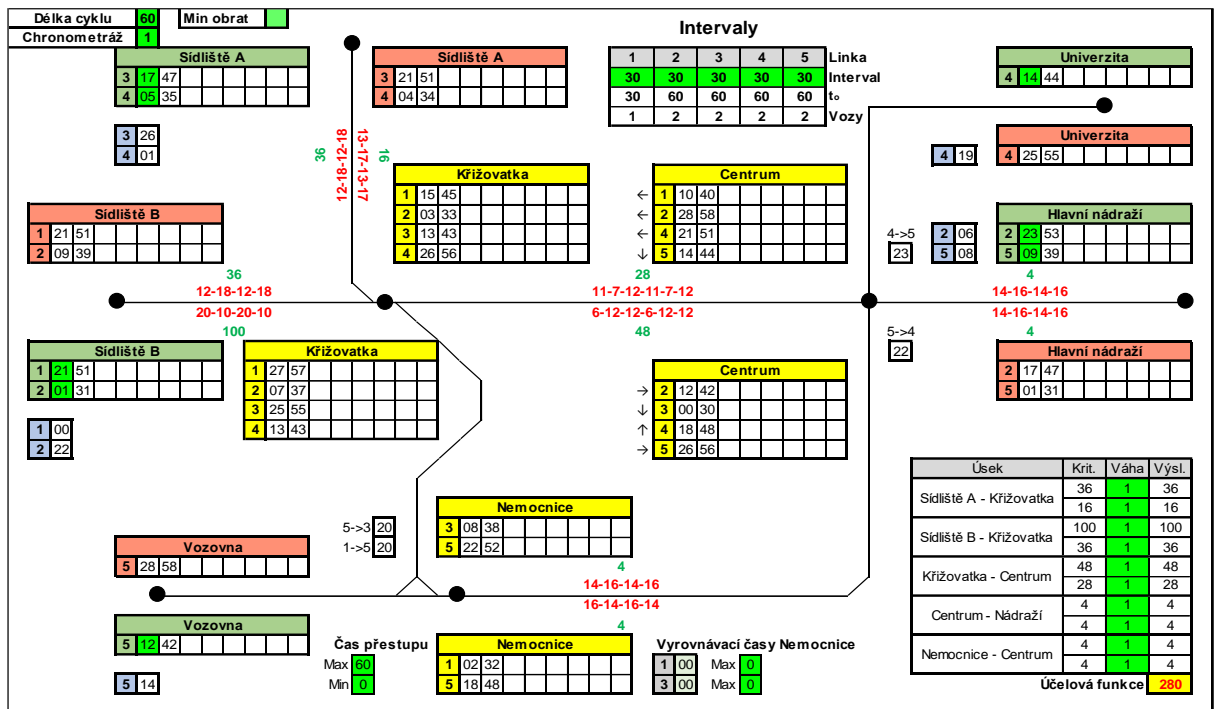
Tyto **modifikace optimalizačního modelu lze** při řešení reálné úlohy mezi sebou **libovolně kombinovat** podle potřeby (například řešení s využitím přestupních dob a zároveň s omezením počtu vozidel) a také lze vytvářet modifikace dle vlastních specifických požadavků. **Tím se značně zvyšuje variabilita navržené metody.**

2.5.1 Základní optimalizace

Nyní je ukázána základní „prostá“ optimalizace. Pro všechny linky byl zvolen společný interval 30 min. Veškeré společné úseky byly ohodnoceny shodně vahou 1. U polookružních linek nebylo dovoleno využít vyrovnávací čas. Doby přestupu a počty nasazených vozidel nebyly zohledněny. Výsledek (na obrázku 9) je tedy ovlivněn pouze snahou o minimalizaci účelové funkce.

Pro nastavení optimalizačního modelu v řešiteli bude nutné použít **podmínky č. 1–8** z tabulky 4.

Cílem je koordinovat co „nejideálněji“ páteřní linky v rámci celé sítě. Jako základní hledisko pro toto hodnocení koordinace linek slouží hodnota rozestupů mezi spoji. Za naprosto ideální se považuje případ, kdy jsou rozestupy mezi spoji na daném úseku stejně velké.



Obrázek 9 Výsledek prosté optimalizace

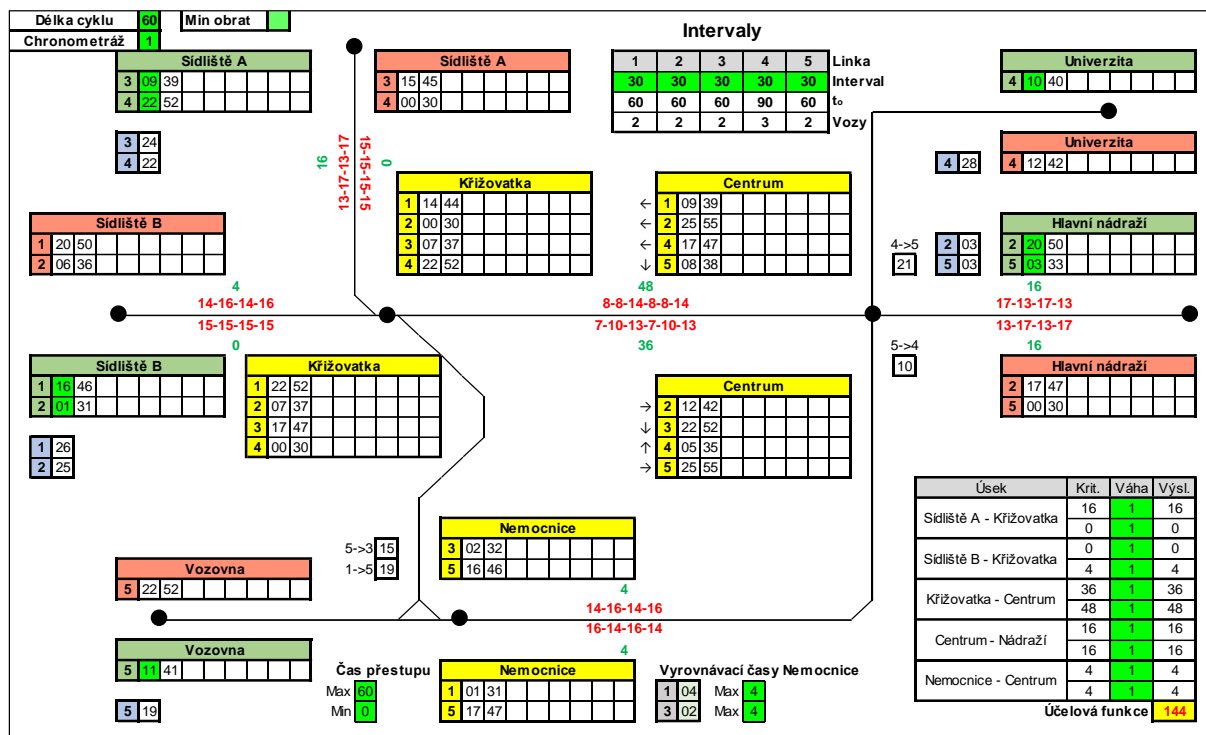
Zdroj: (Autor)

Dosažený výsledek není příliš ideální převážně na větvích vedoucích k sídlištím A a B. Pokud by byl požadavek na pravidelnější provoz v těchto úsecích, je třeba optimalizační model modifikovat.

2.5.2 Vyrovnávací čas

U spojů polookružních linek je časem odjezdu z výchozí zastávky určen i čas návratu do téže zastávky. To znamená, že bude u takovýchto spojů hledán v obou směrech kompromis v případě koordinace se spoji jiných linek. Umožněním zdržení spoje v některé ze zastávek na trase (např. zastávka nejvíce vzdálená od výchozí zastávky), lze spojem časově manipulovat i ve směru při návratu do výchozí stanice a tím může dojít k lepší koordinaci s ostatními linkami na některém z úseků. Toto může být aplikováno i u ostatních typů linek např. v zastávkách s výraznou výměnou cestujících. Udělení vyrovnávacího času linkám v zastávkách poté může umožnit vylepšení koordinace s jinými linkami na některých společných úsecích.

Modifikace oproti základní variantě spočívá v tom, že je umožněno vyrovnávacím časem „zdržet“ spoje polookružních linek 1 a 3 v zastávce Nemocnice, a to až o 4 minuty (vzhledem k dlouhým linkovým intervalům je volen poměrně dlouhý prostoje v zastávce). To si vyžádá kromě podmínek č. 1–8 i zahrnutí rozšiřujících podmínek 9 a 10 (dle tabulky 4). Výsledek lze vidět na obrázku 10.



Obrázek 10 Výsledek optimalizace s využitím vyrovnávacího času

Zdroj: (Autor)

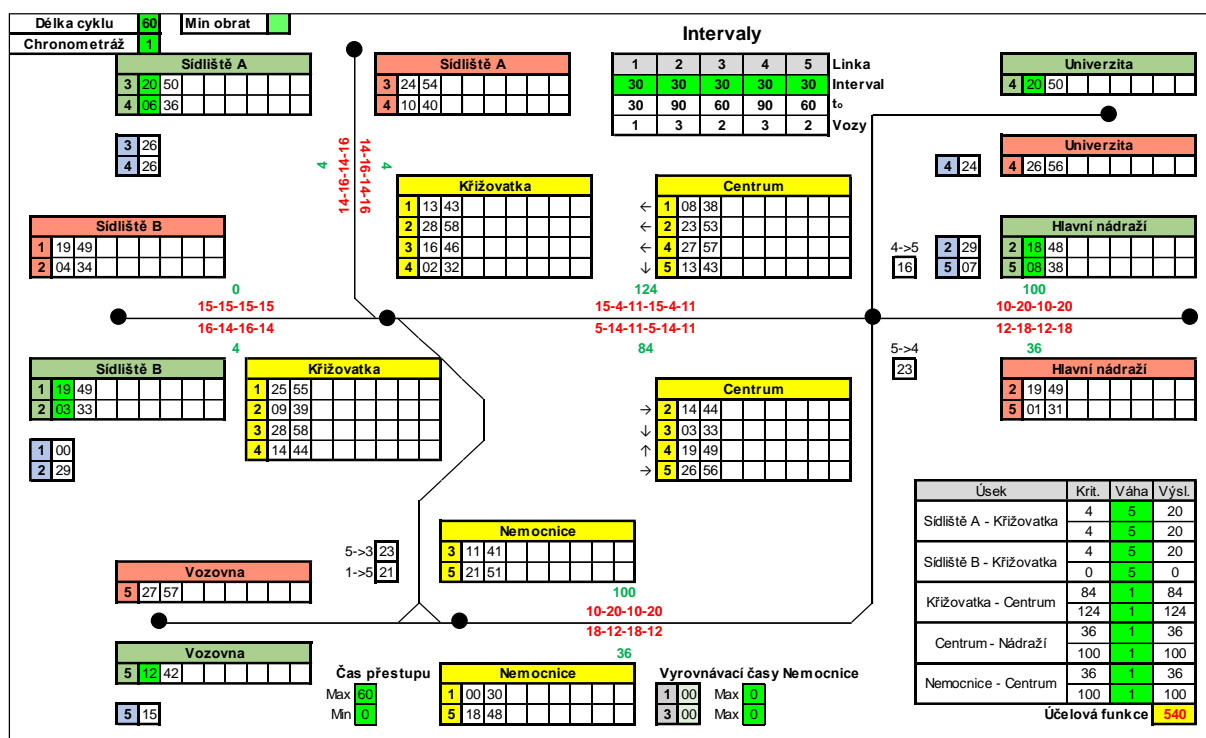
Lze si všimnout, že využitím vyrovnávacího času pro linky 1 a 3 (4, resp. 2 minuty) byla významně zlepšena hodnota účelové funkce (z hodnoty 280 min² na hodnotu 144 min²). Z technologického hlediska je možné dopravním podnikům doporučit využití vyrovnávacích časů u polookružních linek jako nástroje ke zlepšování koordinace páteřních linek a eliminace případného zpoždění.

2.5.3 Váhy úseků

Další varianta modifikace základní optimalizace ukazuje, jak lze ovlivnit koordinaci linek na úsecích udělením rozdílné váhy každému úseku. Vyšší váha bude udělena úsekům směřujícím na obě sídliště. Vyrovnávací čas u Nemocnice nebude povolen. Účelem je izolovaně demonstrovat, jak se změní řešení pouze změnou hodnot vah úseků. Do modelu jsou zahrnuty podmínky č. 1–8.

Pro ukázkou bude u vybraných úseků zvolena hodnota váhy 5. Takto lze očekávat tendenci modelu o co nejpravidelnější rozestupy a tím o co největší minimalizaci hodnoty účelové funkce. Pokud by na sledovaných úsecích byl požadován absolutně pravidelný úsekový interval, lze váhy nastavit přísněji. Ohodnocováním úseků vahami se zabývá kapitola 2.1.3.

Výsledek příkladu s využitím vah úseků je uveden na obrázku 11.



Obrázek 11 Výsledek optimalizace s využitím vah úseků

Zdroj: (Autor)

Rozestupy mezi spoji na všech úsecích s vahou 5 (15-15 a 14-16) lze považovat za naprosto vyhovující. Méně kvalitní řešení (10-20 a 12-18) bylo přesunuto do jiných úseků sítě (oproti příkladu 1) s nižší vahou. To vede k závěru, že pro co nejkvalitnější síťové řešení je důležité správně ohodnotit všechny úseky jejich vahou.

2.5.4 Přestupy

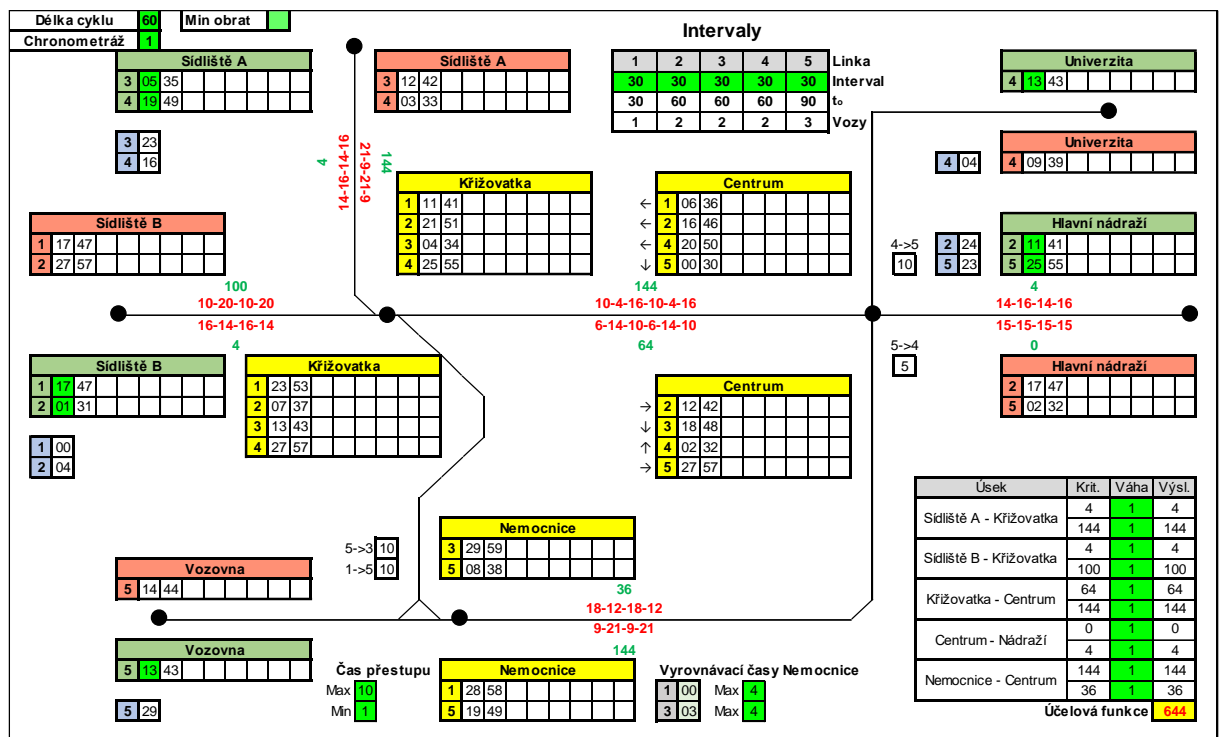
V kapitole 1 je zjištěno, že existující optimalizační metody neumožňují časově koordinovat linky zároveň na úsecích a v uzlech. **Touto modifikací optimalizačního modelu je umožněno v navržené metodě zohlednit v řešení i přestupní vazby.** Základním předpokladem je shodný interval mezi přestupními linkami.

Za předpokladu, že nabídka spojení není tak intenzivní (což u intervalu 30 min není), by mohl existovat požadavek na zajištění přestupních vazeb v některých směrech. Přístup k zajišťování přestupů se může lišit dle situace. Pokud je potřeba zajistit přestup z jednoho spoje na druhý, je vhodnější, pokud první spoj přijede do přestupní zastávky dříve. Pokud je potřeba zajistit přestup mezi oběma spoji, pak je důležité, aby spoje v zastávce po určitý čas stacionovaly společně, případně aby měly odjezd ve stejnou minutu. Zde je také potřeba zvážit rozmístění stanovišť, mezi kterými se přestupuje, a případně přestupní dobu zahrnout do délky staničení, aby bylo možné přestup uskutečnit. V reálných dopravních systémech lze pak požadavek

na umožnění přestupu zaznamenat do vozového jízdního řádu (MHD), avšak v modelech je nutné s dostatečnou dobou pro přestup počítat.

V demonstračním prokladovém schématu jsou sledovány přestupní vazby na zastávce *Centrum* mezi linkami 4 a 5 v obou směrech a na zastávce *Nemocnice* jsou to vazby z linky č.1 na linku č. 5 k *Vozovně* a z linky č. 5 na linku č. 3 směrem na *Křižovatku*.

V této modifikaci základní varianty je ilustrováno nastavení minimální doby přestupu na 1 min (není vyžadováno společné stání vozidel v zastávce, ale je vyžadována rezerva pro případ zpoždění spoje, ze kterého se přestupuje) a dále nastavení maximální doby přestupu na 10 min. Vyrovnávací časy pro polookružní linky v zastávce *Nemocnice* jsou povoleny opět v délce max. 4 minuty. Váhy úseků jsou nastaveny na společnou hodnotu 1. K základním podmínkám č. 1–8 budou připojeny i rozšiřující podmínky č. 9 a 10 (vyrovnávací časy) a podmínky č. 11–18 (přestupy) – viz tabulka 4. Výsledné řešení je uvedeno na obrázku 12.



Obrázek 12 Výsledek optimalizace s důrazem na přestupy

Zdroj: (Autor)

Sledované doby přestupů jsou navrženy v požadovaném rozmezí. Kvalita řešení koordinace páteřních linek je již oproti předchozím příkladům poměrně horší (účelová funkce 644 min²). Z toho lze vyvodit, že zpřísnováním podmínek souvisejících s časovými polohami spojů může docházet k nalézání horšího řešení (z hlediska účelové funkce).

2.5.5 Minimalizace počtu vozidel

V poslední modifikaci základní varianty existuje požadavek na efektivní využití vozidlového parku. Zároveň je potřeba z technologických důvodů zajistit minimální dobu obratu alespoň na jedné konečné zastávce v délce alespoň 15 minut. Společný linkový interval je 30 minut. Pro zjednodušení příkladu budou do minimálních dob obrátů uvažovány pouze zákonné přestávky na jídlo a oddech, a sice 15 minut na alespoň jedné konečné (možné dělení přestávky na více částí, z nichž jedna musí mít alespoň 15 min). (17)

Přistavná a odstavná jízda nebudou zohledněny (doba obratu 0 minut).

Minimální potřebný počet vozidel nasazených na jednotlivé linky v ilustrativním příkladu při intervalu 30 min a dané chronometráži dle vzorce (23) určuje tabulka 5.

Tabulka 5 Minimální potřebné počty vozidel nasazených na linky

Linka l	$t_j^{A \rightarrow B}_l$ [min]	$t_j^{B \rightarrow A}_l$ [min]	t_{ominl}^A [min]	t_{ominl}^B [min]	o_{min} [min]	I_l [min]	n_{minl}^v [vozidla]
1	11	19	15	0–4	45–49	30	2
2	16	16	15	0	47	30	2
3	21	13	15	0–4	49–53	30	2
4	20	20	15	0	55	30	2
5	19	19	15	0	53	30	2

Zdroj: (Autor)

Hrozí, že Řešitel nalezne řešení, které by z hlediska sledovaného kritéria KMN bylo optimální, avšak z oběhového hlediska by pro zajištění takového rozsahu dopravy bylo potřebné nasadit větší množství vozidel a řidičů. Důkazem jsou předchozí výsledky z podkapitol 2.5.1 – 2.5.4, kde počet vozidel nasazených na linky dosahuje i hodnoty 3 vozidla, což je více vozidel, než je vypočteno v tabulce 5.

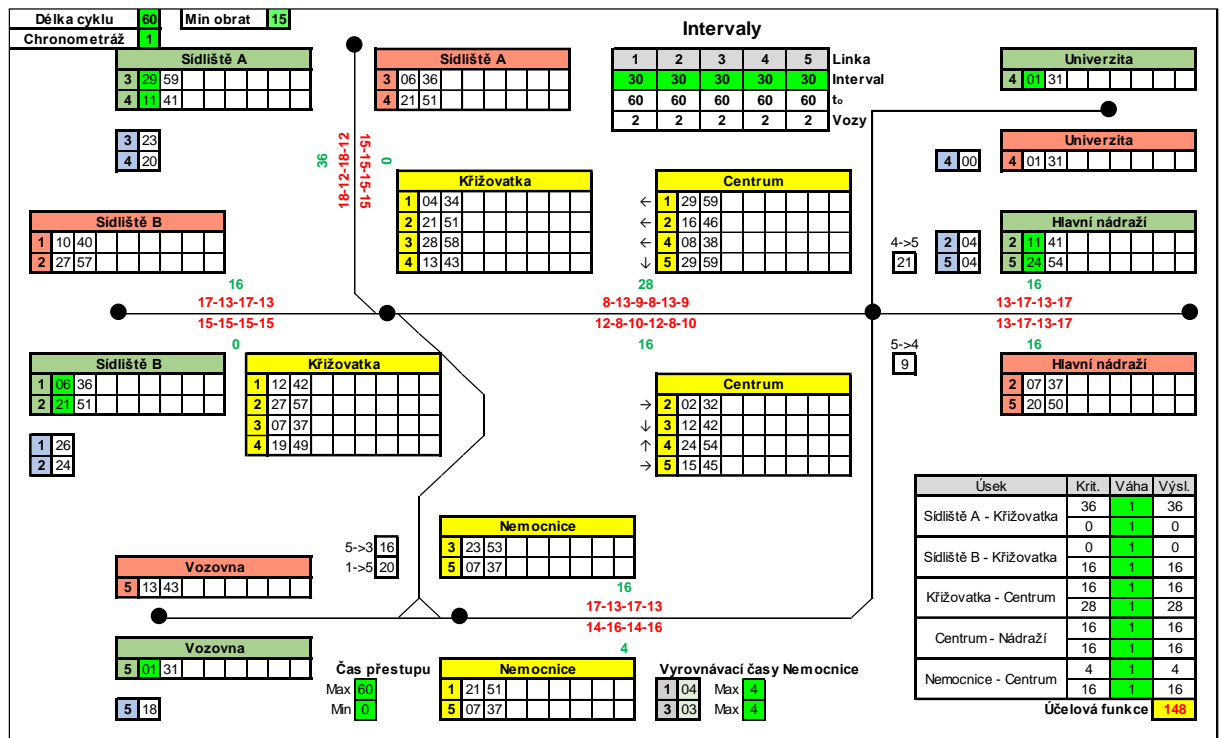
Nyní bude vyplněna buňka „minimální obrat“. Pokud nebude dodržen minimální obrat linky na aspoň jedné konečné zastávce požadovaných 15 minut, bude na linku nasazeno další vozidlo navíc (přičtením hodnoty 1 k počtu potřebných vozidel).

Návaznost spojů jedné linky mezi dvěma směry je kontrolována podmínkou na počet vozidel nasazených na lince. Pokud by spoje nenavazovaly a vznikaly zbytečné prostoje, bude automaticky nasazeno vozidlo navíc a takové řešení nebude povoleno.

Nasazení minimálního počtu vozidel a zároveň dodržení požadovaných obrátových časů, bude docíleno tak, že bude nastaven požadovaný počet vozidel jako podmínka Řešiteli (**podmínka č. 19** dle tabulky 4). U linek č. 1 a 3 není potřebné nastavovat žádná omezení díky polookružnímu charakteru. U ostatních linek bude nastavena podmínka, že počet nasazených vozidel nesmí přesáhnout hodnotu 2. Výsledné řešení by tedy mělo být koncipováno na minimální možný počet nasazených vozidel.

Pro zjednodušení nejsou uvažována omezení pro přestupy. Vyrovnávací čas pro polookružní linky je vzhledem k delšímu intervalu nastaven maximálně na 4 minuty. Váhy úseků jsou stejné, požaduje se co nejrovnoměrnější rozložení spojů v celé síti.

Výsledek optimalizace ukazuje obrázek 13.



Obrázek 13 Výsledek optimalizace s minimalizací počtu nasazených vozidel

Navržené ukázkové řešení má v rámci nastavených linkových intervalů optimální počet nasazených vozidel (za předpokladu, že vozidla nemění linky). Při porovnání s variantou z podkapitoly 2.5.2, která má shodné nastavení optimalizačního modelu mimo podmínky na počty vozidel, je vidět, že hodnota účelové funkce je horší pouze o 4 min², což je zanedbatelné zhoršení. Zanedbatelné již není ušetření jednoho nasazeného vozidla na lince 4.

2.6 Komentář k ilustračnímu řešení

Na předchozích ukázkách je ukázáno několik základních možností, jak lze přistupovat k optimalizaci koordinace páteřních linek v MS Excel pomocí navržené metody. Jednotlivé varianty byly řešeny izolovaně, aby bylo možno posoudit vliv modifikace řešení na celkový výsledek. V případě potřeby lze tyto varianty mezi sebou kombinovat.

V tabulce 6 je uveden stručný přehled výsledků jednotlivých variant.

Tabulka 6 Přehled výsledků řešených příkladů

Č.	Název varianty řešení	Doba řešení [s]	Počet dílčích problémů	Účelová fce [min ²]
1	Prostá optimalizace	160,266	18 318	280
2	Vyrovňovací čas	114,172	15 765	144
3	Váhy úseků	105,750	11 909	492
4	Přestupy	139,719	12 298	644
5	Minimalizace počtu vozidel	112,469	12 032	148

Zdroj: (Autor)

Výsledky dosažené navrženou metodou na fiktivní síti lze považovat za překvapivě uspokojivé. Doba řešení každého příkladu se pohybovala přibližně v rozmezí 2–3 minut. Pokud se odečte maximální doba bez vylepšení, která činila 90 s, tak výsledné a optimální řešení bylo nalezeno během první minuty řešení. V případě ruční koordinace by řešitel problému mohl přijatelné řešení hledat mnohem delší dobu a lze se domnívat, že by nedosáhl takového výsledku jako EA. Možnost projít všechna možná řešení a vybrat z nich to nejlepší nepřipadá z důvodu velké časové náročnosti v úvahu.

Lze sledovat, že počet vyřešených dílčích problémů a čas řešení úlohy nejsou přímo úměrné. Toto lze zdůvodnit rozdílnou složitostí formulace matematického modelu v Řešiteli. Také lze očekávat, že čas řešení i počet dílčích problémů bude růst se složitostí řešené úlohy.

V následující kapitole je navržená metoda aplikována na reálný dopravní systém, a sice v Dopravním podniku města Pardubic a.s. (DPMP).

3 APLIKACE V REÁLNÉM SYSTÉMU

Pro první aplikaci navrhované metody v praxi se naskytla příležitost u Dopravního podniku města Pardubic a. s. (DPMP) během letních prázdnin 2017. Optimalizace se týkala několika období, a sice:

- víkend 8–19 hodin,
- víkend 6–8 hodin (navazuje na 8–19 hodin),
- víkend 21–23 hodin,
- pracovní den, prázdniny 8–13 hodin.

Víkendové úsporné opatření během letních prázdnin roku 2017, kdy byl na páteřních linkách zaváděn jednotný interval 30 minut po celý den, bylo citelným zásahem do rozsahu dopravy. Se změnou intervalů některých linek musely být přirozeně upraveny i jejich vzájemné časové polohy. Z toho důvodu byl dán odpovědnými pracovníky DPMP prostor pro vyzkoušení funkčnosti navrženého matematického modelu. Na to také navazovala koordinace ranních a večerních víkendových jízdnicích řádů.

Při té příležitosti také proběhl pokus o zlepšení koordinací páteřních linek během pracovního dne o letních prázdninách, kde rozsah dopravy zůstal stejný, ale existoval potenciál pro zlepšení prokladů.

Tato kapitola je věnována samotné implementaci teoretické části modelu na reálný systém a představení dosažených výsledků u všech 4 optimalizovaných období.

3.1 Vytipování problému

Důvody, které vedly k myšlence, že v koordinaci páteřních linek existuje (resp. by mohl při tvorbě nových koordinací existovat) v oblasti jízdnicích řádů DPMP problém, byly evidentní. Nezřídka se stávalo, že spoje některých páteřních linek jedoucích stejným směrem, odjížděly ze zastávek doslova zároveň, případně v krátkých časových rozestupech, a další spoj odjížděl až za nepoměrně dlouhou dobu. To byl problém zejména ve večerních hodinách a o víkendech ráno. Takovéto případy však lze ve výchozích jízdnicích řádech najít i v pracovní dny. Existoval předpoklad, že při prodlužování linkových intervalů z 20 na 30 min by se situace o víkendech přes den mohla zhoršit.

Zdárným příkladem špatné koordinace může být např. v jízdnicích řádech pro rok 2017 odjezd linek 5 a 6 z centrální zastávky *Masarykovo náměstí* směrem na sídliště Dukla po 21. hodině, kdy linky odjíždějí shodně v minutách 22, 52 a následně vzniká na spojení centra

s Duklou rozestup mezi spoji 30 minut. Zpět ze sídliště Dukla situace není o nic lepší, rozestupy mezi spoji linek 5 a 6 ze zastávky *Dukla, náměstí* směr centrum města jsou 4-26. (19)

Naproti tomu některé směry v to samé období jsou zkoordinovány velmi dobře, například směr *Polabiny, kpt. Bartoše* ze zastávky *Masarykovo náměstí* (linky 2, 6 a 13) vypadá takto: linka 2 odjíždí v 00, 30; linka 6 ve 21, 51; linka 13 v 10, 40. To je proklad 10-11-9 a pro potřeby obsluhované místní části je zcela vyhovující. (19)

Tato situace nenastává v citovaných jízdních řádech jen v pracovní dny, ale i o víkendech. Jízdní řády ve večerních hodinách jsou velmi podobné a odjezdy spojů posunuty maximálně o 1–2 min. Je také nutné podotknout, že tento stav trval již několik let, během kterých neproběhla žádná výrazná změna jízdních řádů.

Problémem tedy je nedokonalá koordinace páteřních linek napříč celými jízdními řády DPMP, kde dochází k výborným prokladům na některých úsecích na úkor jiných (také důležitých) úseků. To vzniklo pravděpodobně při partikulárním řešení koordinací na jednotlivých úsecích, kdy byly nejprve zkoordinovány „prioritní“ úseky a následně nebylo možné manipulovat s odjezdy spojů linek, které již byly zkoordinovány na jiném úseku. To potvrzuje, že ke koordinaci spojů linek v síti je nutno přistupovat celosíťově (komplexně).

3.2 Výběr řešitelů problému

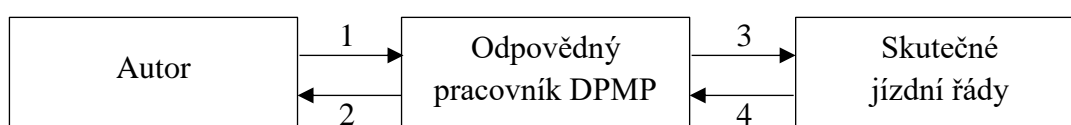
Do řešení vytipovaného problému vstupují následující řešitelé:

Autor diplomové práce – Vytvoření modelu, tvorba návrhů pro koordinaci páteřních linek.

Odpovědný pracovník DPMP – Zadávání požadavků a schvalování navrženého řešení. Pro problémy řešené do 9/2016 to byla zaměstnankyně na pozici „*Vedoucí střediska přípravy a ekonomiky provozu hromadné dopravy*“. Změny jízdních řádů po tomto datu již řešil zaměstnanec na pozici „*referent tvorby jízdních řádů MHD*“.

3.3 Organizační schéma

Základní organizační schéma je zobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14 Organizační schéma řešení problému

Zdroj: (Autor)

3.4 Analýza organizačního schématu

Organizační schéma obsahuje 3 prvky a 4 vazby. Dva prvky tvoří řešitelé problému a jedním prvkem jsou skutečné jízdny řady. Každý prvek má svoji vnitřní činnost, která není pro organizační schéma nikterak důležitá. Analýza je zaměřena na vazby a toky mezi jednotlivými prvky schématu.

Vazba 1 (Autor → Odp. pracovník)

Informací, která je předávána po této vazbě, je vytvořený návrh prokládového schématu pro koordinaci řešeného období.

Vazba 2 (Odp. pracovník → Autor)

Po této vazbě jsou předávány informace o požadavcích pro každý návrh a zpětná vazba ke každému návrhu.

Vazba 3 (Odp. pracovník → Skutečné JŘ)

Pokud je návrh finální a odpovědným pracovníkem řádně zkontrolován a schválen, jsou výsledky implementovány do skutečných jízdnych řádů.

Vazba 4 (Skutečné JŘ → Odp. pracovník)

Z provozu může přijít odpovědnému pracovníkovi zpětná vazba ohledně zavedených jízdnych řádů (např. od cestujících, řidičů nebo dispečerů). Tato zpětná vazba (v podobě připomínek) se týká pouze provozu MHD v Pardubicích, nikoliv výpočetní metodiky řešení jízdnych řádů.

Z analýzy je také patrné, že autor měl dostatek prostoru pro samostatnou tvorbu modelu a návrhů, jak je požadováno při zpracování diplomové práce. Spolupráce s ostatními prvky je na rovině požadavků a zpětné vazby a tyto prvky přímo neovlivňovaly samotné řešení diplomové práce.

3.5 Verbální model

Problém je formulován, řešitelé problému také. Nyní je řada na slovní formulaci modelu.

3.5.1 Požadovaný výstup a řešení

Požadovaným výstupem v případě koordinace páteřních linek jsou odjezdy spojů těchto linek z výchozích a jiných důležitých zastávek (např. přestupní uzly) v rámci koordinovaného období. Dále je potřebné získat přehled údajů o koordinaci linek na jednotlivých úsecích

pro porovnání výchozího a nově navrhovaného stavu. Užitečný může být i údaj o potřebném počtu vozidel k zajištění provozu každé linky. Řešením je kompletní prokladové schéma s požadovanými údaji o časových polohách spojů a koordinaci páteřních linek.

3.5.2 Kritéria kvality řešení

Jako základní kritérium kvality řešení formulovaného optimalizačního problému je autorem zvolena celková nepravidelnost dopravy v rámci systému páteřních linek DPMP během zkoumaného období. Jako nejvhodnější ukazatel pro hodnocení nepravidelnosti se jeví *kvadratická míra nepravidelnosti* (viz podkapitola 1.5.2). Optimální řešení je takové řešení, které zlepšuje celkovou nepravidelnost v síti, avšak výrazně nezhoršuje nepravidelnost na důležitých úsecích. Tento postup byl odsouhlasen i ze strany DPMP.

3.5.3 Omezující podmínky

Řešení bude omezeno těmito podmínkami:

- stanoveným počtem náležitostí (nesmí dojít k růstu provozních nákladů),
- časovou polohou vybraných spojů (u některých nesmí dojít k výrazné změně),
- platnou legislativou ČR (to se týká zejména bezpečnostních přestávek),
- rozmístěním bezpečnostních přestávek na vhodné konečné zastávky,
- předcházení kolizím při předjíždění trolejbusů,
- elektrickými mezidobími u trolejbusových linek.

3.5.4 Dostupné údaje

Dostupnými údaji ohledně řešeného problému jsou:

- seznam linek a zastávek,
- údaje o jízdních dobách (chronometrů),
- aktuální (výchozí) jízdní řády,
- turnusy náležitostí,
- platná legislativa určující režim práce řidiče MHD,
- umístění sociálních zařízení,
- parametry měření,
- přepravní průzkumy.

3.6 Tvorba modelu sítě DPMP

Podkapitola shrnuje přípravu pro tvorbu matematického modelu sítě DPMP. Samotné vytvoření modelu je obecně navrženo v kapitole 2.

3.6.1 Selekce linek

V první řadě je nutno analyzovat linkové vedení sítě, na které je zamýšleno provést optimalizaci, a vybrat linky, které budou v modelu této sítě zahrnuty. V následujících dvou tabulkách je uvedeno linkové vedení všech linek provozovaných DPMP k 1. 4. 2017 v bezvýlukovém stavu – tabulky 7 a 8 uvádí trolejbusové, resp. autobusové linky. Nejsou uvažovány noční, účelové a historické linky, které nebyly zahrnuty do řešeného problému z hlediska jejich specifického provozu.

Tabulka 7 Trasování trolejbusových linek DPMP k 1. 4. 2017 (bezvýlukový stav)

Linka	Trasa
1	Jesničánky,točna – Masarykovo nám. – Na Okrouhlíku – Slovany,točna
2	Polabiny,točna – Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Pardubičky,točna
3	Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Globus – UMA,toč. – Lázně Bohdaneč
4*	Polabiny,točna – Stavařov – Třída Míru – Masarykovo nám. – Polabiny,toč.
5	Dukla,točna – Masarykovo nám. – Židov – Dubina,točna
7	Dukla,vozovna – Zborovské nám. – Masarykovo nám. – Globus (– UMA,točna)
11	(UMA,točna –) Globus – Polabiny,toč. – Stavařov – Dubina,Sever
13	Polabiny,Sluneční – Hl. nádr. – Masarykovo nám. – Na Drážce – Dubina,Sever
21**	Polabiny,Sluneční – Hl. nádr. – Masarykovo nám. – Slovany,točna
27*	Pardubičky,točna – Třída Míru – Teplého – Dukla,nám. – Pardubičky,točna
33	Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Globus (– UMA,toč.)

*Linky 4 a 27 jsou polookružní.

** Linka 21 od 2. 9. 2017 zrušena.

Zdroj: (19)

Tabulka 8 Trasování autobusových linek DPMP k 1. 4. 2017 (bezvýlukový stav)

Linka	Trasa
6	(Dukla,vozovna) – Dukla,nám. – Karla IV. – Masarykovo nám. – Polabiny,Sluneční – Ohrazenice,točna (– Doubravice,nám.)
8/88*	Dubina,Dubinská – Karla IV. – Masarykovo nám. – Hlavní nádr. (– Svítkov,škola –) Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Dubina,Dubinská
9	Rosice,točna – Hlavní nádraží – Hůrka (– Spožil – Sezemice,pošta)
10	(Ostřešany,točna –) Nemošice,točna – Dopravní podnik – Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Univerzita – Cihelna (– Ohrazenice,točna)
12	Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Pardubičky – Zámeček (– Drozdice – Černá za Bory – Mnětice – Úhřetice)
14	Staré Čívce – Na Spravedlnosti – Masarykovo nám. – Polabiny,točna
15	Opočinec – Svítkov,škola – Na Spravedlnosti – Hlavní nádraží
16	Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Cihelna – Dříteč
17	Hlavní nádraží – Masarykovo nám. – Doubravice – Srch,točna
18	(Mikulovice –) Dražkovice – Hlavní nádraží – Černá u Bohdanče (– Živanice)
22	Závodu Míru – Masarykovo nám. – Nemocnice – Nemošice,točna
23	Polabiny,točna – Hlavní nádraží – Staré Čívce,Prům. zóna
24	Hlavní nádraží – Na Spravedlnosti – Starý Mateřov (– Čepí)
25	Dubina,Sever – Karla IV. – Dukla,nám. – Staré Čívce,Prům. zóna
26	Hlavní nádraží – Hlaváčova – Na Drážce – Dubina,Dubinská
28	Závodu Míru – Masarykovo nám. – Pardubičky (– Staročernsko – Sezemice,Veská / Žižín)
29	Letiště – Svítkov – Staňkova,škola – Gorkého

**Linky 8 a 88 jsou přes Svítkov vedeny polookružně, linka 88 je vedena protisměrně lince 8.*

Zdroj: (19)

Celkem bylo k 1. 4. 2017 provozováno 29 linek (mimo nočních, účelových a historických). Nyní lze provést selekci „správných“ linek. Bylo rozhodnuto, že v modelu budou mimo čistě páteřních linek zobrazeny i linky doplňkové, které mají pravidelný provoz. Proto je nutné analyzovat linkové intervaly jednotlivých linek. To je provedeno opět zvlášť pro trolejbusové a autobusové linky v tabulkách 9 a 10 pro následující období: špička pracovního dne (ŠpPD), sedlo pracovního dne (SePD), víkend ráno (VR), víkend den (VD) a večer. Večerní provoz v pracovní den a o víkendu lze považovat za shodný a špička pracovního dne přes prázdniny přibližně odpovídá špičce pracovního dne v období 5–6 h. a 17–19 hodin.

Tabulky nemapují detailní průběh linkových intervalů během dne, období jsou zobecněna tak, aby odpovídala větší části linek, proto mohou být některé údaje nepřesné, ale to nehraje

podstatnou roli, protože se jedná pouze o orientační údaje sloužící k tomu, aby byly selektovány vhodné linky pro model.

Tabulka 9 Linkové intervaly (trolejbusy)

Linka	ŠPPD 6-8, 13-17	ŠPPD 5-6, 17-19 + prázdn.	SEPD 8-13	VR 5-8	VD 8-19	Večer 19-21	Večer 21-23	Zařazení do modelu
1	12	15	15	30	20	30	30	Ano
2	15	15	15	30	20	30	30	Ano
3	15	20	30	30	30	30	60	Ano
4	30	30	30	-	-	-	-	Ano
5	10	15	15	30	20	30	30	Ano
7	30	30	30	30	30	30	-	Ano
11	20-30	30	30	30	30	30	-	Ano
13	10	15	15	30	20	30	30	Ano
21	60	-	60	-	-	-	-	Ano
27	60	60	60	-	-	-	-	Ano
33	15	30	30	-	30	-	-	Ano

Zdroj: (19)

U všech trolejbusových linek lze nalézt pravidelný interval, proto budou do výsledného schématu zahrnuty všechny bez výjimky.

Tabulka 10 Linkové intervaly (autobusy)

Linka	ŠPPD 6–8, 13–17	ŠPPD 5–6, 17–19 + prázd.	SEPD 8–13	VR 5–8	VD 8–19	Večer 19–21	Večer 21–23	Zařazení do modelu
6	10	15	15	30	20	30	30	Ano
8/88	10	15	15	30	20	30	30	Ano
9	N	N	N	N	N	N	N	Ne
10	N	N	N	N	N	N	N	Ne
12	Cca 15	N	N	N	N	N	N	Ano
14	N	N	N	N	N	N	N	Ne
15	N	N	N	N	N	N	N	Ne
16	N	N	N	-	N	N	-	Ne
17	N	N	N	-	N	-	-	Ne
18	N	N	N	N	N	N	N	Ne
22	N	-	-	-	-	-	-	Ne
23	N	N	N	N	N	N	N	Ne
24	N	N	N	N	N	N	N	Ne
25	N	N	N	N	N	N	N	Ne
26	60	-	60	-	-	-	-	Ne
28	N	N	N	-	N	N	-	Ne
29	N	-	-	-	-	-	-	Ne

N – Nepravidelný interval

Zdroj: (19)

U autobusových linek DPMP je těžší hledat linky provozované v pravidelném intervalu. Tento požadavek naplňují linky 6 a 8/88, které jsou páteřní. Vzhledem k tomu, že linka 88 je pouze spoj linky 8 vedený obráceným směrem na smyčkové části (marginální část trasy), není třeba tuto linku tvořit zvlášť.

Dále páteřní linkou v době řešení byla určitě linka 12, jejíž vytížení je značné díky obsluze oblasti, ve které se nachází průmysl a školy, avšak pravidelný interval je nutno si u této linky představit především z oběhových a provozních důvodů (každý spoj má jinou trasu apod.). V době tvorby modelu pro DPMP zde však jistý potenciál na zavedení pravidelného intervalu byl a měl by smysl, a tak linka bude v modelu zahrnuta. Naopak linka 26 sice pravidelný interval má, avšak je provozována v úseku *Dubina, Dubinská – Na Drážce* v časových polohách linky 8, u které nahrazuje spoje a tak nemá smysl ji do modelu zahrnovat.

Analýzou linkového vedení DPMP byla vybrána výchozí množina linek, které budou zahrnuty do modelu, a to linky 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 21, 27, 33. Celkem model bude čítat 14 „páteřních“ linek.

3.6.2 Výběr uzlů a úseků pro model

Nyní je nutné určit, které uzly a úseky budou v modelu zahrnuty. Z množiny všech existujících zastávek, kterých síť obsluhovaná DPMP obsahuje 209 (20), pro model připadá v úvahu pouze podmnožina těch zastávek, které jsou obsluhovány selektovanými linkami. Tyto zastávky však nemá smysl zahrnovat všechny a je nutné vybrat pouze významné zastávky, ve kterých linky začínají nebo končí, případně kde dochází k směrovému rozdělení vybraných linek. Tím se výběr zúží na následující výčet zastávek uvedený v následujících tabulkách 11 (konečné zastávky) a 12 (pouze nácestné zastávky). Linky, které v zastávce končí, jsou v tabulce 11 zvýrazněny tučně. U zastávek jsou uváděny zkratky jejich názvů, které se budou dále objevovat např. pro označování indexů apod.

Tabulka 11 Přehled konečných zastávek zařazených do modelu

Zastávka	Zkratka	Linky
Dubina,Sever/Dubinská	DUB	5, 8, 11, 13
Dukla,náměstí	DKN	5, 6, 7, 27
Dukla,točna	DKT	5
Dukla,vozovna	VOZ	7
Globus	GLO	3, 7, 11, 33
Hlavní nádraží	HLN	2, 3, 6, 8, 12, 13, 21, 33
Jesničánky,točna	JES	1
Lázně Bohdaneč	BOH	3
Ohrazenice,točna	OHR	6
Pardubičky,točna	PAR	2, 27
Polabiny,Sluneční	SLU	6, 13, 21
Polabiny,točna	POL	2, 4, 11
Slovany,točna	SLO	1, 21
Svítkov,škola	SVI	8
Třída Míru	TRM	4, 21, 27

Zdroj: (Autor)

Celkem je vybráno pro zařazení do modelu 15 konečných zastávek. U polookružních linek jsou zvýrazněny konečné zastávky podle linkového vedení DPMP.

Tabulka 12 Přehled nácestných zastávek zařazených do modelu

Zastávka	Zkratka	Linky
Dubina,garáže	DGA	5, 11, 13
Dubina,točna	DUT	8
K Nemocnici	KNM	8
Karla IV.	KIV	6, 8
Kpt. Bartoše	BAR	2, 6, 13, 21
Krajský úřad	KRA	1, 2, 5, 11, 12, 13, 21
Masarykovo náměstí	MAS	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 33
Na Drážce	DRA	8, 11, 13
Na Okrouhlíku	OKR	1, 11, 13, 21
Na Spravedlnosti	SPR	1, 5, 7, 27
Nám. Republiky	REP	1, 2, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 21, 27
Poděbradská	POD	3, 7, 11, 33
Polabiny,Okrajová	POK	6, 13, 21
Stavařov	STA	3, 4, 7, 11, 33
U Grandu	GRA	21, 27
U Kostelíčka	KOS	1, 2, 11, 12, 13, 21
UMA,točna	UMA	3
Zborovské nám.	ZBO	1, 6, 7, 27
Zimní stadion	ZIM	3, 4, 7, 11, 33
Židov,točna	ŽID	5

Zdroj: (Autor)

Dalších 20 významných zastávek, které budou znázorněny v modelu, tvoří nácestné zastávky. Celkem bude znázorněno 35 zastávek. Vazby mezi těmito zastávkami by se daly vyjádřit maticí sousednosti, kde hodnota 1 značí existující vazbu mezi zastávkami. V tabulce 13 jsou již uvedeny všechny úseky, které budou hodnoceny z hlediska pravidelnosti. Nejedná se pouze o úseky, které jsou ohraničeny dvěma sousedními uzly, ale jsou zde zahrnuty i „fiktivní“ úseky pro koordinaci linek, jedoucích stejným směrem, ale jinou trasou. Každému úseku je přiděleno číslo, kterým bude úsek identifikován v dalším textu. V případě rozdělení jednoho úseku do dvou řádků je horní řádek pro směr tam a spodní řádek pro směr zpátky (dle uvedeného směru). Dále jsou u každého úseku uvedeny hodnoty vah g_u , které byly stanoveny v rámci kalibrace modelu a používány při optimalizaci u všech období.

Tabulka 13 Přehled hodnocených úseků

Úsek	Číslo	g_u	Linky
Zimní stadion – Stavařov	1	0	3, 7, 11, 33
	2	0	3, 7, 11, 33
Hlavní nádraží – Kpt. Bartoše	3	3	2, 6, 13, 21
	4	3	2, 6, 13, 21
Stavařov – Hradecká – Poděbradská	5	2	3, 7, 33
	6	2	3, 7, 33
Polabiny, toč. – Polabiny, Kosmonautů	7	2	2, 4, 11
	8	2	2, 4, 11
Kpt. Bartoše – Okrajová/Sluneční	9	1	6, 13, 21
	10	1	6, 13, 21
Hlavní nádraží – Masarykovo náměstí	11	0,5	2, 3, 6, 8, 12, 13, 21
	12	0,5	2, 3, 6, 8, 12, 13, 21
Náměstí Republiky – Karla IV.	13	0,8	6, 8
	14	0,8	6, 8
Masarykovo nám. – Na Spravedlnosti	15	2	1, 5, 7, 21
	16	2	1, 5, 7, 21
U Kostelíčka – Pardubičky, točna	17	1	2, 12, 27
	18	1	2, 12, 27
U Kostelíčka – Na Okrouhlíku	19	1	1, 11, 13, 21
	20	1	1, 11, 13, 21
Na Drážce – Na Okrouhlíku/K Nemocnici	21	1,5	8, 11, 13
	22	1,5	8, 11, 13
Dubina, Sever – Dubina, garáže	23	3	5, 11, 13
	24	3	5, 11, 13
Slovany – Na Okrouhlíku	25	0	1, 21
	26	0	1, 21
Zborovské nám. – Na Spravedlnosti	27	1,5	1, 7, 27
	28	1,5	1, 7
Masarykovo nám. – Nám. Republiky	29	0,5	1, 2, 5, 6, 8, 12, 13
	30	0,5	1, 2, 5, 6, 8, 12, 13
Nám. Republiky – Krajský úřad	31	0,5	1, 2, 5, 12, 13, 21, 27
	32	0,5	1, 2, 5, 12, 13, 21, 27
Na Spravedlnosti – Dukla, nám.	33	1	5, 27
Dukla, nám. – Zborovské nám.	34	1	7, 27
Globus – Poděbradská	35	0*	3, 7, 11, 33
Odjezdy z Dukly směr centrum (fiktivní)	36	3	5, 6, 7, 27
Odjezdy z centra na Dubinu (fiktivní)	37	3	5, 8, 11, 13

*V případě vzniku kolizí při předjíždění vozidel byla volena hodnota 1, viz kapitola 3.7.3

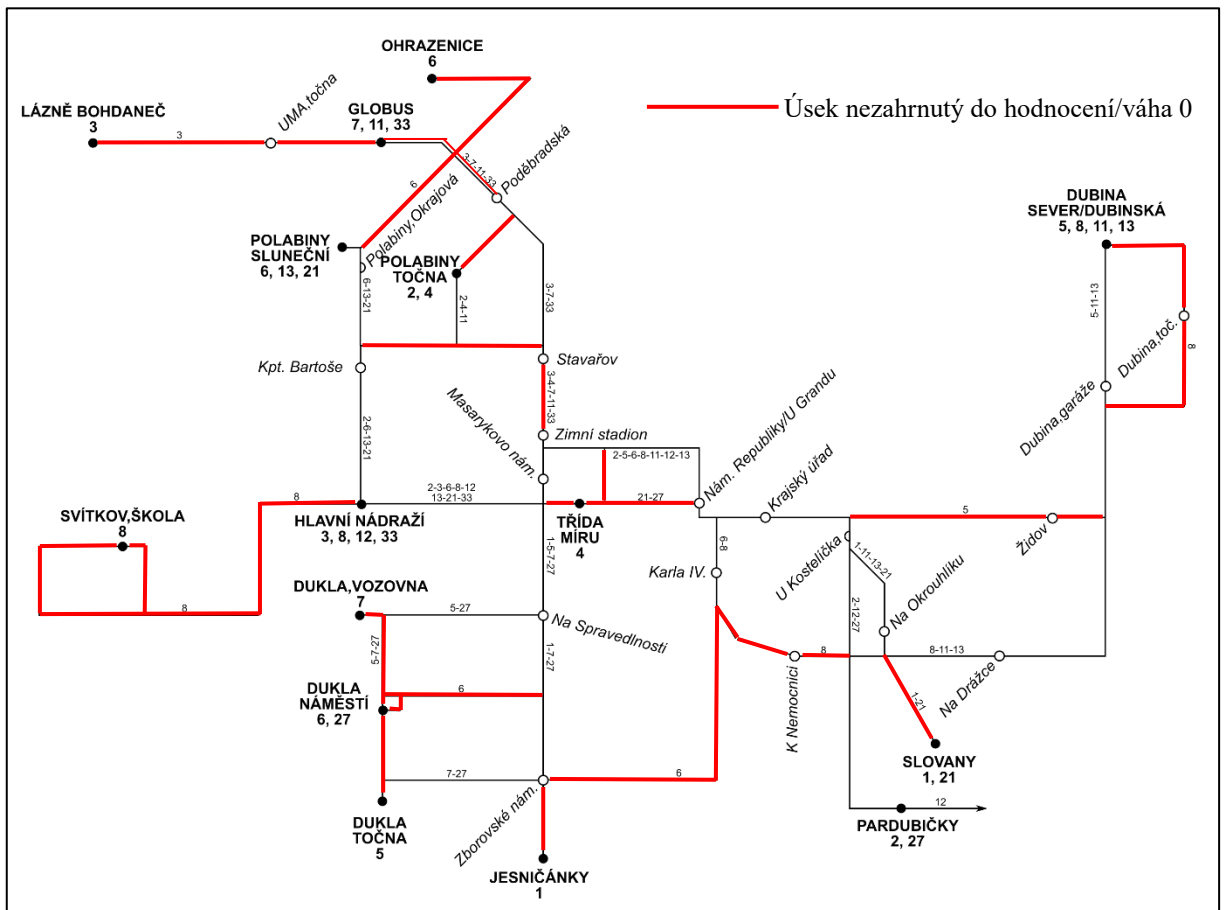
Zdroj: (Autor)

Fiktivní úseky 36 a 37 jsou zařazeny z důvodu koordinace spojů ze sídliště Dukla do centra Pardubic (linky 5, 6, 7 a 27) a z centra na sídliště Dubina (linky 5, 8, 11 a 13).

Nejvyšší vahou (hodnota 3) jsou ohodnoceny úseky společné pro linky spojující největší pardubická sídliště Polabiny, Dubina a Dukla s centrem. Na těchto úsecích totiž lze očekávat nejvyšší poptávku po přepravě. Naopak bez hodnocení zůstaly úseky, do kterých linky vstupují

zkoordinovány z jiného úseku a koordinace s ostatními linkami nemá smysl (*Zimní stadion – Stavařov* a zpět). Úseky v centru města, které jsou společné pro více linek z různých směrů (např. *Hlavní nádraží – Masarykovo náměstí*) jsou do hodnocení zahrnuty hodnotou 0,5 – tím je řečeno, že na koordinaci tohoto úseku záleží (aby nenastal zbytečný souběh více spojů), ale není nezbytně nutné mít zde naprosto pravidelnou nabídku. To je kompenzováno větším množstvím spojů než na úsecích s méně linkami.

Celkem je uvažováno 37 úseků, jejichž hodnocení bude zahrnuto do účelové funkce. Výsledné schéma, podle kterého je vytvořena síť modelu, je uvedeno na obrázku 15. Červeně jsou zvýrazněny úseky, které nejsou důležité z hlediska koordinace linek na nich (úseky s provozem jedné linky, příp. bezvýznamné úseky a úseky hodnocené vahou 0).



Obrázek 15 Schéma sítě modelu pro síťovou koordinaci páteřních linek DPMP

Zdroj: (Autor)

Náhled rozsahu kompletního prokladového schématu DPMP vytvořeném v Excelu lze vidět v příloze A.

3.7 Rozšiřující omezující podmínky v síti DPMP

Před začátkem optimalizace na vytvořeném modelu sítě je nutno určit rozšiřující omezující podmínky, které jsou dány provozními podmínkami DPMP. Následující podmínky jsou platné při řešení všech úloh na síti DPMP. Pokud by některé z řešených prokladových období mělo jinou specifickou omezující podmínku, bude uvedena u jeho řešení.

3.7.1 Délka doby čekání na konečné

V podkapitole 2.1.2 je pro možnost dodržení bezpečnostních přestávek stanovena maximální doba oběhu vozidla na lince na 80 minut včetně dob obratu na konečných zastávkách. V podmínkách DPMP je také nutné započítat doby přístavné jízdy na výchozí zastávku a odstavné jízdy po příjezdu do konečné zastávky. Pro oba technologické procesy bude dohromady uvažována paušálně 1 minuta (průměrná hodnota připadající na jeden spoj).

V tabulce 14 je uveden přehled délky minimálních možných oběhů vozidel o_{min} u selektovaných linek DPMP v jejich základní trase při nejdelších možných jízdních dobách. Doba minimálního možného obratu je součet jízdních dob linky oběma směry (v minutách), přístavné a odstavné jízdy na konečné zastávce (na každé konečné, tudíž 2×1 minuta u nepolookružních linek) a minimální doby bezpečnostní přestávky (10 minut). Není tedy započítána doba čekání na konečných zastávkách, která je závislá na linkovém intervalu I_l a vzájemné poloze spojů přijíždějících a odjíždějících z konečné zastávky.

Tabulka 14 Přehled minimálních dob obratu vybraných linek DPMP

Linka	$t_j^{A \rightarrow B}$ [min]	$t_j^{B \rightarrow A}$ [min]	o_{min} [min]
1	19	19	50
2	23	22	57
3	26	25	63
4	16	-	27
5	22	22	56
6	30	31	73
7	20	18	50
8	58	-	69
11	23	22	57
12	30	30	72
13	23	23	58
21	21	21	54
27	38	-	49
33	10	10	32

Zdroj: (19)

Nejdelší minimální možná doba obratu je u linky 6, a to 73 min. Protože platí nerovnice $73 \leq 80$, lze říci, že u všech linek uvažovaných v modelu je možné dělit bezpečnostní přestávku na 3 části.

Omezující podmínkou tedy je minimální délka alespoň jedné doby čekání na konečné zastávce (včetně přístavné a odstavné jízdy) 11 minut. Na kterou konečnou zastávku umístit tuto přestávku je dáno následující podkapitolou 3.7.2.

3.7.2 Umístění bezpečnostních přestávek

U DPMP jsou využívány dva druhy sociálního zařízení: rozšířenější jsou „pevná“ zařízení, která jsou napojena na inženýrské sítě. Kromě toalety a tekoucí vody jsou zde umístěny např. lednice, mikrovlnné trouby, sodobary, automaty na kávu apod. Méně rozšířenými jsou mobilní sociální zařízení sloužící pouze jako toaleta, případně je zde nádrž s vodou pro umývání rukou. Mobilní sociální zařízení však neposkytují takovou úroveň jako zařízení pevná, a proto nebudou uvažována. Seznam konečných zastávek, které jsou vybaveny pevným sociálním zařízením je uveden v tabulce 15. Zahrnuty jsou pouze konečné zastávky, které jsou obsluhovány linkami vybranými v kapitole 3.6.1.

Tabulka 15 Umístění pevných sociálních zařízení DPMP

Konečná zastávka	Zkratka	Obsluhující linky
Dubina,Sever	DUB	5, 8, 11, 13
Jesničánky,točna	JES	1
Polabiny,točna	POL	2, 4
Pardubičky,točna	PAR	2, 27
Hlavní nádraží	HLN	3, 12, 33
Ohrazenice,točna	OHR	6
Dukla,vozovna	VOZ	7
Polabiny,Sluneční	SLU	13, 21

Zdroj: (Autor)

Z výše uvedené tabulky lze vyčíst, že každá z linek vybraných do prokladového schématu, má alespoň na jedné konečné zastávce umístěno pevné sociální zařízení.

Omezující podmínka tudíž je, že doba čekání alespoň na jedné z konečných zastávek linky, které jsou vybaveny pevným sociálním zařízením, musí být minimálně 11 minut (viz kapitola 3.7.1). Matematicky lze zapsat vzorcem (35).

$$t_{o_l}^A \vee t_{o_l}^B \geq 11 \quad (35)$$

kde:

$t_{o_l}^A$ doba obratu linky l na první konečné vybavené soc. zařízením [min],

$t_{o_l}^B$ doba obratu linky l na druhé konečné vybavené soc. zařízením [min].

Pokud tuto podmínku nelze dodržet, přidá se na linku další vozidlo a doba obratu této linky na požadované konečné bude prodloužena o hodnotu linkového intervalu.

3.7.3 Bezkoliznost

Problém kolizí vzniká u DPMP na zastávce *Globus*, která je konečnou zastávkou pro většinu spojů linek 7, 11 a 33. Pro linku 3 je tato zastávka nácestná. Vozy, jejichž spoje v zastávce končí, vyčkávají na svůj odjezd ve výstupní zastávce, která je pro linky 3, 7, 11 a 33 společná a není vybavena předjízdou stopou. Vyčkávání může být také provedeno v nástupní zastávce.

Základní podmínkou zde je, aby vyčkávající vozidla nebránila průjezdu ostatním spojům. Dále je nutné zajistit, aby končící vozidla odjížděla na stejné lince a v tom samém pořadí, ve kterém přijela. Řešit předjíždění stažením sběračů je nežádoucí, jelikož trolejové vedení je zde umístěno nad frekventovanou silnicí III/32224, a tak by zbytečně docházelo k rizikovým vstupům řidiče do této silnice během manipulace se sběrači.

Ze zkušeností získaných při řešení návrhu koordinací páteřních linek v rámci diplomové práce vyšlo najevo, že tuto podmínku lze částečně ošetřit, pokud bude koordinován i odjezd ze zastávky *Globus* zpět do centra a budou nastaveny maximální doby obratu pro končící spoje. Je to jednodušší než v optimalizačním modelu formulovat zvláštní omezující podmínku. Ovšem je nutné každé schéma po optimalizaci podrobit revizi, zda je podmínka bezkoliznosti ve výchozí zastávce *Globus* dodržena.

3.7.4 Energetická omezení

Je potřeba také zmínit energetické hledisko. V síti DPMP při současné četnosti spojů jednotlivých trolejbusových linek nedochází k překročení žádného omezení přípustného počtu trolejbusů v jednom napájecím úseku, a tak není potřeba v navrhovaném modelu toto řešit. Nedá se ani předpokládat, že by po provedení optimalizace a zlepšení rozložení spojů v rámci celé sítě mohlo docházet k energetickým problémům. (21)

3.8 Zavedené návrhy koordinací

Tato podkapitola shrnuje optimalizační návrhy zavedené do praxe. Návrhy byly tvořeny autorem s využitím sestaveného modelu a připomínkovány odpovědnými zaměstnanci DPMP. Následně byly výsledné návrhy převzaty a již jen s minimálními úpravami zavedeny do reálného provozu. Síťová grafika (prokladové schéma) s odjezdy linek z významných zastávek ke každému optimalizovanému období před a po optimalizaci je uvedena v přílohách B – I. Tyto přílohy mohou být při prohlášení diplomové práce v elektronické podobě v základním přiblížení nečitelné a je třeba si stránky zvětšit.

Následně uváděné hodnoty KMN jsou v základním tvaru bez přepočtu vah. Záměrem je korektní zhodnocení výsledků na všech úsecích bez ohledu na důležitost koordinace na jednotlivých úsecích. Případné souvislosti mezi výsledky a vahami na úsecích jsou komentovány v textu.

3.8.1 Víkend léto 2017 (8–19 hodin)

Prvním obdobím, které bylo navrhováno, byl víkendový provoz přes letní prázdniny v čase 8–19 hodin. Periodický provoz je v tomto období zaveden u linek **1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 13 a 33**. **Linky 1, 2, 5, 6, 8 a 13** mají společný **interval 20 minut**, **linky 3, 7, 11 a 33 interval 30 minut**. To na společných úsecích vyvolává určité koordinační problémy a vznikají souběhy spojů více linek (např. u linek 1 a 7). Kvůli úsporným opatřením (nedostatek řidičů) je perioda u všech páteřních linek v létě 2017 sjednocena na 30 minut, což vytváří předpoklad pro odstranění těchto souběhů. **Celková kvadratická míra nepravidelnosti v síti (KMN)** u výchozího schématu **dosahuje 3 885 min²**. Výchozí prokladové schéma v čase 8–19 hodin víkendového provozu je uvedeno v příloze B.

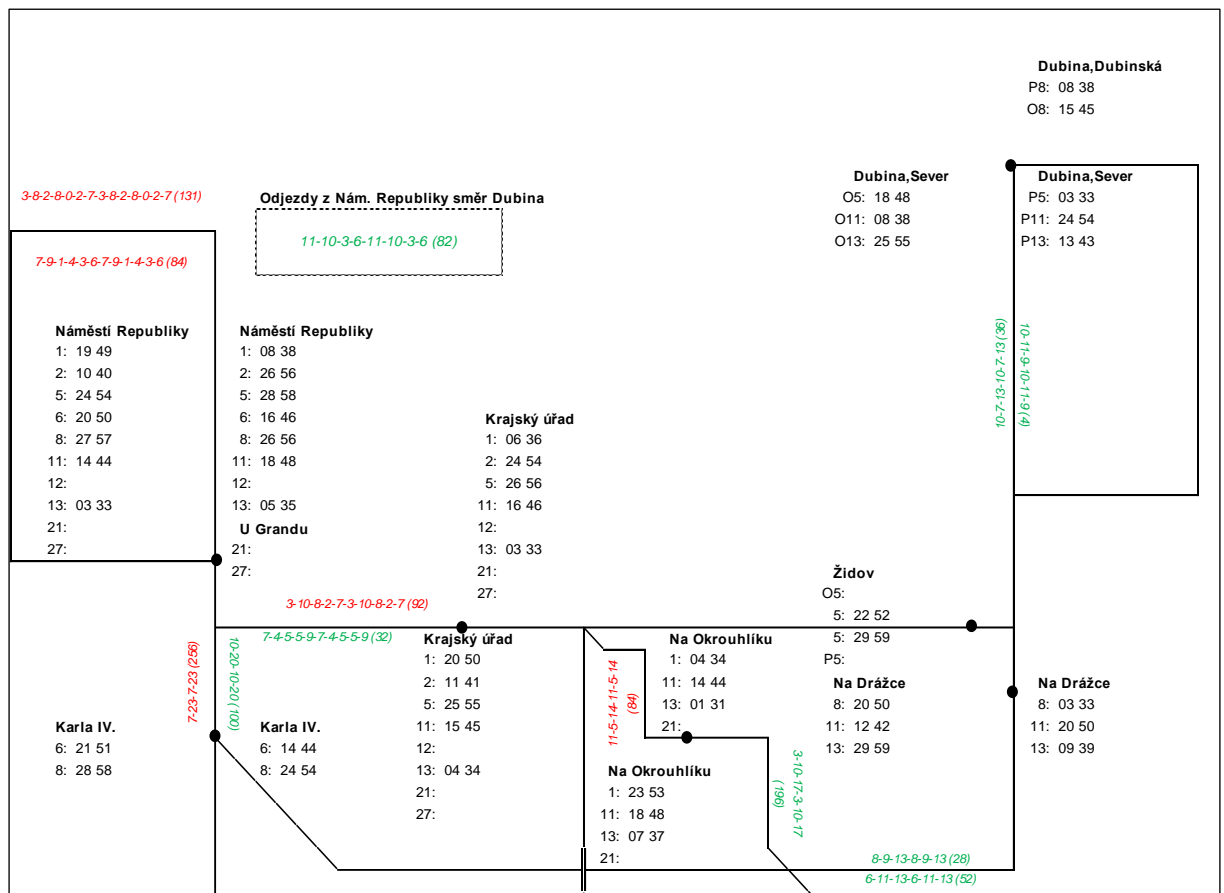
V původním jízdním řádu je kladen důraz na koordinaci linek v úseku *Polabiny, Sluneční – Kpt. Bartoše – Hlavní nádraží* a zpět. Zde KMN nabývá hodnot 6–24 min², což je nejméně v rámci celé sítě (na úsecích, kde je provozována více než 1 linka).

Naopak nejhůře zkoordinovanými úseky jsou dle hodnoty KMN *Karla IV. – Náměstí Republiky* (384 min²), *Na Spravedlnosti – Zborovské náměstí* (280 min²) nebo příjezdy na zastávku *Na Drážce* směrem z centra (246 min²), s čímž souvisí odjezdy z centra směrem na sídliště Dubina (225 min²).

Výhodou při optimalizaci tohoto období bylo, že neexistovala téměř žádná omezující podmínka na časové polohy většiny spojů. Jedinou výjimku tvořila linka 3, u které vzhledem

k meziměstskému charakteru byl dodržen odjezd z *Hlavního nádraží* do *Lázní Bohdaneč* dle výchozího jízdního řádu. U této linky jsou ponechány odjezdy ze zastávky *Hlavní nádraží* ve 21. a 51. minutu jako ve výchozím stavu. Ostatní časy odjezdů linek z výchozích zastávek jsou vypočteny Řešitelem.

Provedením optimalizace pomocí navrhované metody je dosaženo **snížení hodnoty KMN v síti na 1 979 min²**. To je oproti výchozímu stavu **zlepšení o 1 906 min²**. Výřez z výsledného prokladového schématu je zobrazen na obrázku 16. Celý výsledek lze vidět na schématu přiloženém v příloze C.



Obrázek 16 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (8–19 h)

Zdroj: (Autor)

Je nutno podotknout, že oproti výchozímu stavu dochází u nového návrhu ke sjednocení intervalů na všech linkách (nově 30 minut). To umožňuje lépe zkoordinovat většinu úseků. Nižší nabídka spojení na některých linkách tak je částečně vykompenzována rovnoměrnější nabídkou spojů v čase, což dokazují konkrétní hodnoty KMN u každého z úseků. Např. u linek 1 a 7 z *Masarykova náměstí* na *Zborovské náměstí* jsou ve výchozím stavu rozestupy mezi spoji o víkendu během dne 10-10-20-0-20 minut (KMN 280 min²), po optimalizaci je KMN 36 min²

s rozestupy 12-18-12-18 (očekávané rozestupy 15-15-15-15). Ačkoliv je zde úbytek jednoho spoje za hodinu, maximální délka čekání je zkrácena o 2 minuty a nedochází k souběhům, kdy by dva spoje jely úplně zároveň.

Přehled koordinace linek na společných úsecích před a po optimalizaci udává tabulka 16. Z ní je také patrné, na kterých úsecích byla rovnoměrnost rozložení spojů v čase vylepšena (zelená barva), kde zhoršena (červená barva) a kde ke změně nepravidelnosti nedošlo (černá).

Tabulka 16 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (8–19 h)

Úsek	Úsek	Výchozí		Léto 2017		
		Rozestupy	KMN	Rozestupy	KMN	+/-
Zimní stadion - Stavařov	1	9-6-2-13-9-6-2-13	130	11-4-6-9-11-4-6-9	58	-72
	2	3-9-8-10-3-9-8-10	58	9-1-9-11-9-1-9-11	118	60
Hlavní nádraží - Kpt. Bartoše	3	6-8-6-6-8-6-6-8-6	8	9-11-10-9-11-10	4	-4
	4	5-6-9-5-6-9-5-6-9	26	13-7-10-13-7-10	36	10
Stavařov - Hradecká - Poděbradská	5	9-6-15-9-6-15	84	11-10-9-11-10-9	4	-80
	6	3-17-10-3-17-10	196	9-10-11-9-10-11	4	-192
Polabiny, toč. - Polabiny, Kosmonautů	7	8-12-18-2-20	216	18-12-18-12	36	-180
	8	6-20-4-16-14	184	16-14-16-14	4	-180
Kpt. Bartoše - Okrajová/Sluneční	9	8-12-8-12-8-12	24	11-19-11-19	64	40
	10	11-9-11-9-11-9	6	13-17-13-17	16	10
Hlavní nádraží - Masarykovo náměstí	11	4-1-4-5-6-0-4-5-1-5-4-5-1-4-6	55	7-3-7-0-6-7-7-3-7-0-6-7	84	29
	12	2-6-2-6-4-2-3-5-6-2-2-8-5-1-4	63	4-5-6-10-0-5-4-5-6-10-0-5	104	41
Náměstí Republiky - Karla IV.	13	5-15-5-15-5-15	150	7-23-7-23	256	106
	14	18-2-18-2-18-2	384	10-20-10-20	100	-284
Masarykovo nám. - Na Spravedlnosti	15	7-3-10-7-13-0-7-13	144	10-12-8-10-12-8	16	-128
	16	5-3-12-5-13-2-5-15	176	13-5-12-13-5-12	76	-100
U Kostelíčka - Pardubičky, točna	17	20-20-20	0	30-30	0	0
	18	20-20-20	0	30-30	0	0
U Kostelíčka - Na Okrouhlíku	19	9-11-3-6-11-9-4-7	64	11-5-14-11-5-14	84	20
	20	5-10-5-5-15-5-0-15	200	3-10-17-3-10-17	196	-4
Na Drážce - Na Okrouhlíku/K Nem.	21	10-5-5-10-10-5-5-10	50	8-9-13-8-9-13	28	-22
	22	4-10-6-4-16-4-0-16	246	6-11-13-6-11-13	52	-194
Dubina, Sever - Dubina, garáže	23	12-3-5-12-8-5-7-8	74	10-7-13-10-7-13	36	-38
	24	1-15-5-9-6-5-15-4	184	10-11-9-10-11-9	4	-180
Slovany - Na Okrouhlíku	25	20-20-20	0	30-30	0	0
	26	20-20-20	0	30-30	0	0
Zborovské nám. - Na Spravedlnosti	27	3-17-13-7-20	196	17-13-17-13	16	-180
	28	10-10-20-0-20	280	12-18-12-18	36	-244
Masarykovo nám. - Nám. Republiky	29	4-2-3-2-3-6-4-2-3-2-3-6-4-2-3-2-3-6	34	7-9-1-4-3-6-7-9-1-4-3-6	84	50
	30	2-0-8-5-1-4-2-0-3-5-5-1-4-2-0-8-5-0-1-4	120	3-8-2-8-0-2-7-3-8-2-8-0-2-7	131	11
Nám. Republiky - Krajský úřad	31	6-6-5-3-0-6-6-5-3-6-4-2-5-3	45	7-4-5-5-9-7-4-5-5-9	32	-13
	32	8-5-1-6-3-5-5-1-6-8-5-0-1-6	91	3-10-8-2-7-3-10-8-2-7	92	1
Na Spravedlnosti - Dukla, nám.	33	20-20-20	0	30-30	0	0
Dukla, nám. - Zborovské nám.	34	30-30	0	30-30	0	0
Odjezdy z Globusu směr centrum	35	3-7-10-10-3-7-10-10	66	1-10-11-8-1-10-11-8	122	56
Odjezdy z Dukly směr centrum	36	7-1-12-8-9-3-8-12	106	10-11-9-10-11-9	4	-102
Odjezdy z centra na Dubinu	37	4-2-8-6-4-2-14-4-0-2-14	225	11-10-3-6-11-10-3-6	82	-143
Celkem			3885		1979	-1906

Zdroj: (Autor)

Celkem bylo zlepšeno 19 úseků, 12 úseků se zhoršilo a 6 úseků zůstalo beze změny (úseky obsluhované jedinou linkou). Velikost zlepšení dosahuje mnohem vyšších hodnot než velikost zhoršení (průměrná hodnota zlepšení je o 123 min² a zhoršení o 36,2 min²).

Největší zlepšení nastalo na úsecích:

- *Karla IV. – Náměstí Republiky* (-284 min²): Linky 6 a 8 směrem do centra,
- *Na Spravedlnosti – Zborovské nám.* (-244 min²): Linky 1 a 7 směrem z centra,
- příjezdy na sídliště *Drážka* z centra (-194 min²): Linky 8, 11 a 13 směrem z centra,
- *Poděbradská – Hradecká – Stavařov* (-192 min²): Linky 3, 7 a 33 směrem do centra.

Největší zhoršení pak na úsecích:

- *Náměstí Republiky – Karla IV.* (+106 min²): Linky 6 a 8 směrem z centra,
- *Stavařov – Zimní stadion* (+60 min²): Linky 3, 7, 11 a 33 směrem do Polabin,
- odjezdy z *Globusu* do centra (+56 min²): Linky 3, 7, 11 a 33 směr do centra,
- *Masarykovo nám. – Náměstí Republiky* (+50 min²): Linky 1, 2, 5, 6, 8/88 a 13.

Lze pozorovat, že to největší zhoršení nastalo právě na úsecích, jejichž váha byla nastavena na hodnotu menší než 1. Navíc úsek *Stavařov – Zimní stadion* a odjezdy spojů od zast. *Globus* do centra byly ohodnoceny nulovou vahou z důvodu nevýznamnosti koordinace linky 11 s linkami 3, 7 a 33 (ty jsou zkoordinovány v úseku *Poděbradská – Hradecká – Stavařov*).

Výraznou změnou je narušení pravidelného rozestupu mezi linkami 3 a 33, který ve výchozím jízdním řádu činil 15-15 minut a pochází z doby, kdy spoje končící u *Globusu* nebo na *UMĚ* byly společně označeny jako linka 3 (v 15min intervalu) a nikoliv jako linky 3 a 33 (každá v 30min intervalu). Nově je Řešitelem mezi linkami 3 a 33 zaveden rozstup 10-20 resp. 9-21 s tím, že větší rozstup je v úseku *Masarykovo náměstí – Globus* a zpět proložen spoji linky 7 s výslednými rozestupy 10-10-10 resp. 10-9-11.

S podobnými rozestupy se lze setkat na více úsecích obsluhovaných třemi linkami (například: 8-12-10, 13-7-10 apod.). Takové rozestupy mezi spoji jsou jistým kompromisem, který umožní mít co nejpravidelnější nabídku v rámci celé sítě, i když nejsou rozestupy na některých úsecích naprosto pravidelné.

3.8.2 Víkend léto 2017 (6–8 hodin)

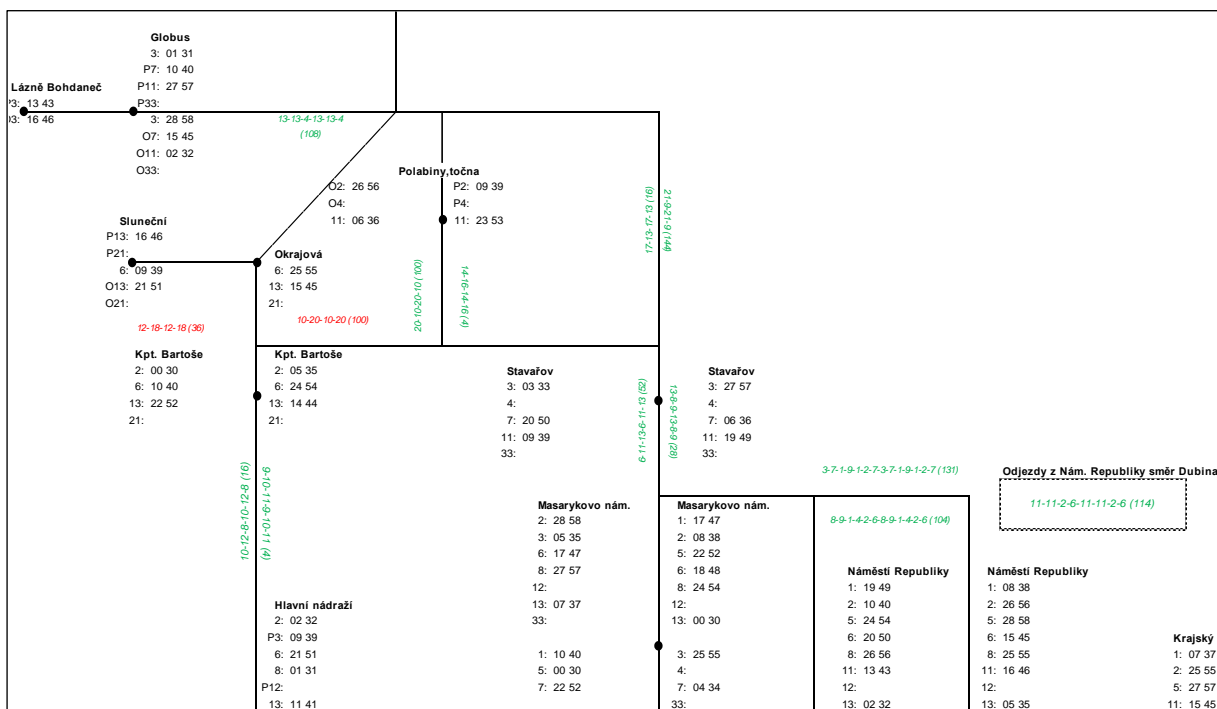
Vzhledem ke zcela nové podobě víkendových jízdních řádů v čase 8–19 hodin bylo potřebné navrhnout i koordinaci víkendových jízdních řádů v ranních hodinách mezi 6–8 hod. Do 8. hodiny nebyla o víkendech v době řešení provozována linka 33 a také je o víkendu v čase 6–8 hodin oproti období 8–19 hodin rozdílná chronometráž, což znamená, že jízdní doby spojů jsou kratší než během zbytku dne. Rozdíl jízdní doby před a po 8. hodině na jednom spoji z výchozí na konečnou zastávku může být i 3–5 minut.

Rozsah dopravy u tohoto období zůstává stejný jako ve výchozím jízdním řádu: v provozu jsou páteční linky 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11 a 13 v jednotném intervalu 30 minut. Výchozí prokladové schéma je uvedeno v příloze D.

Hodnota KMN ve výchozí síti **dosahuje hodnoty 8 409 min²**. To je oproti předchozímu koordinovanému období nepoměrně vysoká hodnota a dalo by se čekat, že při jednotném intervalu na všech páteřních linkách bude koordinace snazší. Nejlépe zkoordinovaným úsekem s provozem více než jedné linky je úsek *Polabiny, Sluneční – Kpt. Bartoše*, kde je hodnota KMN 0 resp. 16 min² v opačném směru. Dále si lze všimnout nízké míry nepravidelnosti v úseku *Karla IV. – Náměstí Republiky* (64 min²).

Ostatní úseky ve výchozím stavu dosahují nepřiměřeně vysoké hodnoty KMN – přes 100 min², některé důležité úseky dokonce dosahují hodnoty přes 500 min² (např. *Poděbradská – Stavařov* nebo odjezdy z *Dukly, náměstí* směr centrum). Maximální hodnoty KMN dosahují odjezdy spojů ze zastávky *Na Drážce* směr centrum města, a sice 700 min². Tak vysokou hodnotu KMN mají na svědomí rozestupy 0-5-25 minut mezi spoji linek 8, 11 a 13. Objektivně tak lze posoudit, že koordinace jízdních řádů v období 6–8 hodin o víkendech ve výchozích jízdních řádech není příliš zvládnuta.

Pro vytvoření nového návrhu nemuselo být využito Řešitele. Vzhledem k tomu, že na toto období má navazovat období 8–19 hodin, je jednodušší vycházet již z navrženého období od 8. hodiny. Kvůli kratší jízdní době je však potřeba zvolit referenční bod, ke kterému mají být časy linek manuálně srovnány dle návazného období tak, aby z této zastávky, pokud možno, odjížděly spoje linek ve stejných minutách v obou částech dne. Tímto bodem byla zvolena zastávka *Masarykovo náměstí*, kudy projíždí většina linek (kromě linky 11). Dále byl uspíšen odjezd linky č. 3 z *Hlavního nádraží* o 1 minutu (sjednocení odjezdů s obdobím 8–19 hodin) a ze zastávky *Lázně Bohdaneč, točna* o 5 minut. To má za následek zvětšení rozestupů mezi linkami 3 a 7, resp. umožnění přestupu z linky 3 na linku 11 na zast. *Globus*. Výřez z výsledku je vyobrazen na obrázku 17. Výsledné schéma je uvedeno v příloze E.



Obrázek 17 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (6–8 h)

Zdroj: (Autor)

Ačkoliv postup zvolený u tohoto období nemusí zaručit lepší výsledek, než který by byl dosažen pomocí Řešitele, je takto zajištěna bezproblémová časová návaznost spojů s následujícím obdobím.

U nově navrženého stavu je dosaženo celkové KMN v síti **2 265 min²**, což je snížení oproti výchozímu stavu o **6 144 min²**. V tabulce 17 je uvedeno srovnání výchozího a nového stavu.

Tabulka 17 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (6–8 h)

Úsek	Úsek	Výchozí		Léto 2017		
		Rozestupy	KMN	Rozestupy	KMN	+/-
Zimní stadion - Stavařov	1	7-1-22-7-1-22	468	13-8-9-13-8-9	28	-440
	2	3-9-18-3-9-18	228	6-11-13-6-11-13	52	-176
Hlavní nádraží - Kpt. Bartoše	3	15-2-13-15-2-13	196	9-10-11-9-10-11	4	-192
	4	2-15-13-2-15-13	196	10-12-8-10-12-8	16	-180
Stavařov - Hradecká - Poděbradská	5	8-22-8-22	196	21-9-21-9	144	-52
	6	3-27-3-27	576	17-13-17-13	16	-560
Polabiny, toč. - Polabiny, Kosmonautů	7	7-23-7-23	256	20-10-20-10	100	-156
	8	27-3-27-3	576	14-16-14-16	4	-572
Kpt. Bartoše - Okrajová/Sluneční	9	15-15-15-15	0	10-20-10-20	100	100
	10	17-13-17-13	16	12-18-12-18	36	20
Hlavní nádraží - Masarykovo náměstí	11	13-2-3-4-8-13-2-3-4-8	164	10-6-1-5-8-10-6-1-5-8	92	-72
	12	9-6-2-9-4-9-6-2-9-4	76	2-10-10-1-7-2-10-10-1-7	148	72
Náměstí Republiky - Karla IV.	13	5-25-5-25	400	6-24-6-24	324	-76
	14	11-19-11-19	64	10-20-10-20	100	36
Masarykovo nám. - Na Spravedlnosti	15	3-10-17-3-10-17	196	10-12-8-10-12-8	16	-180
	16	5-2-23-5-2-23	516	13-5-12-13-5-12	76	-440
U Kostelíčka - Pardubičky, točna	17	30-30	0	30-30	0	0
	18	30-30	0	30-30	0	0
U Kostelíčka - Na Okrouhlíku	19	7-8-15-7-8-15	76	11-6-13-11-6-13	52	-24
	20	5-3-22-5-3-22	436	3-8-19-3-8-19	268	-168
Na Drážce - Na Okrouhlíku/K Nem.	21	0-5-25-0-5-25	700	11-9-10-11-9-10	4	-696
	22	15-2-13-15-2-13	196	7-11-12-7-11-12	28	-168
Dubina, Sever - Dubina, garáže	23	10-5-15-10-5-15	100	11-8-11-11-8-11	12	-88
	24	15-11-4-15-11-4	124	9-11-10-9-11-10	4	-120
Slovany - Na Okrouhlíku	25	30-30	0	30-30	0	0
	26	30-30	0	30-30	0	0
Zborovské nám. - Na Spravedlnosti	27	7-23-7-23	256	17-13-17-13	16	-240
	28	3-27-3-27	576	12-18-12-18	36	-540
Masarykovo nám. - Nám. Republiky	29	7-5-1-2-3-12-7-5-1-2-3-12	164	8-9-1-4-2-6-8-9-1-4-2-6	104	-60
	30	12-1-1-8-1-4-3-12-1-1-8-1-4-3	215	3-7-1-9-1-2-7-3-7-1-9-1-2-7	131	-84
Nám. Republiky - Krajský úřad	31	7-5-3-0-15-7-5-3-0-15	256	8-3-6-5-8-8-3-6-5-8	36	-220
	32	13-1-8-5-3-13-1-8-5-3	176	3-8-10-2-7-3-8-10-2-7	92	-84
Na Spravedlnosti - Dukla, nám.	33	30-30	0	30-30	0	0
Dukla, nám. - Zborovské nám.	34	30-30	0	30-30	0	0
Odjezdy z Globusu směr centrum	35	3-7-20-3-7-20	316	13-13-4-13-13-4	108	-208
Odjezdy z Dukly směr centrum	36	6-1-23-6-1-23	532	10-11-9-10-11-9	4	-528
Odjezdy z centra na Dubinu	37	12-3-3-12-12-3-3-12	162	11-11-2-6-11-11-2-6	114	-48
Celkem			8409		2265	-6144

Zdroj: (Autor)

Celkem bylo **zlepšeno 27 úseků (!)**, **4 úseky se zhoršily** a 6 úseků zůstalo beze změny. Průměrná hodnota zlepšení je o 236 min² a zhoršení o 57 min².

Největší zlepšení proběhlo na těchto podstatných úsecích:

- odjezdy ze sídliště Drážka do centra (-696 min²)
- *Poděbradská – Hradecká – Stavařov* (-560 min²): Linky 3, 7 a 33 směrem do centra,
- *Na Spravedlnosti – Zborovské nám.* (-528 min²): Linky 1 a 7 směrem z centra,
- Odjezdy z *Dukla, nám.* směrem do centra (-528 min²): Linky 5, 6 a 7,
- *Na Spravedlnosti – Masarykovo nám.* (-440 min²): Linky 1, 5 a 7 směrem do centra.

Zhoršení nastalo na těchto úsecích:

- *Kpt. Bartoše – Polabiny, Sluneční* (+100 min²): Linky 6 a 13 směrem z centra,
- *Masarykovo nám. – Hlavní nádraží* (+72 min²): Linky 2, 3, 6, 8/88, 13, 33,
- *Karla IV. – Náměstí Republiky* (+36 min²): Linky 6 a 8 směrem z centra,
- *Polabiny, Sluneční – Kpt. Bartoše* (+20min²): Linky 6 a 13 směrem do centra.

Zhoršení proběhlo převážně na úsecích, které jsou ve výchozí variantě zkoordinovány nejlépe. Ale i toto zhoršení je poměrně zanedbatelné v porovnání s celkovým zlepšením koordinace páteřních linek na celé síti.

Zhoršení na úseku mezi dvěma významnými uzly *Masarykovo nám. – Hlavní nádraží* lze vnímat spíše negativně, ale je potřeba si uvědomit, že je zde provozováno několik dalších doplňkových linek, které vhodnou časovou polohou mohou zkrátit nejdější vzniklé rozestupy mezi spoji páteřních linek.

3.8.3 Víkend léto 2017 (21–23 hodin)

Večerní víkendový provoz se od denní části liší tím, že nejsou v provozu linky 7, 11 a 33. Pouhým odstraněním těchto linek z prokladového schématu pro denní část by vznikly vysoké nepravidelnosti na úsecích, kde jsou provozovány. Provozovány jsou tedy páteřní linky 1, 2, 3, 5, 6, 8 a 13, a to v intervalu 30 min. Dále existuje požadavek na zachování odjezdu linky č. 2 z výchozí zastávky *Pardubičky, točna* ve 22. a 52. minutu, odjezd linky č. 3 ze zastávky *Hlavní nádraží* v 00. a 30. minutu a odjezd linky 5 ze zastávky *Dukla, točna* ve stejné, případně mírně opožděné časové (do cca 5 minut) poloze jako ve výchozím schématu (11. a 41. minuta). Nový návrh je tedy tvořen kompletně pomocí optimalizační metody.

Ve výchozím stavu je **KMN v síti 2 952 min²**. Výchozí prokladové schéma je uvedeno v příloze F.

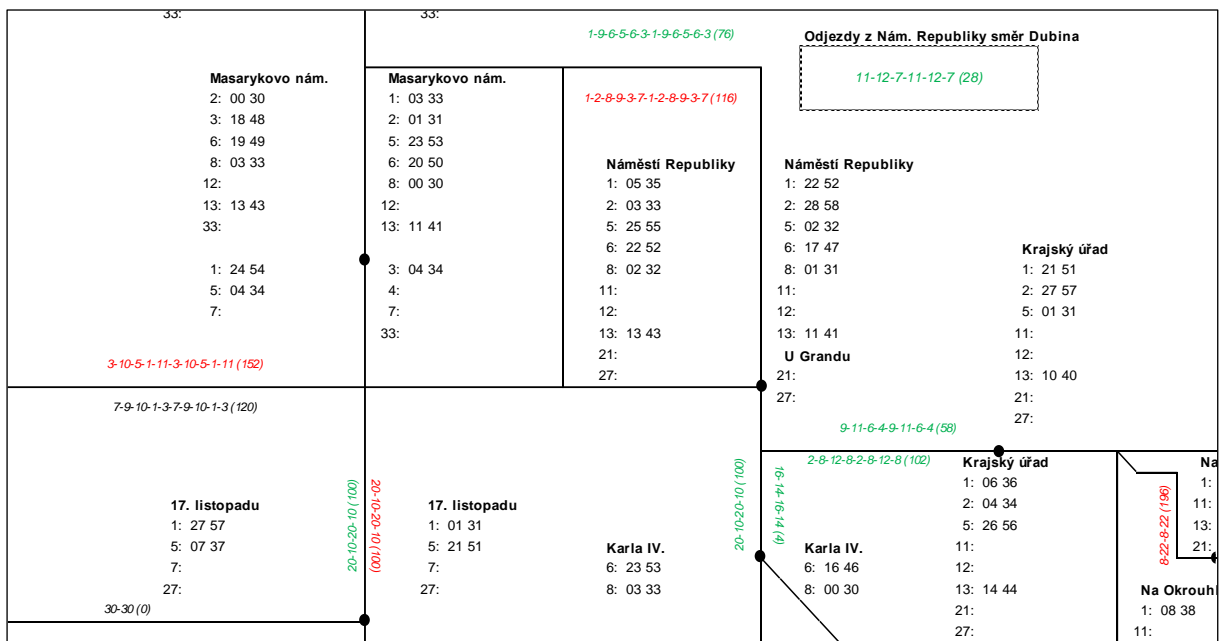
Nejlépe je ve výchozím stavu zkoordinován úsek *Na Spravedlnosti – Masarykovo nám.* (4 min²) a také úsek *Hlavní nádraží – Polabiny, Kpt. Bartoše* (16 min², resp. 36 min² pro opačný směr).

Nejhůřší koordinace linek ve výchozím stavu je ze zastávky *Dukla, točna* směrem do centra, kde linky 5 a 6 odjíždějí v rozmezí 2 minut (676 min²) – to se projevuje i v opačném směru, kdy linky 5 a 6 odjíždějí téměř současně ze zastávky *Masarykovo nám.* směrem na sídliště *Dukla*. Dá se tedy předpokládat, že zlepšením koordinace odjezdů linek 5 a 6 z *Dukly, nám.* bude zlepšena i koordinace v opačném směru.

Dále je ve výchozím stavu špatná koordinace linek 5 a 13 směrem na sídliště Dubina. To se projevuje v úseku *Dubina,garáže – Dubina,Sever* (324 min²). Stejnou hodnotu KMN má i úsek ze zastávky *Drážka* do centra města (linky 8 a 13).

Provedením optimalizace je dosaženo hodnoty KMN v síti 2 140 min², což je zlepšení o 812 min².

Výřez výsledného prokladového schématu je uveden na obrázku 18 a celé prokladové schéma znázorňuje příloha G.



Obrázek 18 Výřez z prokladového schématu z období Víkend (21–23 h)

Zdroj: (Autor)

Přehled změn před a po provedení optimalizace ukazuje tabulka 18.

Tabulka 18 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Víkend (21–23 h)

Úsek	Úsek	Výchozí		Léto 2017		
		Rozestupy	KMN	Rozestupy	KMN	+/-
Zimní stadion - Stavařov	1	30-30	0	30-30	0	0
	2	30-30	0	30-30	0	0
Hlavní nádraží - Kpt. Bartoše	3	10-12-8-10-12-8	16	13-6-11-13-6-11	52	36
	4	10-13-7-10-13-7	36	9-11-10-9-11-10	4	-32
Stavařov - Hradecká - Poděbradská	5	30-30	0	30-30	0	0
	6	30-30	0	30-30	0	0
Polabiny, toč. - Polabiny, Kosmonautů	7	30-30	0	30-30	0	0
	8	30-30	0	30-30	0	0
Kpt. Bartoše - Okrajová/Sluneční	9	12-18-12-18	36	6-24-6-24	324	288
	10	10-20-10-20	100	9-21-9-21	144	44
Hlavní nádraží - Masarykovo náměstí	11	1-7-10-9-3-1-7-10-9-3	120	7-9-10-1-3-7-9-10-1-3	120	0
	12	4-6-8-4-8-4-6-8-4-8	32	3-10-5-1-11-3-10-5-1-11	152	120
Náměstí Republiky - Karla IV.	13	21-9-21-9	144	20-10-20-10	100	-44
	14	18-12-18-12	36	16-14-16-14	4	-32
Masarykovo nám. - Na Spravedlnosti	15	21-9-21-9	144	20-10-20-10	100	-44
	16	16-14-16-14	4	20-10-20-10	100	96
U Kostelíčka - Pardubičky, točna	17	30-30	0	30-30	0	0
	18	30-30	0	30-30	0	0
U Kostelíčka - Na Okrouhlíku	19	10-20-10-20	100	8-22-8-22	196	96
	20	20-10-20-10	100	11-19-11-19	64	-36
Na Drážce - Na Okrouhlíku/K Nem.	21	24-6-24-6	324	20-10-20-10	100	-224
	22	11-19-11-19	64	11-19-11-19	64	0
Dubina, Sever - Dubina, garáže	23	10-20-10-20	100	20-10-20-10	100	0
	24	6-24-6-24	324	18-12-18-12	36	-288
Slovany - Na Okrouhlíku	25	30-30	0	30-30	0	0
	26	30-30	0	30-30	0	0
Zborovské nám. - Na Spravedlnosti	27	30-30	0	30-30	0	0
	28	30-30	0	30-30	0	0
Masarykovo nám. - Nám. Republiky	29	1-3-7-6-4-9-1-3-7-6-4-9	84	1-2-8-9-3-7-1-2-8-9-3-7	116	32
	30	6-11-1-8-0-4-6-11-1-8-0-4	176	1-9-6-5-6-3-1-9-6-5-6-3	76	-100
Nám. Republiky - Krajský úřad	31	3-7-6-14-3-7-6-14	130	2-8-12-8-2-8-12-8	102	-28
	32	11-9-0-10-11-9-0-10	154	9-11-6-4-9-11-6-4	58	-96
Na Spravedlnosti - Dukla, nám.	33	30-30	0	30-30	0	0
Dukla, nám. - Zborovské nám.	34	Žádné spoje		Žádné spoje		0
Odjezdy z Globusu směr centrum	35	30-30	0	30-30	0	0
Odjezdy z Dukly směr centrum	36	2-28-2-28	676	10-20-10-20	100	-576
Odjezdy z centra na Dubinu	37	11-6-13-11-6-13	52	11-12-7-11-12-7	28	-24
Celkem			2952		2140	-812

Zdroj: (Autor)

Celkem bylo **zlepšeno 12 úseků**, **7 úseků se zhoršilo** a 18 úseků zůstalo beze změny. Průměrná hodnota zlepšení je o 127 min² a zhoršení o 102 min².

Největší **zlepšení** proběhlo na těchto úsecích:

- Odjezdy z *Dukla, nám.* směrem do centra (-576 min²): Linky 5 a 6,
- Dubina, garáže – Dubina, Sever (-288 min²): Linky 5 a 13,
- odjezdy ze sídliště Drážka do centra (-224 min²): Linky 8 a 13.

Podle předpokladu také byla zlepšena koordinace linek 5 a 6 ze zastávky Masarykovo nám. směrem na sídliště Dukla. Rozestupy mezi spoji se zlepšily z 1-29 min na 14-16 min. Ačkoliv tento směr není zahrnut do hodnocených úseků, na toto zlepšení je potřeba upozornit.

Zhoršení nastalo na těchto úsecích:

- *Kpt. Bartoše – Polabiny, Sluneční* (+288 min²): Linky 6 a 13 směrem z centra,
- *Masarykovo nám. – Hlavní nádraží* (+120 min²): Linky 2, 3, 6, 8, 13,
- *U Kostelíčka – Na Okrouhliku* (+96 min²): Linky 1 a 13 směrem z centra,
- *Na Spravedlnosti – Masarykovo nám* (+96 min²): Linky 1 a 5 směrem do centra.

Vzhledem k tomu, že v tomto období je specifikován požadavek na odjezd linek ze tří zastávek, je provedeno jednoduché porovnání, jak by bylo pomocí navržené metody vytvořeno prokladové schéma bez těchto omezení.

Rekapitulace požadavků na odjezdy linek z výchozích zastávek:

- Linka 2 ze zastávky *Pardubičky, točna* ve 22, 52,
- linka 3 ze zastávky *Hlavní nádraží* v 00, 30,
- linka 5 ze zastávky *Dukla, točna* v 11, 41 (max. + 5 minut).

Prokladové schéma mělo po provedení optimalizace celkovou kvadratickou míru nepravdivosti v síti **2 140 min²**. Pokud by byly tyto podmínky zanedbány a Řešitel by mohl libovolně nastavit vyjmenované odjezdy, došlo by pouze k nepatrnému zlepšení na hodnotu KMN **1 984 min²** (rozdíl 156 min²). V případě, že by bylo specifikováno více odjezdů, lze předpokládat, že by toto zlepšení bylo mnohem znatelnější.

Odjezdy by byly modelem bez zohlednění výše uvedených požadavků nastaveny takto:

- Linka 2 ze zastávky *Pardubičky, točna* ve 10, 40 (spoje „ujíždí“ o 12 minut),
- linka 3 ze zastávky *Hlavní nádraží* v 22, 52 (spoje „ujíždí“ o 8 minut),
- linka 5 ze zastávky *Dukla, točna* v 05, 35 (spoje „ujíždí“ o 6 minut).

To dokazuje, že v případě požadavků na odjezdy linek v konkrétní časy je nutné tyto požadavky zahrnout již do omezujících podmínek matematického modelu. V praxi se mnohdy takové požadavky objevují (přípoje k vlakům, návoz zaměstnanců, ...) a tvoří vstupy pro navrženou metodu. Proto je nutno s formulací podobných dodatečných omezujících podmínek při řešení úloh v praxi počítat a mít na paměti možný negativní vliv na výsledné řešení. Pro zobecnění tohoto vlivu by bylo potřebné statisticky zkoumat více variant řešení.

3.8.4 Pracovní den – prázdniny 2017 (8–13 hodin)

Posledním optimalizovaným obdobím je dopolední sedlo pracovního dne o letních prázdninách 2017. Do optimalizace jsou zahrnuty navíc linky 4 a 27. Uvažovány tedy jsou linky 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8/88, 11, 13, 27 a 33. Interval 15 minut je zaveden na linkách 1, 2, 5, 6, 8/88 a 13, linky 3, 4, 7, 11 a 33 jsou provozovány v intervalu 30 minut a linka 27 v intervalu 60 minut. Linky jsou tedy provozovány v polojednotném intervalu (15/30/60 minut).

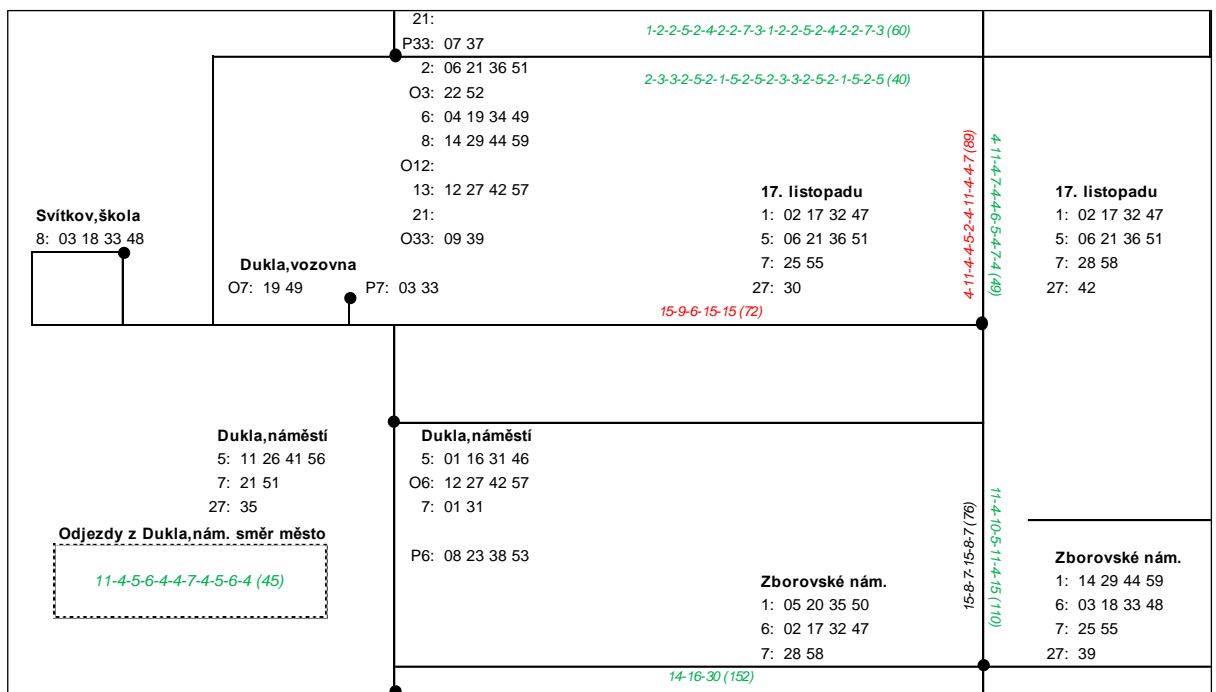
Výchozí stav KMN v síti je 3 235 min². Prokladové schéma výchozího stavu je uvedeno v příloze H.

Nejlepší koordinace páteřních linek lze opět nalézt v Polabinách v úseku *Kpt. Bartoše – Sluneční* a zpět (18 min² resp. 2 min²).

Nejhůře zkoordinovaným úsekem je úsek *Zborovské náměstí – Na Spravedlnosti* (282 min²).

Po provedení optimalizace bylo v síti **dosaženo hodnoty KMN 2 597 min² (zlepšení o 638 min²).**

Výřez výsledného schématu je uveden na obrázku 19. Kompletní výsledné schéma lze vidět v příloze I.



Obrázek 19 Výřez z prokladového schématu z období Prázdniny 2017 (8–13 h)

Zdroj: (Autor)

Přehled hodnocení jednotlivých úseků ukazuje tabulka 19.

Tabulka 19 Srovnání koordinace linek před a po optimalizaci – Prázdniny 2017 (8–13 h)

Úsek	Úsek	Výchozí		Léto 2017		
		Rozestupy	KMN	Rozestupy	KMN	+/-
Zimní stadion - Stavařov	1	5-1-9-6-9-5-1-9-6-9	88	1-12-3-10-4-1-12-3-10-4	180	92
	2	2-5-9-1-13-2-5-9-1-13	200	0-10-5-5-10-0-10-5-5-10	140	-60
Hlavní nádraží - Kpt. Bartoše	3	6-2-7-6-2-7-6-2-7-6-2-7	56	6-5-4-6-5-4-6-5-4-6-5-4	8	-48
	4	2-7-6-2-7-6-2-7-6-2-7-6	56	6-7-2-6-7-2-6-7-2-6-7-2	56	0
Stavařov - Hradecká - Poděbradská	5	5-10-15-5-10-15	100	12-13-5-12-13-5	76	-24
	6	5-10-15-5-10-15	100	10-10-10-10-10-10	0	-100
Polabiny, toč. - Polabiny, Kosmonautů	7	5-11-4-10-5-11-4-10	74	7-8-7-8-7-8-7-8	2	-72
	8	10-5-10-5-10-5-10-5	50	6-9-7-8-6-9-7-8	10	-40
Kpt. Bartoše - Okrajová/Sluneční	9	6-9-6-9-6-9-6-9	18	6-9-6-9-6-9-6-9	18	0
	10	7-8-7-8-7-8-7-8	2	7-8-7-8-7-8-7-8	2	0
Hlavní nádraží - Masarykovo náměstí	11	2-4-2-0-7-2-4-2-0-7-2-4-2-0-7	112	2-3-3-2-5-2-1-5-2-5-2-3-3-2-5-2-1-5-2-5	40	-72
	12	1-1-5-2-6-1-1-5-2-6-1-1-5-2-6-1-1-5-2-6	88	1-2-2-5-2-4-2-2-7-3-1-2-2-5-2-4-2-2-7-3	60	-28
Náměstí Republiky - Karla IV.	13	9-6-9-6-9-6-9-6	18	5-10-5-10-5-10-5-10	50	32
	14	9-6-9-6-9-6-9-6	18	9-6-9-6-9-6-9-6	18	0
Masarykovo nám. - Na Spravedlnosti	15	5-10-5-3-5-2-5-10-5-3-7	69	4-11-4-4-5-2-4-11-4-4-7	89	20
	16	9-5-10-5-1-9-3-2-10-5-1	125	4-11-4-7-4-4-6-5-4-7-4	49	-76
U Kostelíčka - Pardubičky, točna	17	15-15-15-4-11	92	15-15-5-10-15	80	-12
	18	15-8-7-15-15	68	9-6-15-15-15	72	4
U Kostelíčka - Na Okrouhlíku	19	3-9-3-3-12-3-9-3-12	144	4-6-5-4-11-4-6-5-4-11	68	-76
	20	3-6-6-3-12-3-6-6-3-12	108	7-3-5-7-8-7-3-5-7-8	32	-76
Na Drážce - Na Okrouhlíku/K Nem.	21	9-2-4-11-4-9-2-4-11-4	116	1-4-11-4-10-1-4-11-4-10	148	32
	22	13-2-7-6-2-13-2-7-6-2	164	2-8-5-2-13-2-8-5-2-13	172	8
Dubina, Sever - Dubina, garáže	23	6-15-9-6-15-9	84	5-15-10-5-15-10	100	16
	24	15-9-6-15-9-6	84	10-5-15-10-5-15	100	16
Slovany - Na Okrouhlíku	25	15-15-15-15	0	15-15-15-15	0	0
	26	15-15-15-15	0	15-15-15-15	0	0
Zborovské nám. - Na Spravedlnosti	27	15-1-12-2-15-1-14	282	11-4-10-5-11-4-15	110	-172
	28	15-8-7-15-8-7	76	15-8-7-15-8-7	76	0
Masarykovo nám. - Nám. Republiky	29	3-2-4-1-1-4-3-2-4-1-1-4-3-2-4-1-1-4-3-2-4-1-1-4	38	2-2-3-1-1-6-2-2-3-1-1-6-2-2-3-1-1-6-2-2-3-1-1-6	70	32
	30	2-0-4-3-3-3-2-0-1-3-3-3-2-0-4-3-3-3-2-0-1-3-3-3-3	38	0-1-3-6-1-3-1-0-1-3-6-1-4-0-1-3-6-1-3-1-0-1-3-6-1-4	102	64
Nám. Republiky - Krajský úřad	31	1-5-3-6-1-2-3-3-6-1-5-3-6-1-2-1-2-3-6	67	4-4-1-1-5-4-4-1-6-4-4-1-1-4-1-4-4-1-6	59	-8
	32	0-7-3-5-0-1-6-1-2-5-0-7-3-5-0-1-6-3-5	115	7-3-1-0-4-5-2-4-0-4-7-3-1-0-4-7-4-0-4	103	-12
Na Spravedlnosti - Dukla, nám.	33	15-8-7-15-15	68	15-9-6-15-15	72	4
	34	12-18-30	168	14-16-30	152	-16
Odjezdy z Globusu směr centrum	35	5-5-10-10-5-5-10-10	50	3-10-10-7-3-10-10-7	66	16
Odjezdy z Dukly směr centrum	36	3-12-3-4-8-3-1-11-3-4-8	135	11-4-5-6-4-4-7-4-5-6-4	45	-90
Odjezdy z centra na Dubinu	37	2-7-6-2-13-2-7-6-2-13	164	2-8-5-2-13-2-8-5-2-13	172	8
Celkem			3235		2597	-638

Zdroj: (Autor)

Celkem bylo **zlepšeno 17 úseků**, **13 úseků se zhoršilo** a 7 úseků zůstalo beze změny. Průměrná hodnota zlepšení je o 58 min² a zhoršení o 27 min².

Největší **zlepšení** proběhlo na těchto úsecích:

- *Zborovské nám. – Na Spravedlnosti* (-172 min²): Linky 1, 7 a 27 směrem do centra,
- *Poděbradská – Hradecká – Stavařov* (-100min²): Linky 3, 7 a 33 směrem do centra,
- *Odjezdy z Dukly, nám.* do centra (-90 min²): Linky 5, 6, 7 a 27 směrem do centra.
- *U Kostelíčka – Na Okrouhlíku* a zpět (-76 min²): Linky 1, 11 a 13 v obou směrech,

Největší **zhoršení** nastalo na těchto úsecích:

- *Zimní stadion – Stavařov* (+92 min²): Linky 3, 4, 7, 11 a 33 směrem do Polabin,
- *Náměstí Republiky – Masarykovo nám* (+64 min²): Linky 1, 2, 5, 6, 8/88 a 13.

Tyto úseky jsou ale zanedbatelné, a to proto, že úsek mezi zastávkami *Zimní stadion* a *Stavařov* je v rámci optimalizace hodnocen vahou 0 (krátký úsek, linky pokračují jiným

směrem) a v úseku *Náměstí Republiky – Masarykovo nám.* je provozováno větší množství linek než na jiných úsecích.

Na ostatních zhoršených úsecích došlo k navýšení KMN v důsledku posunu odjezdů linek obsluhujících daný úsek vůči sobě o jednu minutu (hodnoty zvýšení KMN o 4–32 min² v závislosti na počtu spojů a původní koordinaci). Takových úseků je poměrně hodně, ovšem takové zhoršení lze považovat za bezvýznamné, jestliže je dosaženo lepší koordinace linek v rámci celé sítě.

4 ZHODNOCENÍ

Kapitola hodnotí navrženou metodu síťové koordinace páteřních linek a její implementaci do praxe u DPMP.

4.1 Zhodnocení optimalizační metody

V podkapitole jsou zhodnoceny možnosti využití navržené metody síťové koordinace páteřních linek a zkušenosti s tvorbou prokladového schématu a nastavování modelu.

4.1.1 Možnosti využití metody

Metoda je využitelná v jakémkoliv systému veřejné hromadné dopravy, který je provozován v periodickém režimu. Formulace byla provedena s ohledem na MHD, ale po patřičných úpravách je použitelný i v jiných subsystémech.

Optimalizační model lze využít pro **optimalizaci** již stávajících jízdních řádů, případně pro **návrh** zamýšlených jízdních řádů na nové nebo modifikované síti linek.

Základní varianta modelu umožňuje koordinovat časovou polohu spojů periodických linek na společných úsecích. Vhodnou formulací omezujících podmínek je metoda schopna v určité míře **koordinovat linky jak na úsecích, tak i v přestupních uzlech**.

Je nutno dodat, že **metoda nezaručuje ideální časovou koordinaci linek** v síti. Tou idealitou je myšlena nulová nebo téměř nulová nepravidelnost na všech úsecích sítě. Výsledky dosažené navrženou metodou jsou závislé na matematické podstatě optimalizované sítě linek za daných linkových intervalů. V případě špatné koordinovatelnosti linek je možné uvažovat o změně linkového vedení. Potřeba měnit linkové vedení není přímo identifikována navrženou metodou, ale až řešitelem problému v případě, kdy bude mít problémy s koordinací linek na dané síti.

4.1.2 Tvorba schématu a nastavení optimalizačního modelu

Samotné sestavení prokladového schématu v Excelu včetně všech souvisejících kroků (selekce linek, úseků apod.) je **časově náročnější** a je nutné dbát na **kontrolu správného propojení vzorců**.

Při nastavování modelu je nutné dbát **správného nastavení všech proměnných** – do modelu zahrnout jen proměnné, které jsou v rámci řešeného příkladu potřebné a každé proměnné nastavit rozsah hodnot, které může nabývat.

V případě, že by byl pro koordinaci linek vytvořen specializovaný program, mohly by tvorba sítě a nastavování optimalizačního modelu být pro řešitele problému uživatelsky přívětivější např. díky intuitivnímu grafickému rozhraní, které by umožňovalo tvorbu této sítě a zadávání dat přímo do sítě nebo pomocí formulářů. Vytvoření takového software ale patří do oboru informatiky, a tak není v rámci této diplomové práce řešeno. Diplomová práce však může poskytnout přehled o obsahu případně vzniklého software a ověřuje funkčnost navrhovaných řešení.

4.1.3 Rozdíly oproti metodě KOS

Vzhledem k jistým podobným znakům navržené metody s metodou KOS je zde na místě provést přehled základních rozdílů obou metod. Srovnání s ostatními metodami uváděnými v kapitole 1 není nutné z důvodu jejich izolovaného přístupu (optimalizace pouze na jednom úseku, nikoliv v celé síti).

Zásadním rozdílem navržené metody oproti metodě KOS je, že KOS určuje časové polohy jednotlivých spojů, kdežto navržená metoda klade důraz právě na pravidelnost každé linky. Ve výsledku lze říci, že **navrhovaná metoda má méně proměnných**, jelikož odjezdy dalších spojů jsou dány právě linkovým intervalem. To optimalizační problém značně zjednodušuje.

Metoda **KOS** je prezentována pouze jako optimalizační metoda **pro koordinaci na společných úsecích**. Navržená metoda dokáže zohlednit i **přestupní vazby**, a tak lze navrženou metodu považovat za metodu koordinace na společných úsecích a v uzlech.

Odlišný je **použitý algoritmus**, kdy KOS využívá jednotkové posuny a navržená metoda EA.

Pro svoji správnou funkci potřebuje **KOS výchozí množinu spojů**, kdežto v **navržené metodě** síťové koordinace páteřních linek, která je řešena pomocí EA, **stačí zadat pouze požadované linkové intervaly** a konečná množina spojů je vytvořena pomocí algoritmu.

Výhoda navržené metody se projeví při řešení **složitých koordinačních problémů** v systému páteřních linek veřejné dopravy, které jsou provozovány v periodickém režimu.

Naopak **KOS bude vynikat v koordinaci jednotlivých spojů**, případně v koordinaci jednotlivých spojů **při přechodu mezi dvěma různými koordinačními obdobími**.

4.2 Zhodnocení implementace do praxe

Koordinace páteřních linek navržené v této diplomové práci byly v praxi uplatněny pouze o letních prázdninách roku 2017. Na začátku nového školního roku 2017/2018 se o víkendech přešlo zpět k výchozí verzi, kde jsou linky provozovány v intervalu 20/30 min. Návrh jízdních řádů pro nový školní rok nebyl touto prací řešen. Víkendový jízdní řád s důrazem na koordinaci páteřních linek vstoupil v platnost až 10. 12. 2017 a byly v něm již zahrnuty požadavky pro prodloužení trolejbusových tratí, které proběhlo 4. 3. 2018.

Během doby platnosti jízdních řádů vytvořených pomocí navržené metody (léto 2017) nebyly zaznamenány žádné stížnosti týkající se koordinace páteřních linek ani omezeného počtu spojů o víkendech. To lze přisoudit tomu, že na vytížených úsecích došlo k rovnoměrnějšímu rozložení spojů a odstranily se i některé souběhy spojů více linek jedoucích stejným směrem. Tento poznatek byl poté využit v jízdních rádech od 10. 12. 2017, kdy došlo ke kompromisnímu řešení při šetření lidských zdrojů a byly zavedeny „špičky“ a „sedla“ i během víkendového dne. Takovéto opatření ovšem musí být prováděno s přihlédnutím k dopravním průzkumům, aby nedošlo ke kapacitním problémům či přílišnému snížení kvality poskytovaných služeb (přeplněnost spojů).

4.2.1 Porovnání optimalizovaných období

Celkový přehled změn jednotlivých koordinačních období zavedených do praxe uvádí tabulka 20.

Tabulka 20 Přehled změn u jednotlivých navržených období

Období	Kvadratická míra nepravidelnosti [min ²]			Zlepšení / zhoršení úseků						
	Výchozí	Nový	Zlepšení	Počet zlepšení	Hodnota zlepšení [min ²]	Průměr zlepšení [min ²]	Počet zhoršení	Hodnota zhoršení [min ²]	Průměr zhoršení [min ²]	Beze změny
Víkend 8–19	3 885	1 979	-1 906	19	-2 340	-123	12	434	36	6
Víkend 6–8	8 409	2 265	-6 144	27	-6 372	-236	4	228	57	6
Víkend 21–23	2 952	2 140	-812	12	-1 524	-127	7	712	102	18
Pracovní den 8–13	3 235	2 597	-638	17	-982	-58	13	344	26	7

Zdroj: (Autor)

Nejvýraznější změnou napříč všemi posuzovanými obdobími je koordinace páteřních linek v časovém období 6–8 hodin o víkendu v létě 2017. Takto překvapivý výsledek ovšem nelze přisoudit pouze aplikaci metody. Prokladové schéma naznačuje, že výchozí stav nebyl připraven příliš pečlivě.

Dále významné zlepšení nastalo o letních víkendech v době 8–19 hodin. Zde došlo ke zlepšení koordinace páteřních linek na základě sjednocení linkových intervalů na 30 min. Ačkoliv došlo k prodloužení intervalů na páteřních linkách, byly tyto linky lépe koordinovatelné. Tím došlo k odstranění vznikajících souběhů spojů a hodnota KMN výrazně klesla.

U zbývajících dvou období (víkend 21–23 h, pracovní den 8–13 h), by se provedená optimalizace dala označit jako přiměřená.

Z tabulky 20 lze vypožorovat, že optimalizace probíhá na úkor zhoršení koordinace linek na některých úsecích v síti – vždy došlo ke zhoršení alespoň některých úseků. Pro celkové hodnocení je však důležité, na kterých úsecích a o jakou hodnotu KMN ke zhoršení došlo. Obecně lze usoudit, že toto lze ovlivnit přidělením vah jednotlivým úsekům.

4.2.2 Vlastnosti sítě linek DPMP ve vztahu k implementaci metody

Síť páteřních linek DPMP se vyznačuje tím, že většina úseků je obsluhována více linkami. Linky zkoordinované v jednom úseku se následně směrově dělí a vstupují do jiných úseků, kde by měly být zkoordinovány s jinými linkami, jež jsou již zkoordinovány z jiného úseku. Tak vznikají koordinační trojúhelníky, zejména mezi sídlišti Dubina, Dukla a Polabiny (linky 5, 6 a 13). Pokud je v koordinaci linka 6 s linkou 13, je pak velmi náročné najít časovou polohu např. linky 8 tak, aby byla zkoordinována s těmito linkami v různých úsecích sítě. To znamená jediné – vznik kompromisů v koordinacích páteřních linek. Pro optimální nastavení takových kompromisů se navržená metoda jeví jako vhodná.

4.2.3 Využitelnost v jiných sítích

Využitelnost metody pro koordinaci páteřních linek v jiných sítích je možná, pokud jsou splněny předpoklady pro užití metody (zejména provoz linek v pravidelných intervalech). Podstatné však je vytvořit nový model sítě linek daného systému a formulovat omezující podmínky pro tento systém.

4.3 Závěr zhodnocení

Navržená metoda byla úspěšně ověřena v pravidelném provozu. Také poznatky a optimalizační pomůcky vytvořené při řešení optimalizačních návrhů v rámci této diplomové práce jsou nadále využívány osobami odpovědnými za návrh JŘ při sestavování nových jízdních řádů v Dopravním podniku města Pardubic a.s.

ZÁVĚR

Jak z textu práce vyplývá, časová koordinace linek veřejné hromadné dopravy je důležitou otázkou při procesu plánování dopravy a je rozhodně nutné se při sestavování nových jízdních řádů v jakémkoliv takovém provozu této otázce detailně věnovat.

Při zanedbání přípravy jízdních řádů reálně hrozí plýtvání zdroji (v době vzniku diplomové práce je vážným tématem především nedostatek lidských zdrojů). V provozu s intervalovým režimem lze toto ovlivnit i vhodnou koordinací mezi končícími a začínajícími spoji v konečné stanici. Pokud nevznikají při obratech zbytečné prostoje vozidel, je efektivita využití zdrojů vyšší (méně nasazených vozidel a řidičů na lince). V různých systémech mohou vznikat další specifické požadavky a je nutné pro ně vytvářet „ad-hoc“ omezující podmínky. Zohlednění požadavků zpravidla znamená jistá omezení v koordinaci při manipulaci s odjezdy spojů linky a může se to také promítnout v časové koordinaci všech linek v rámci celé sítě dopravního provozu. Celkové řešení jízdního řádu je tedy kompromisem mezi efektivním využitím zdrojů a časovou koordinací linek.

V podmínkách provozů MHD v České republice není autorovi práce známa žádná zmínka o specializovaném software, který by navrhoval časové polohy spojů s ohledem na koordinaci v uzlech a na úsecích. To zůstává nadále v režii technika jízdních řádů.

Pro návrh časové koordinace linek veřejné hromadné dopravy v uzlech a na úsecích existují metody, které jsou však zpravidla aplikovatelné pouze v izolovaných případech. V rámci celosíťové koordinace jízdních řádů (neperiodických) linek je dobře využitelná metoda KOS.

Metoda síťové koordinace páteřních linek navržená touto prací se výborně uplatnila při návrhu jízdních řádů pro Dopravní podnik města Pardubic a.s. (periodický provoz) a lze předpokládat, že by uplatnění mohla najít v dalších systémech (městské) hromadné dopravy s periodickým provozem linek – s tím se lze setkat téměř v každém systému veřejné hromadné dopravy v ČR i zahraničí, jelikož pravidelná doprava je v dnešní době trendem.

Přínosem této práce je návrh efektivní optimalizační metody pro časovou koordinaci páteřních linek ve veřejné hromadné dopravě, která je relativně jednoduše aplikovatelná v praxi prostřednictvím běžně dostupných a nesespecializovaných prostředků (MS Excel). Tím **byl kompletně naplněn cíl práce** stanovený v úvodu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČERNÁ, Anna a ČERNÝ, Jan. *Manažerské rozhodování o dopravních systémech*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-849-7.
2. BULÍČEK, Josef. *Systémová analýza: studijní opora*. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2013. ISBN 978-80-7395-630-1.
3. PÍŠA, Pavel. Audit přepravních potřeb cestujících vzhledem k formě obslužnosti zastávek MHD v Pardubicích. *Bakalářská práce (zpracovávána současně s touto diplomovou prací)*. Pardubice : Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018.
4. Microsoft. Návod a školení k Microsoft Office. *Podpora Office*. [Online] 2017. [Citace: 10. listopad 2017.] <https://support.office.com>.
5. NECKÁŘ, Jan. Simplexová metoda. *Algoritmy.net*. [Online] 2016. [Citace: 20. leden 2018.] <https://www.algoritmy.net/article/1416/Simplexova-metoda>.
6. DOMEOVÁ, Ludmila. Gradientní metody. *Česká zemědělská univerzita v Praze – Provozně ekonomická fakulta*. [Online] 27. březen 2007. [Citace: 20. leden 2018.] http://pef.czu.cz/~domeova/EMMISYI/prednasky/p3_gradientni.ppt.
7. KALÁTOVÁ, Eva a DOBIÁŠ, Jaroslav. Evoluční algoritmy. *Západočeská univerzita v Plzni: Fakulta aplikovaných věd*. [Online] Katedra informatiky a výpočetní techniky, 2000. [Citace: 12. prosinec 2017.] http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/gen_alg2/E_alg.htm.
8. ČERNÁ, Anna. Optimalizace periodické dopravní nabídky. *Scientific papers of the University of Pardubice. Series B*. 1998, 4.
9. ČERNÝ, Jan a KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava : Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1991. ISBN 80-224-0099-8.
10. TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace technologických procesů*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita/Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-248-3269-2.
11. KOZEL, Petr. Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy na úsecích dopravní sítě. *Perner's Contacts*. Ročník šestý, číslo I., 15. duben 2011, 21.
12. FS Software s.r.o. Skeleton. *FS Software s.r.o.* [Online] 2018. [Citace: 22. leden 2018.] <https://www.fssoftware.cz/skeleton.html>.
13. CHAPS spol. s r.o. SOCRET. *CHAPS*. [Online] [Citace: 22. leden 2018.] <https://www.chaps.cz/cs/products/SOCRET>.

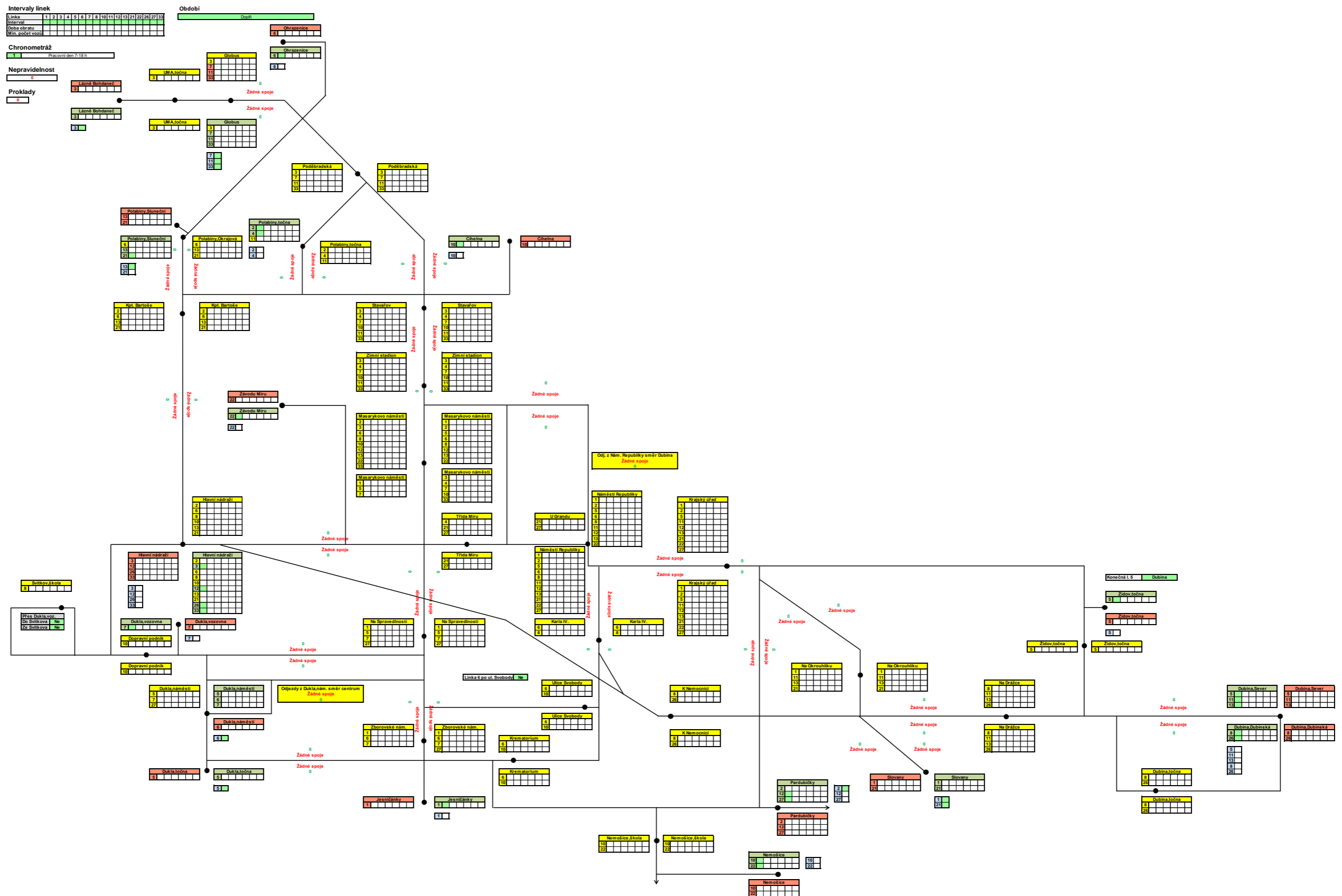
14. **PTT Software, s.r.o.** Plánování jízdnicích řádů. *PTT Software, s.r.o.* [Online] 2018. [Citace: 22. leden 2018.] <http://www.pttsoftware.eu/cs/produkty/system-pro-planovani-dopravy/planovani-jizdnich-radu>.
15. **JANATA, Domink.** Prostředí pro tvorbu jízdnicích řádů. *Bakalářská práce.* Praha : Univerzita Karlova v Praze – Matematicko-fyzikální fakulta, 2014.
16. **LÁBSKY, Viliam.** Analýza a návrh změn jízdnicích řádů Dopravní společnosti Zlín-Otrokovice, s.r.o. *Bakalářská práce.* Pardubice : Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, 2016.
17. **Nařízení vlády č. 589/2006 Sb. , kterým se stanoví odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě.**
18. **LASÁK, Pavel.** Vlastní funkce - Excel VBA. *Jak na Excel.* [Online] 20. duben 2013. [Citace: 10. listopad 2017.] <http://office.lasakovi.com/excel/vba-funkce-vzorce/vlastni-funkce-excel-VBA/>.
19. **Dopravní podnik města Pardubic a.s.** Zastávkové jízdnicí řády. *Dopravní podnik města Pardubic a.s.* [Online] 2017. [Citace: 5. září 2017.] <http://www.dpmp.cz/zastavkove-jizdni-rady/>.
20. **IDOS.** Vývěsné jízdnicí řády. *Městská hromadná doprava Pardubice.* [Online] CHAPS spol. s r. o., 2017. [Citace: 24. listopad 2017.] <http://portal.idos.cz/IDS/Search.aspx?param=pacz>.
21. **PODIVÍN, Ladislav.** Osobní konzultace. Dopravní podnik města Pardubic a.s. : Teplého 2141, 532 20 Pardubice, 22. listopad 2017.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Náhled prokladového schématu linek DPMP	105
Příloha B Síťová grafika: Víkend 8–19 hodin (Výchozí stav)	106
Příloha C Síťová grafika: Víkend 8–19 hodin (Stav v létě 2017).....	107
Příloha D Síťová grafika: Víkend 6–8 hodin (Výchozí stav)	108
Příloha E Síťová grafika: Víkend 6–8 hodin (Stav v létě 2017).....	109
Příloha F Síťová grafika: Víkend 21–23 hodin (Výchozí stav).....	110
Příloha G Síťová grafika: Víkend 21–23 hodin (Stav v létě 2017)	111
Příloha H Síťová grafika: Pracovní den, prázdniny 8–13 hodin (Výchozí stav).....	112
Příloha I Síťová grafika: Pracovní den, prázdniny 8–13 hodin (Stav v létě 2017).....	113
Příloha J Ukázkové prokladové schéma ve formátu *.xlsm (přiloženo na CD)	

PŘÍLOHY

Příloha A Náhled prokladového schématu linek DPMP

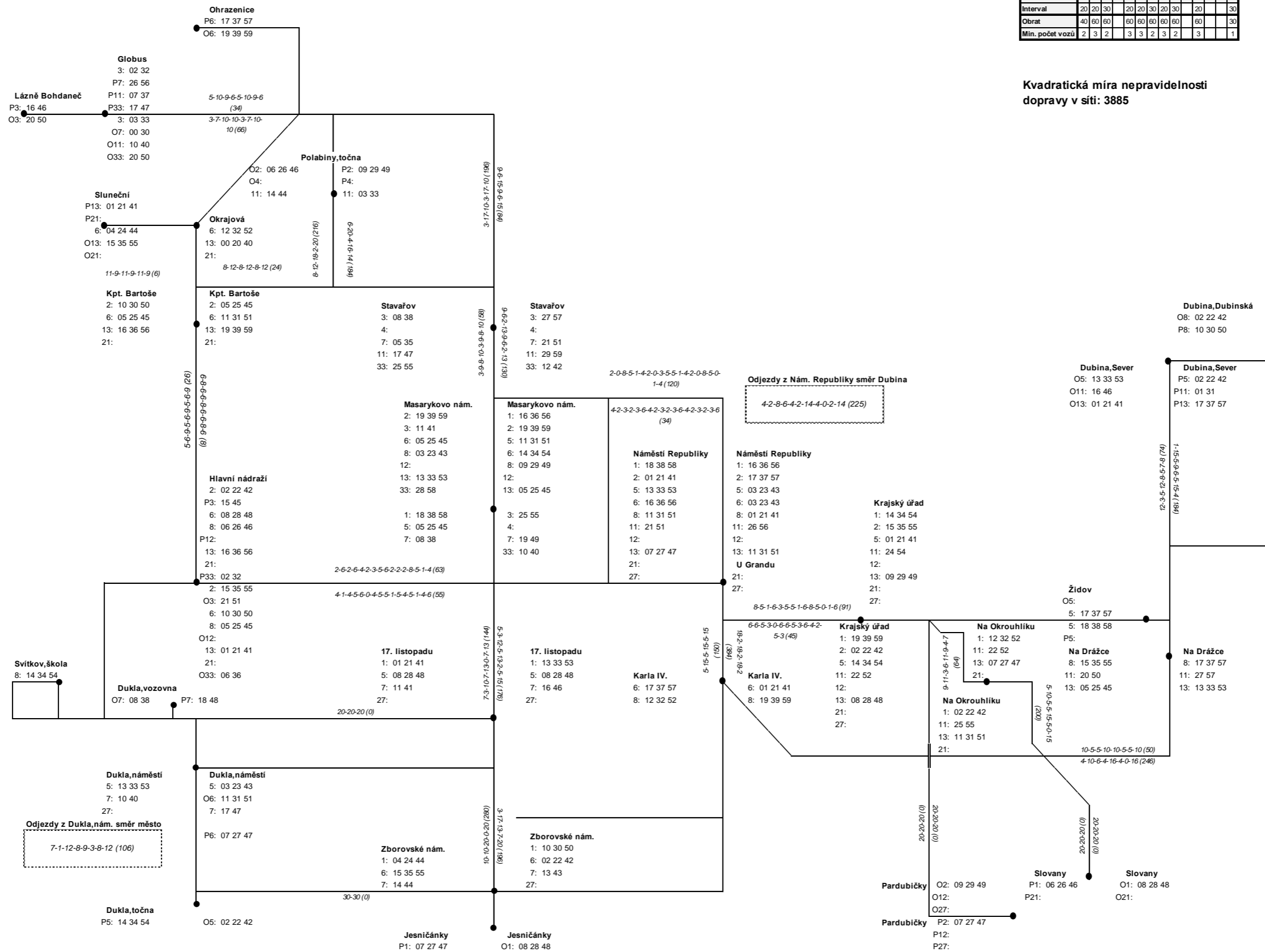


Zdroj: (Autor)

Příloha B Síťová grafika: Víkend 8–19 hodin (Výchozí stav)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	20	20	30	20	20	30	20	30	20	30	20	30	20	30
Obrat	40	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	30
Min. počet vozů	2	3	2	2	3	3	2	3	2	3	2	3	3	1

Kvadratická míra nepravidelnosti dopravy v síti: 3885

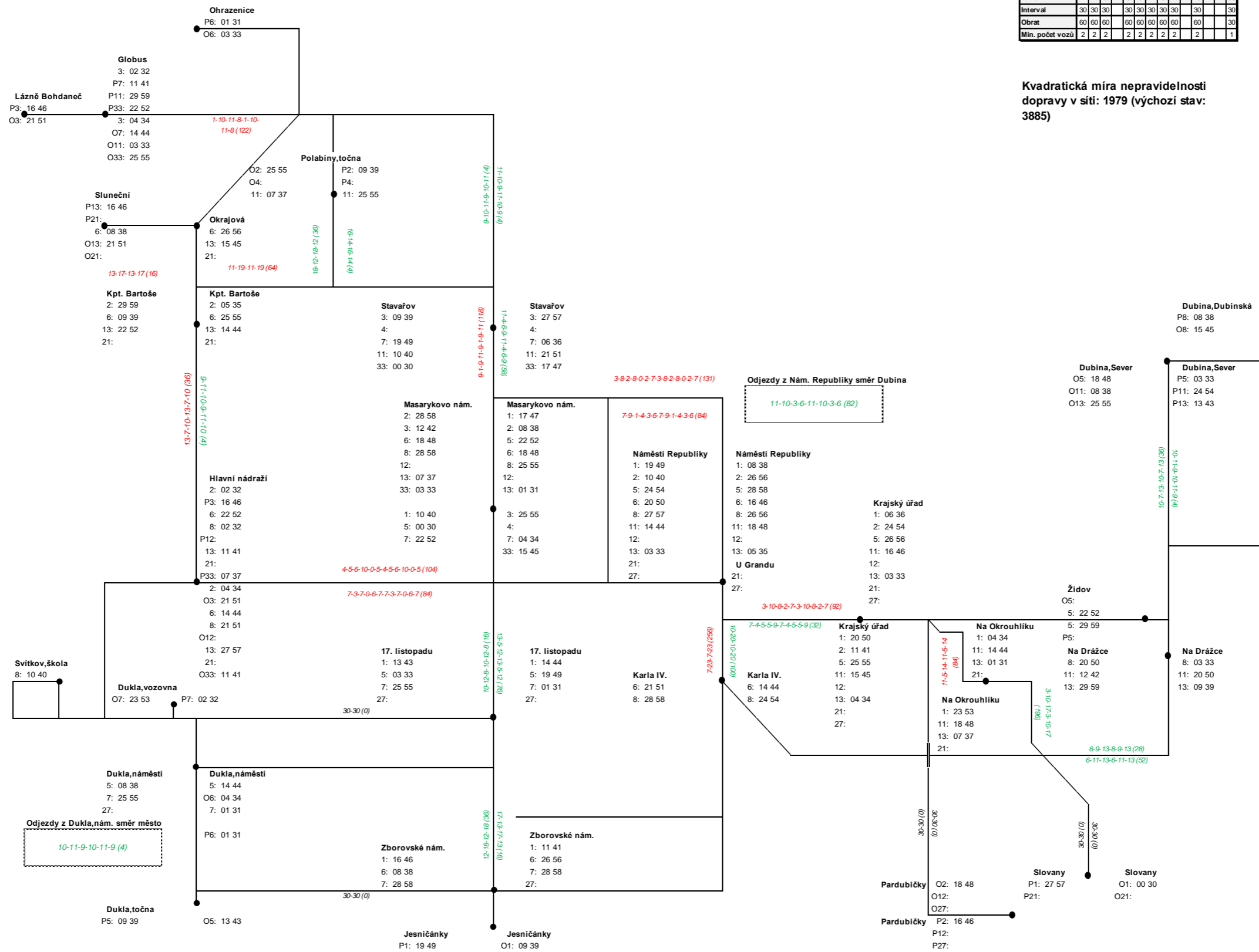


Zdroj: (Autor)

Příloha C Síťová grafika: Víkend 8–19 hodin (Stav v létě 2017)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Obrat	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Min. počet vozů	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1

Kvadratická míra nepravidelnosti
dopravy v síti: 1979 (výchozí stav:
3885)

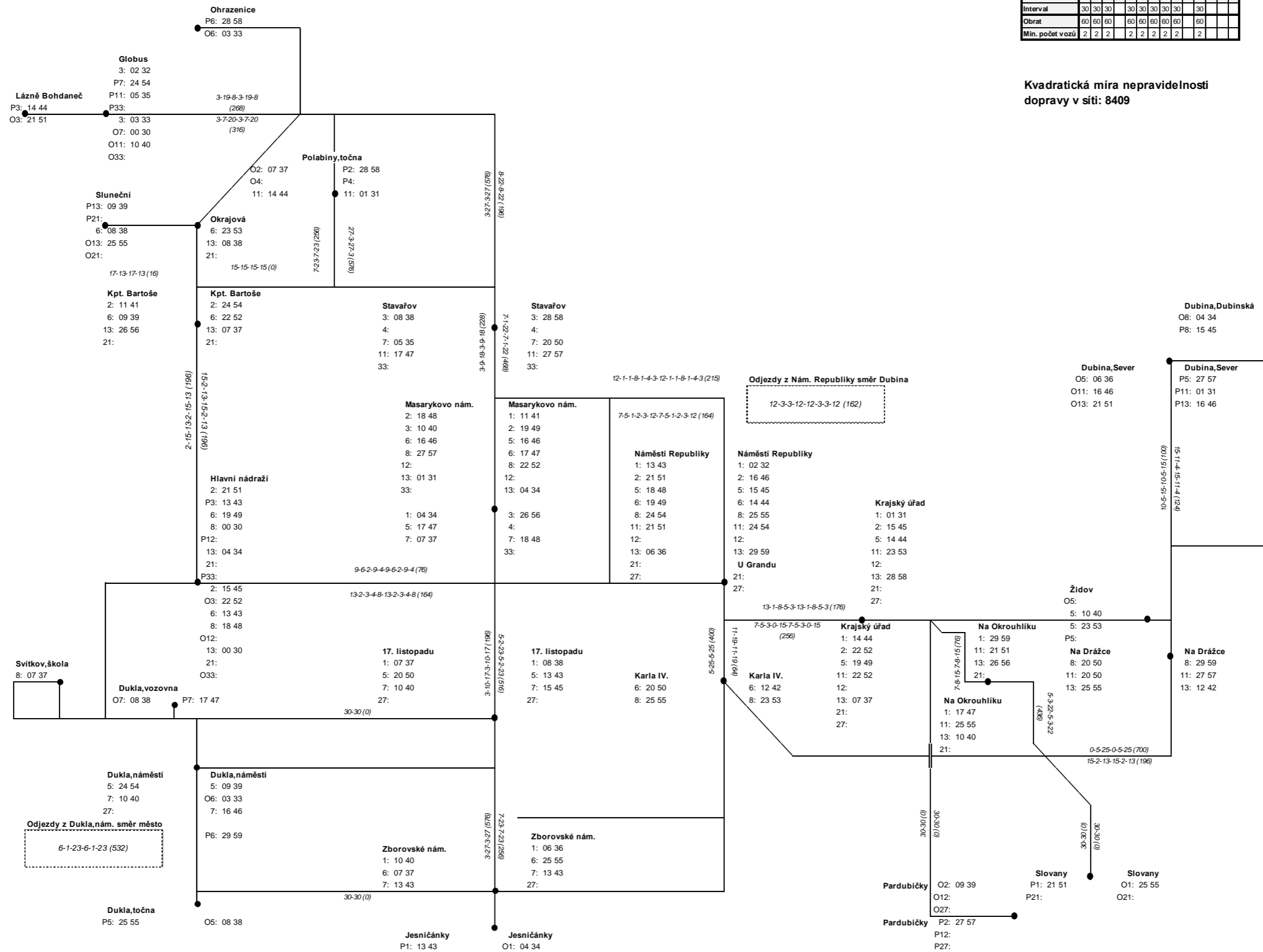


Zdroj: (Autor)

Příloha D Síťová grafika: Víkend 6–8 hodin (Výchozí stav)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Obrat	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Min. počet vozů	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Kvadratická míra nepravidelnosti dopravy v síti: 8409

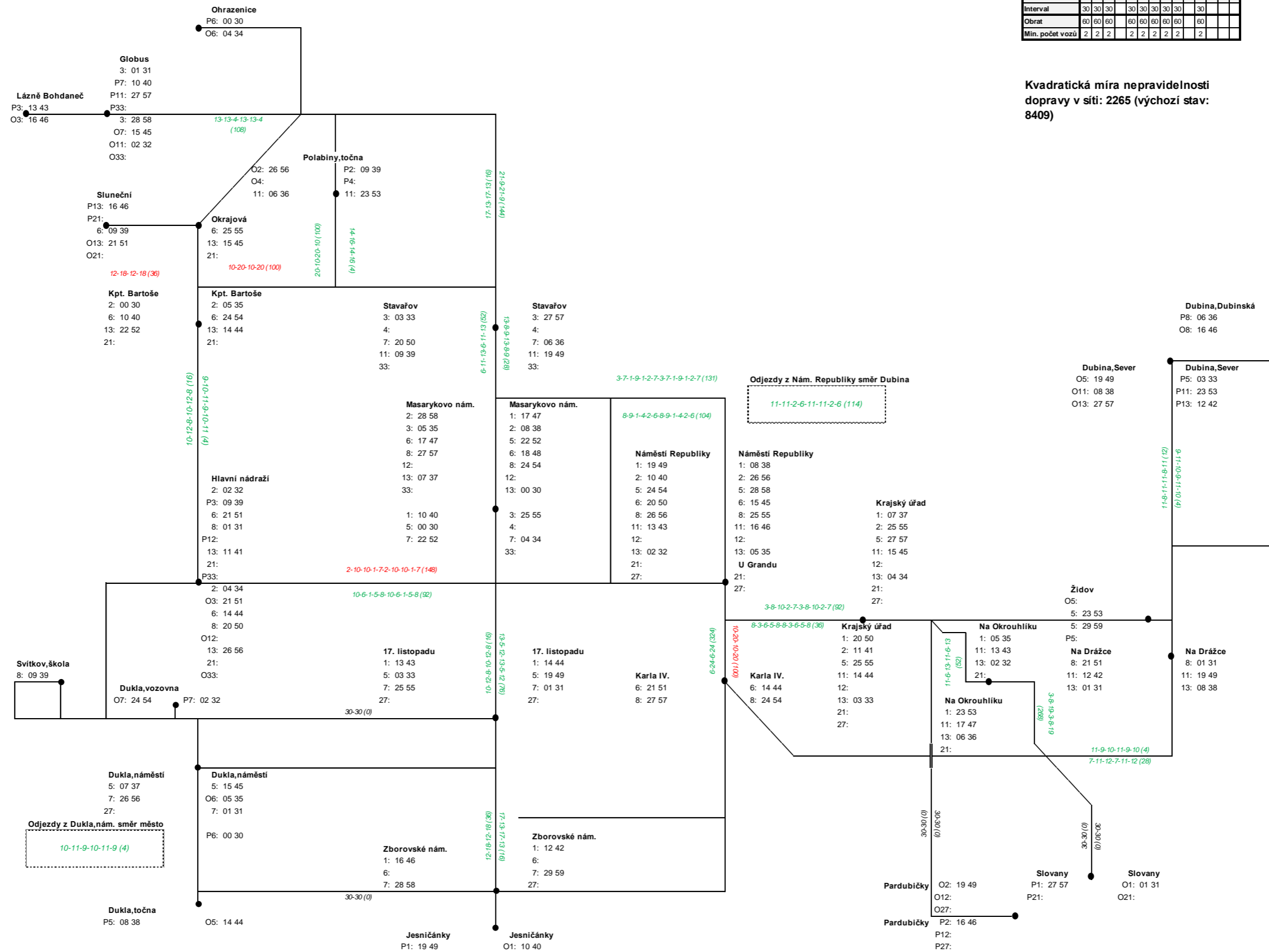


Zdroj: (Autor)

Příloha E Síťová grafika: Víkend 6–8 hodin (Stav v létě 2017)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Obrat	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Min. počet vozů	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Kvadratická míra nepravidelnosti dopravy v síti: 2265 (výchozí stav: 8409)

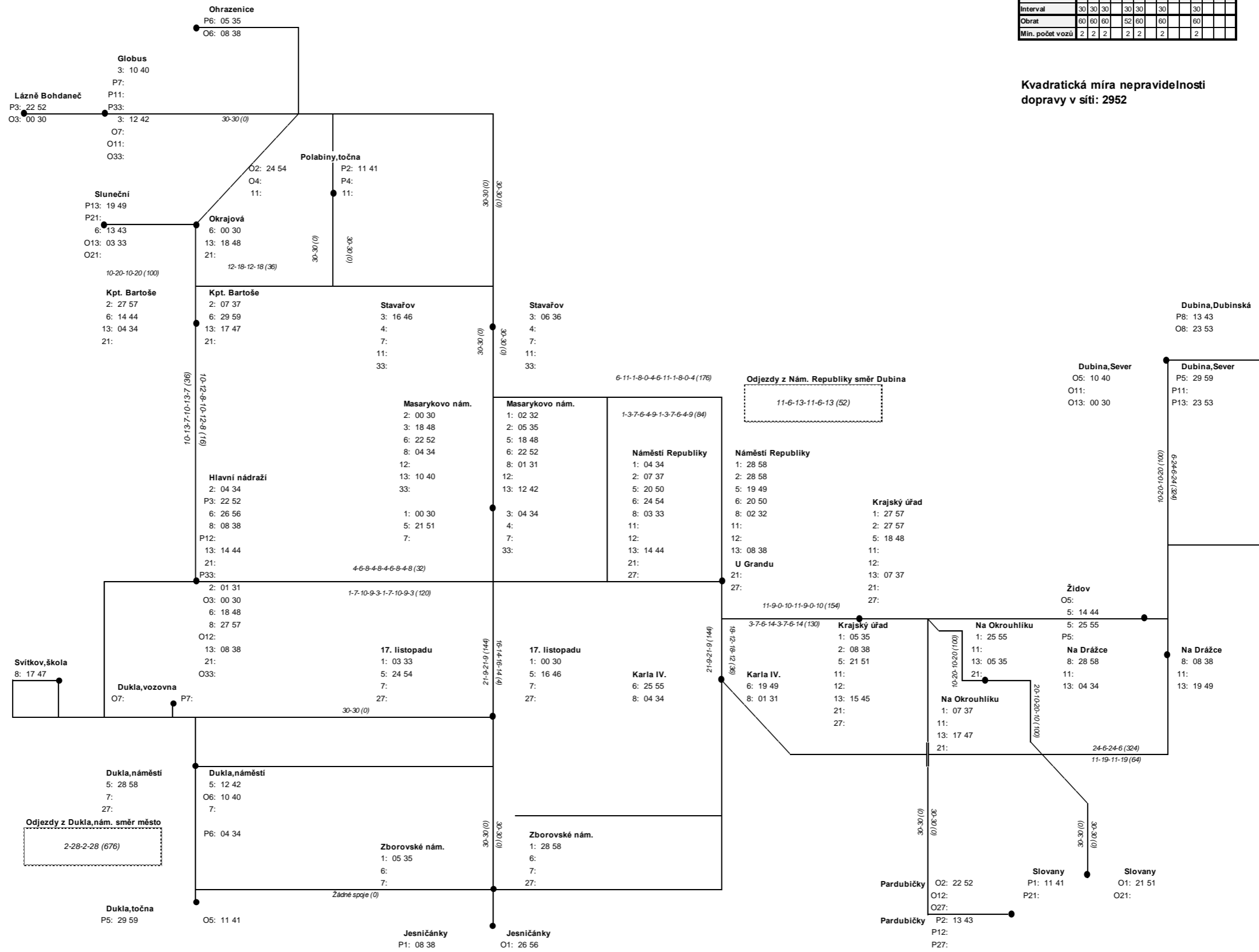


Zdroj: (Autor)

Příloha F Síťová grafika: Víkend 21–23 hodin (Výchozí stav)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Obrat	60	60	60	52	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Min. počet vozů	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Kvadratická míra nepravidelnosti dopravy v síti: 2952

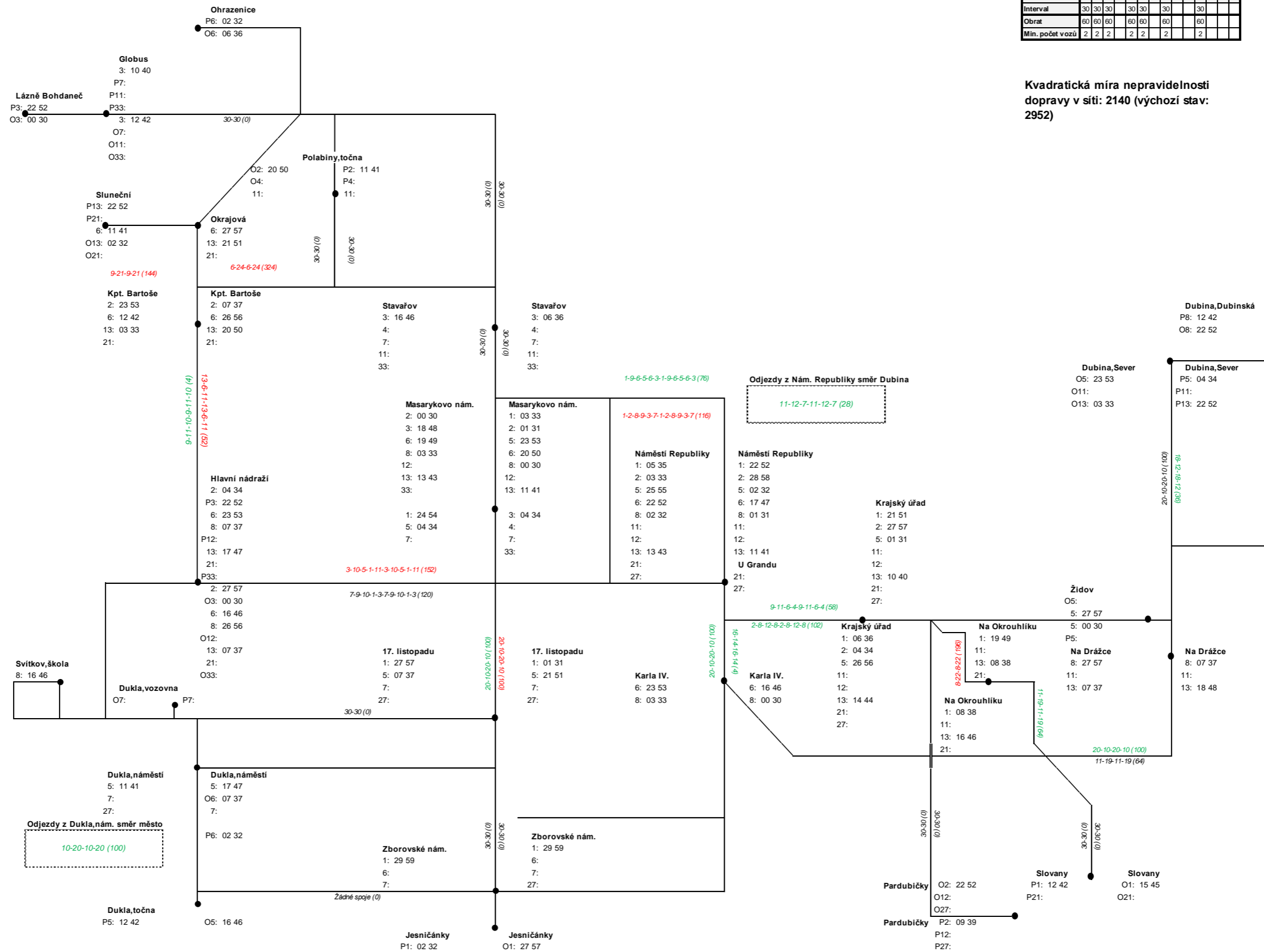


Zdroj: (Autor)

Příloha G Síťová grafika: Víkend 21–23 hodin (Stav v létě 2017)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Obrat	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Min. počet vozů	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Kvadratická míra nepravdivosti
dopravy v síti: 2140 (výchozí stav:
2952)

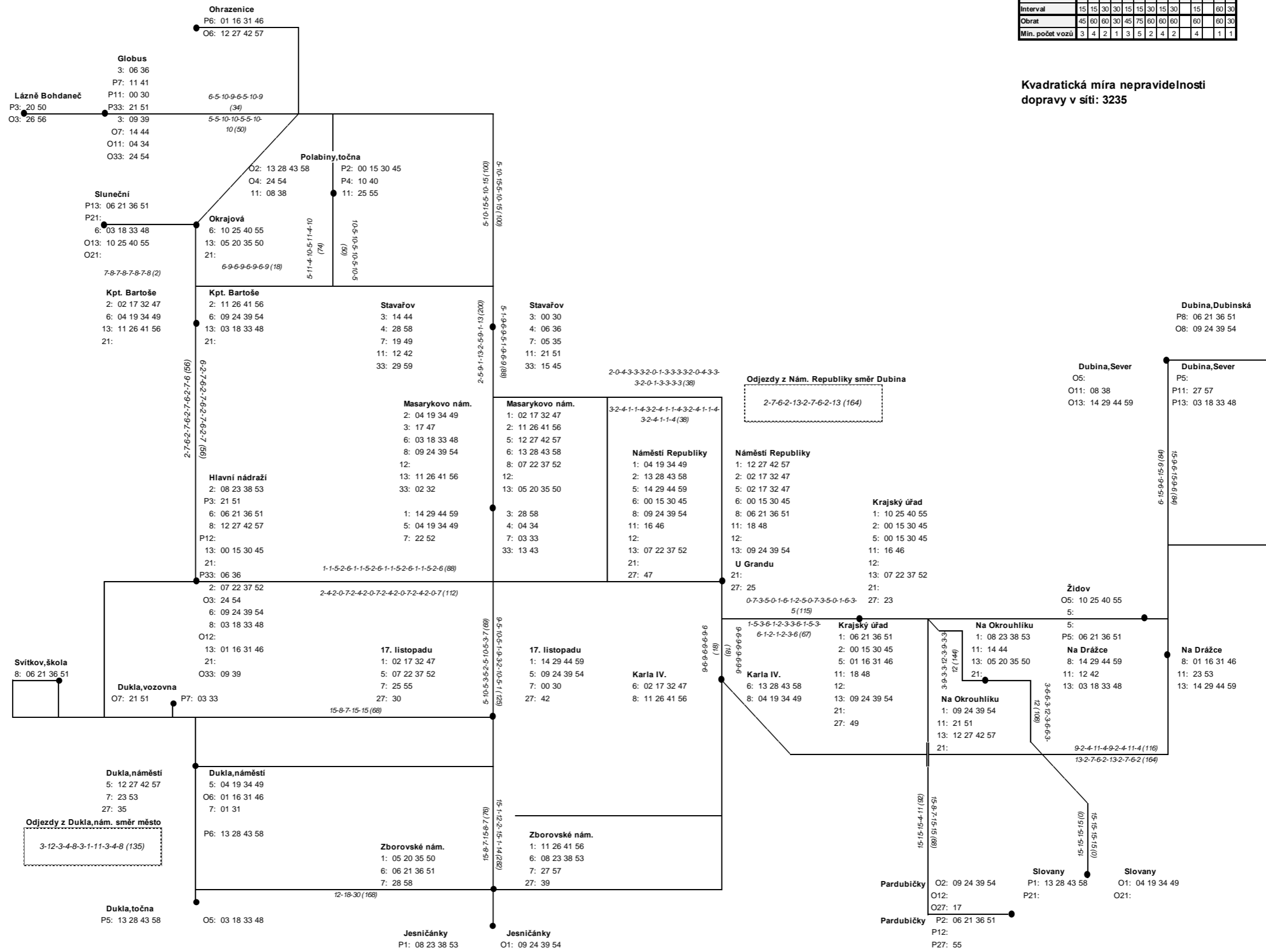


Zdroj: (Autor)

Příloha H Síťová grafika: Pracovní den, prázdniny 8–13 hodin (Výchozí stav)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	15	15	30	30	15	15	30	15	30	15	30	15	60	30
Obrat	45	60	60	30	45	75	60	60	60	60	60	60	60	30
Min. počet vozů	3	4	2	1	3	5	2	4	2	4	4	1	1	1

Kvadratická míra nepravidlosti dopravy v síti: 3235

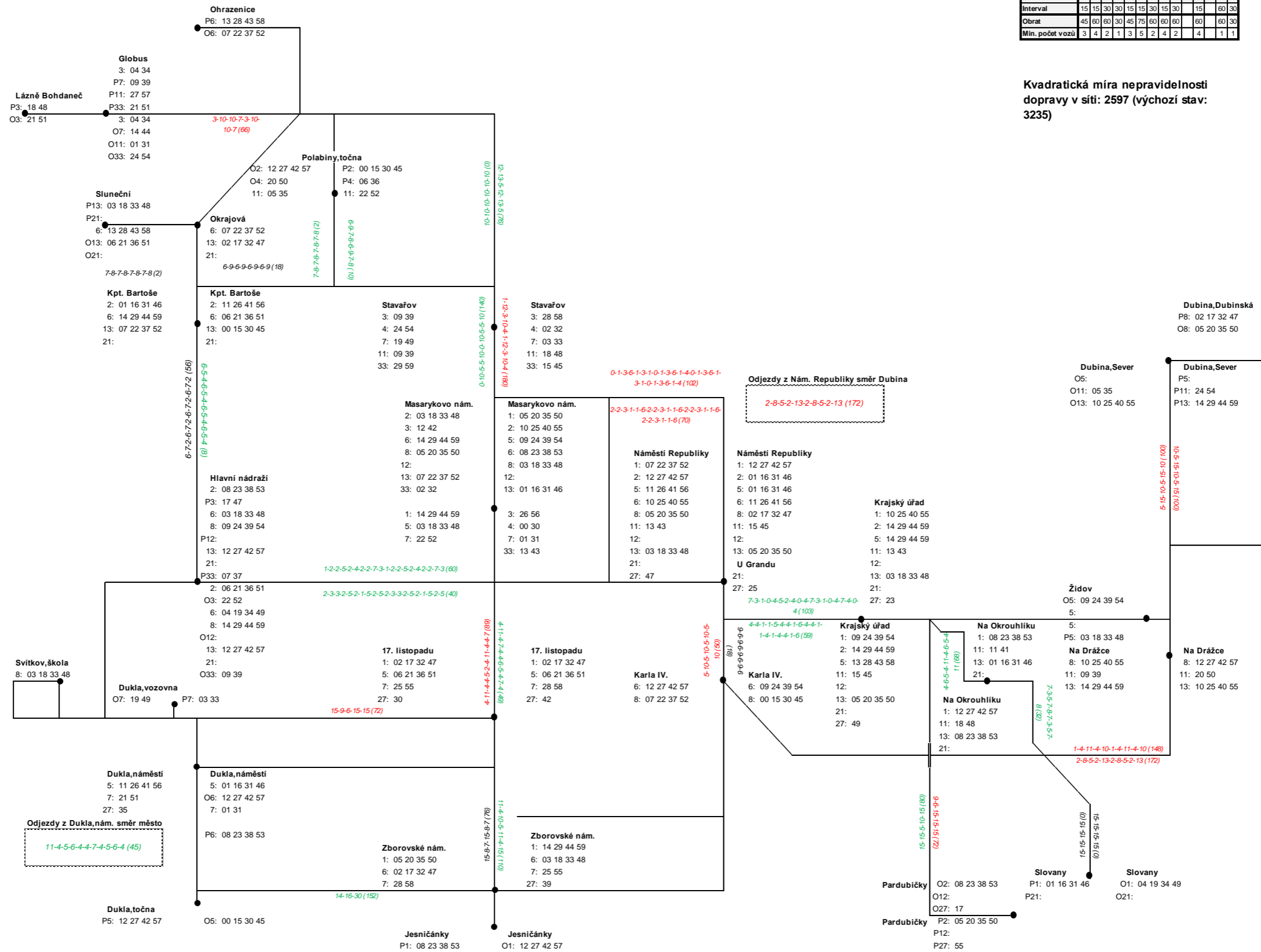


Zdroj: (Autor)

Příloha I Síťová grafika: Pracovní den, prázdniny 8–13 hodin (Stav v létě 2017)

Linka	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13	21	27	33
Interval	15	15	30	30	15	15	30	15	30	15	30	15	60	30
Obrat	45	60	60	30	45	75	60	60	60	60	60	60	60	30
Min. počet vozů	3	4	2	1	3	5	2	4	2	4	4	1	1	1

Kvadratická míra nepravidelnosti dopravy v síti: 2597 (výchozí stav: 3235)



Zdroj: (Autor)