

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Marek Peřina

PROBLEMATIKA BEZPEČNOSTNÍCH PŘESTÁVEK ŘIDIČŮ

PŘI OPTIMALIZACI OBĚHŮ VOZIDEL

Diplomová práce

2019



K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marek Peřina

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Problematika bezpečnostních přestávek řidičů
při optimalizaci oběhů vozidel**

Název tématu (anglicky): **Driver´s Safety Breaks in Vehicles Scheduling Problematics**

Zásady pro vypracování

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

- definování problému a jeho význam pro dopravní praxi,
- možnosti optimalizace oběhů bez plánování bezpečnostních přestávek,
- legislativní požadavky na plánování bezpečnostních přestávek,
- teoretická východiska řešení - analýza použitelnosti různých přístupů a jejich komparace s požadavky kladenými legislativou,
- návrh optimalizačního přístupu k řešení,
- experimentální část,
- zhodnocení dosažených výsledků.

- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucích diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Koubaa, M.; Dhouib, S.; Dhouib, D., El Mhamedi, A.: Truck Driver Scheduling Problem: Literature Review. Elsevier, New York, 2016
- Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006, o harmonizaci některých předpisů v sociální oblasti týkajících se silniční dopravy


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



Datum zadání diplomové práce: **30. června 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **28. května 2019**

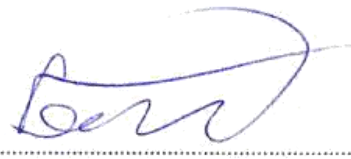
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia

b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


doc. Ing. Tomáš Horák, Ph.D.
vedoucí
Ústavu logistiky a managementu dopravy



doc. Ing. Pavel Hruběš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


Bc. Marek Peřina
jméno a podpis studenta

V Praze dne 30. června 2018

Poděkování

Chtěl bych poděkovat zejména vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D., bez něhož by tato diplomová práce nemohla vzniknout. Děkuji mu za jeho cenné rady, trpělivost při konzultacích, přátelský pedagogický přístup a množství vloženého času.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vítu Janošovi PhD., za konzultace a odborné rady spojené s reálným pracovním prostředím, jímž se tato diplomová práce zabývá.

Také bych chtěl poděkovat všem, kdož mi poskytli podklady pro tvorbu této práce.

Také bych chtěl poděkovat Bc. Ksenii Vakhrushevě, za rady a konzultace spojené s prací ve výpočetním software Xpress-IVE.

Bc. Marek Peřina

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 27. května 2019

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

PROBLEMATIKA BEZPEČNOSTNÍCH PŘESTÁVEK ŘIDIČŮ
PŘI OPTIMALIZACI OBĚHŮ VOZIDEL

Diplomová práce
2019
Bc. Marek Peřina

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Problematika bezpečnostních přestávek řidičů při optimalizaci oběhů vozidel“ je analýza podmínek bezpečnostních přestávek řidičů různých dopravních prostředků, návrh a otestování matematického modelu pro optimalizaci oběhů vozidel při zohlednění a dodržení vybraných typů bezpečnostních přestávek.

ABSTRACT

The subject of the diploma thesis „Driver’s Safety Breaks in Vehicles Scheduling Problematics“ is the analysis of conditions of safety breaks for the drivers in various means of transport; then a proposal and testing mathematical model for the optimisation of vehicle scheduling taking into account compliance with selected types of safety breaks.

KLÍČOV SLOVA

bezpečnostní přestávky řidičů, optimalizace, oběhy vozidel, Xpress-IVE, minimalizace počtu vozidel, metoda Vehicle Routing Problem s časovými okny

KEY WORDS

driver's safety breaks, optimization, vehicle circulation, Xpress-IVE, minimizing the number of vehicles, Vehicle Routing Problem with Time Windows method

Obsah

1.	Úvod	9
2.	Základní pojmy.....	10
3.	Zákonná nařízení.....	13
3.1	Dohoda AETR	13
3.2	Nařízení Evropského Parlamentu - ES 561/2006	13
3.3	Nařízení vlády 589/2006 Sb.....	14
3.4	Vyhláška o bezpečnostní letové normě 466/2000 Sb.	14
3.5	Druhy vozidel vyjmuté z ES 561/2006 Sb.....	15
3.6	Limitní podmínky doby výkonu práce řidiče dle ES 561/2006 Sb.	15
3.6.1	Tabelární porovnání dohody AETR a ES 561/2006 Sb.	17
3.7	Limitní podmínky doby výkonu práce řidiče dle 589/2006 Sb.	18
3.7.1	Osádky nákladních automobilů a autobusů	18
3.7.2	Zaměstnanci údržby pozemních komunikací.....	18
3.7.3	Řidiči kolejových vozidel.....	19
3.7.4	Členové posádky letadel.....	19
3.7.5	Řidiči MHD.....	19
3.7.6	Řidiči dálkových autobusů.....	20
3.7.7	Řidiči vozidel nákladní přepravy	21
3.7.8	Řidiči vozů do 3,5 tuny.....	22
4	Užití existujícího softwaru	23
5	Evidence pracovní doby - tachograf	24
6	Optimalizační software.....	25
7	Oběhy vozidel	26
7.2	Obecné zásady návrhu oběhů vozidel.....	26
7.3	Vykonávání běžné údržby vozidel	26
7.4	Snížení neproduktivních prostojů	27
7.5	Odhadovaná limitní délka oběhů vozidel	27
7.6	Časová rezerva	27
8	Analýza existujících metod podle doporučené literatury	29
8.1	Vyhodnocení publikovaných metod	36
8.1	Sekvenční exaktní přístup T.Majera a S. Palúcha	37
8.2	Jednofázový exaktní přístup založený na lineárním programování	41
8.2.1	Vstupní data pro výpočetní experiment	42

8.2.2	Popis řešené linky	42
8.2.3	Slabé stránky navrženého způsobu omezujících podmínek.....	47
8.3	Model úlohy VRP s kapacitním omezením vozidel a časovými okny jako nástroj pro plánování oběhů vozidel	48
8.3.1	Základní model úlohy VRPTW upravený pro plánování oběhů vozidel.....	48
8.3.2	Rozšíření základního modelu úlohy VRPTW o možnost prodloužení oběhu při čerpání nedělené bezpečnostní přestávky.....	53
8.3.3	Rozšíření základního modelu úlohy VRPTW o možnost prodloužení oběhu vozidla při možnosti pánovat nedělenou i dělené bezpečnostní přestávky	59
8.4	Diskuze	66
9	Závěr.....	67
	Zdroje	68
	Seznam obrázků	70
	Seznam tabulek	71
	Seznam tabulek	71

Seznam použitých zkratk

MD	Ministerstvo dopravy
ČVUT	České vysoké učení technické
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
ES	Evropská směrnice
MHD	městská hromadná doprava
Sb.	Sbírka zákonů
PK	pozemní komunikace
RŠ	ranní špička
Se	sedlo
OŠ	odpolední špička
Ve	večerní sedlo
VRTDSP	Vehicle Routing Truck Driver Scheduling Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem Time Windows

1. Úvod

Problematika oběhů vozidel je důležitým faktorem z několika hledisek. Cílem každého podnikání je zisk, v případě, že firma/organizace je závislá na dotacích (jako např. MHD), je cílem co největší provozní úspora. Přístupem optimalizace oběhů vozidel lze docílit provozních úspor, tím zvýšit efektivitu a v konečném důsledku i zisk nebo alespoň snížit ztrátu vykrývanou dotacemi. Optimalizované oběhy vozidel, tedy nejvhodnější oběhy vozidel, dle zadaných vstupních parametrů, vykazují ideálních podmínek v porovnání požadavků a nutných vstupů. Ve svém důsledku tak jsou žádoucí jak pro soukromé firmy, zabývající se rozvozem čehokoli, tak pro organizátory a vykonavatele veřejné dopravy.

Optimalizace oběhů vozidel není závislá na druhu použitého dopravního prostředku, ačkoli použitý dopravní prostředek má velký vliv na parametry vstupních podmínek. Nelze například očekávat, že doba přistavení vozidla k dopravnímu výkonu bude stejná u silničních, kolejových nebo snad i leteckých dopravních prostředků. Ve stejném smyslu jsou rozdílné i nároky na údržbu. Zmíněné nároky (doba přistavení vozidla, časové nároky na periodicitu údržby + doba samotné údržby) jsou však zapisovány ve formě konstant, které se mění pouze svou hodnotou nikoliv významem. Je však možné provádět údržbu mimo dopravní špičky a tím nabýt určité výhody (vozidla ve špičce provádí dopravní výkon a v sedle je část z nich odstavena k údržbě).

Přestávky v pracovní době jsou důležitým aspektem v každém druhu zaměstnání. Pro profesionální řidiče je však jejich důležitost ještě výrazně vyšší. Řidič totiž zpravidla zodpovídá nejen za sebe ale také za přepravované osoby nebo zásilky, z nichž některé typy mohou být dokonce nebezpečné.. Při výkonu řízení vozidel nejsou výjimkou dopravní nehody, jejichž příčinou jsou velmi často důsledky přepracování přímo související s nesprávným plněním přestávek či dokonce jejich absencí. Únava a nesoustředěnost jsou zde extrémně nežádoucími faktory, při jejichž působení je pracovník nejen méně produktivní, ale také nebezpečný svému okolí, a to nejen pro případné cestující, ale také pro ostatní účastníky silničního provozu.

Variabilní výkon pracovní doby, velikosti řízeného vozidla a stejně tak, zda řidič působí v nákladní či osobní přepravě nabývají mnoha variant. Pravidla pro povinné přestávky řidičů a rozvrhy pracovních dob jsou těmto variantám ekvivalentní.

K vhodnému rozvrhování bezpečnostních přestávek lze taktéž použít optimalizační metody, které mohou přispět ke stanovení minimálního nutného počtu řidičů, případně i vozidel a to v situaci, má-li každý řidič přiděleno právě jedno vozidlo.

Cílem této práce je sestavit optimalizační modely, které povedou k optimalizaci oběhů vozidel při dodržení předpisy daných požadavků na bezpečnostní přestávky řidičů silničních vozidel.

2. Základní pojmy

Přehled a vysvětlení specifických pojmů použitých v této práci.

Pracovní doba

Pracovní doba člena osádky nákladního automobilu nebo autobusu je doba řízení vozidla, nakládka a vykládka, kontrola a dohled nad cestujícími při nastupování nebo vystupování, čištění a prohlídka vozidla, nákladu nebo cestujících, technická údržba vozidla, administrativní práce spojené s řízením vozidla a nezbytná jednání před správními orgány souvisejícím s plněním pracovních úkolů. Doba, kdy je člen osádky nákladního automobilu nebo autobusu připraven na pracovišti k výkonu práce podle pokynů zaměstnavatele, zejména čekání na nakládku a vykládku, jejíž doba není předem známa. Výjimku tvoří doby čekání mezi spoji ve veřejné linkové osobní dopravě v rámci linky časově a místně určené jízdním řádem [5].

Bezpečností přestávka

Je doba, během níž nesmí řidič řídit ani vykonávat žádnou jinou práci a která je určena výhradně k jeho zotavení

Doba odpočinku

Nepřerušená doba, během níž může řidič volně nakládat se svým časem [1].

Denní doba odpočinku

Denní doba, během níž může řidič volně nakládat se svým časem a která zahrnuje „běžnou denní dobu odpočinku“ nebo „zkrácenou denní dobu odpočinku“:

„Běžnou denní dobou odpočinku“ se rozumí doba odpočinku v celkovém trvání nejméně 11 hodin. Tuto běžnou dobu odpočinku lze případně rozdělit do dvou časových úseků, z nichž první musí být nepřerušená doba v celkovém trvání nejméně 3 hodin a druhý nepřerušená doba v celkovém trvání nejméně 9 hodin, „zkrácenou denní dobou odpočinku“ se rozumí doba odpočinku v celkovém trvání nejméně 9 hodin, ale kratší než 11 hodin [1].

Týdenní doba odpočinku: Běžná – musí činit nejméně 45 hodin.

Zkrácená – je-li hodnota nižší než 45 hodin, jedná se o zkrácenou týdenní dobu odpočinku. Minimální délka zkrácené týdenní doby odpočinku činí 24h [12]. Zkrácená týdenní doba odpočinku je tedy taková, která leží v intervalu (24,45).

Tahač

Je silniční vozidlo s vlastním mechanickým pohonem, s výjimkou vozidla trvale jezdícího po kolejích, určené speciálně pro tahání, tlačení nebo přemísťování přívěsů, návěsů, zařízení nebo strojů [1].

Přívěs

Je vozidlo, které se připojuje za motorové vozidlo nebo tahač [1].

Návěs

Je přívěs bez přední nápravy, který se s motorovým vozidlem nebo tahačem spojuje tak, že se na motorové vozidlo nebo tahač přenáší podstatná část jeho hmotnosti nebo nákladu [1].

Maximální týdenní pracovní doba

Maximální týdenní pracovní dobu je možné prodloužit na 60 hodin, pokud za čtyři měsíce průměr nepřevyší 48 hodin [3].

Karta řidiče

Je určena k zaznamenávání pracovní doby přes digitální tachograf, je platná pouze spolu s řidičským průkazem.

Režijní jízda

Je doba potřebná pro přemístění zaměstnance ze sjednaného místa výkonu práce do jiného místa výkonu práce před jeho začátkem nebo doba potřebná pro přemístění z místa výkonu práce do jiného místa výkonu práce v jeho průběhu nebo doba potřebná k přemístění z místa výkonu práce do sjednaného místa výkonu práce po skončení pracovního výkonu [5].

Zimní období

Je období od 1. listopadu kalendářního roku do 31. března následujícího kalendářního roku [5].

Vyrovnávací období

Časové období, kdy rozpočítané hodnoty z přesčasového období nesmí přesahovat limity stanovené zákoníkem práce [12].

Vozidlo

Je nejmenší dopravní prostředek, který lze spojovat a rozpojovat [6], je-li k tomu uzpůsoben.

Souprava

Je jedno nebo více spojených vozidel, z nichž alespoň jedno disponuje vlastním pohonem. Souprava je tedy schopná samostatné jízdy [6].

Spoj

Je jízda soupravy nebo jednotlivého vozidla podle jízdního řádu (zpravidla na lince) [6].

Oběh

Sled po sobě jdoucích spojů obsazených konkrétním vozidlem. Oběh je uzavřený a cyklický [6].

Běžná údržba

Pojmem běžná údržba je myšlena nezbytná údržba pro provoz vozidel, jako je např. tankování paliva a dalších provozních kapalin.

Servisní údržba

Pojmem servisní údržba je myšlena nezbytná údržba pro provoz vozidel, kterou jsou schopni vykonávat jen odborní pracovníci, a která je vyžadována z hlediska četnosti výrazně méněkrát, než údržba běžná. Typicky se jedná o servis pohonného ústrojí vozidla, výměnu částí vozu kde došlo k výrazné únavě materiálu – výměně pneumatik atp.

Neobchodní přeprava

Primárně se jedná o přepravu prováděnou jinou osobou než podnikatelem, ať již v soukromém nebo veřejném zájmu nebo k charitativním účelům. Popřípadě se jedná o osobu podnikatele, ale pak tato přeprava nesmí být žádným způsobem spojena s předmětem podnikání a nesměla by ji provádět osoba v zaměstnaneckém či obdobném vztahu k podnikateli [10].

3. Zákonná nařízení

Pro nabytí komplexního a uceleného přehledu o podmínkách bezpečnostních přestávek řidičů bylo nutné se nejdříve seznámit se zněním zákonných nařízení, která bezpečnostní přestávky řidičů definují. Ta by se obecně dala rozdělit na ta, která jsou zmíněna v evropské směrnici *ES 561/2006*, což je nezanedbatelné množství řidičů, a ostatní, na která se tato evropská směrnice nevztahuje.

Dalším důležitým zákonným nařízením je nařízení vlády č. *589/2006 Sb.* Toto nařízení se vztahuje na některé z typů dopravy, které nejsou zahrnuty v *ES 561/2006*.

3.1 Dohoda AETR

Jedním z nejdůležitějších a z hlediska rozsahu na aplikovaném území nejpoužívanějších nařízení upravujících dopravní podmínky a mj. pracovní doby a přestávky řidičů je mezinárodní *Evropská dohoda o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě (AETR)*, sjednaná roku 1970 v Ženevě. Obsah této dohody je stále aktuální v zemích, které nejsou součástí EU.

3.2 Nařízení Evropského Parlamentu - ES 561/2006

Pro provoz silniční dopravy na území států EU ve vztahu k řidičům a jejich pracovním dobám je stěžejním dokumentem nařízení *ES 561/2006*. Toto nařízení se zabývá pracovní dobou a sjednocuje tyto podmínky na území všech členských států Evropské Unie a dále Švýcarska jako taktéž i smluvních stran zúčastněných na Dohodě o evropském hospodářském prostoru. Nařízení se konkrétně vztahuje na přepravu:

1. Zboží vozidly, jejichž maximální přípustná hmotnost včetně návěsu nebo přívěsu překračuje 3,5 tuny, nebo cestujících vozidly, která jsou svou konstrukcí nebo trvalou úpravou určena pro přepravu více než devíti osob včetně řidiče [1].
2. Toto nařízení se vztahuje na silniční dopravu bez ohledu na zemi registrace vozidla uskutečněnou výhradně uvnitř Společenství nebo mezi Společenstvím, Švýcarskem a zeměmi, které jsou smluvními stranami Dohody o Evropském hospodářském prostoru [1].

3.3 Nařízení vlády 589/2006 Sb.

Tímto nařízením se stanovuje odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě. Nenahrazuje směrnici ES 589/2006 Sb., ale specifikuje podmínky pro ty druhy dopravy, které nejsou v ES 589/2006 Sb. zmíněny.

Tato úprava se vztahuje na zaměstnance uvedené v §1, kterými jsou:

- a) Členové osádky nákladního automobilu nebo autobusu v silniční dopravě podle přímo použitelného předpisu Evropských společenství nebo podle mezinárodní smlouvy vyhlášené ve Sbírce zákonů, kterými jsou řidiči, pomocníci řidiče a průvodčí [5].
- b) Zaměstnanci údržby pozemních komunikací, kteří zajišťují sjízdnost dálnic, sjízdnost a schůdnost silnic a místních komunikací [5].
- c) Zaměstnanci drážní dopravy, kteří řídí nebo doprovázejí drážní vozidlo na území České republiky. Obdobně pro zaměstnance, kteří řídí nebo doprovázejí vozidlo na území České republiky a současně na území jiného členského státu Evropské unie po dobu alespoň jedné hodiny ze své směny [5].
- d) Zaměstnanci městské hromadné dopravy, kteří jsou členy osádky autobusu. Zaměstnanci drážní dopravy na dráze tramvajové, trolejbusové, lanové a na dráze speciální (metro) a členové osádky autobusové linky osobní dopravy, u které délka žádného ze spojů nepřesahuje 50 km [5].
- e) Členové osádky plavidla, kteří jsou při provozu plavidla způsobilí vykonávat činnosti k zajištění bezpečnosti provozu plavidla; členy posádky jsou i vůdci plavidla [5].
- f) Členové posádky letadla, kteří jsou výkonnými letci nebo obsluhujícím personálem u zaměstnavatele, který provozuje obchodní leteckou dopravu letouny nebo je provozovatelem leteckých prací nebo letecké záchranné služby [5].

3.4 Vyhláška o bezpečnostní letové normě 466/2000 Sb.

Tato vyhláška stanovuje pravidla pro určení maximální doby ve službě, doby letové služby, doby letu, minimální požadavky na odpočinek včetně odpočinku při překračování více časových pásem, principy dělené služby [15] a další specifikace týkající se vykonávání služby v letové dopravě.

3.5 Druhy vozidel vyjmuté z ES 561/2006 Sb.

- Nařízení se nevztahuje na:
- 1) Vozidla osobní přepravy s délkou linky menší než 50km
 - 2) Vozidla s nižší dovolenou rychlostí než 40km/h
 - 3) Vozidla armády a IZS
 - 4) Vozidla a jejich kombinace, jejichž maximální přípustná hmotnost nepřesahuje 7,5 tun užívaná v neobchodní přepravě
 - 5) Havarijní vozidla, operují-li v okruhu do 100km od místa obvyklého odstavení
 - 6) Historická vozidla
 - 7) Vozidla využívaných při záchranných akcích, mimořádných okolností a humanitárních pomoci

K druhům dopravy, jež jsou vyjmuté z ES 561/2006 Sb., náležejí v bodu 1) vozidla osobní přepravy v MHD nebo v regionální dopravě, neboť většina linek MHD a též velké množství regionálních linek má délku linky menší než 50 km. Jedná se tedy o výrazný díl osobní dopravy jak z hlediska množství používaných vozidel, tak i z hlediska množství řidičů zajišťujících jejich provoz. Samozřejmě, z hlediska využívání cestujícími se jedná o významný segment dopravy.

3.6 Limitní podmínky doby výkonu práce řidiče dle ES 561/2006 Sb.

Limitní podmínky pro dobu výkonu práce jsou stanoveny v článku 6 ES 561/2006 Sb. Pro zobecnění a použití v této práci byly vypsány do následujících bodů:

1. Denní doba řízení nesmí přesáhnout 9 hodin. Nejvýše dvakrát za týden může být prodloužena na 10 hodin[1].
2. Týdenní doba řízení nesmí přesáhnout 56 hodin a nesmí být překročena maximální týdenní pracovní doba [1].
3. Celková doba řízení nesmí přesáhnout 90 hodin za období dvou po sobě následujících týdnů [1].
4. Denní a týdenní doba řízení zahrnuje celkovou dobu řízení na území Společenství nebo třetí země [1].

5. Po čtyřech a půl hodinách řízení musí mít řidič nepřerušenu přestávku nejméně 45 minut, pokud mu nezačíná doba odpočinku. Tato přestávka může být nahrazena přestávkou v délce nejméně 15 minut, po níž následuje přestávka v délce nejméně 30 minut, které jsou v období rozloženy tak, aby byly v souladu s odstavcem 1 nařízení ES 561/2006 Sb.[1].
6. V průběhu každých 24 hodin po skončení předchozí denní nebo týdenní doby odpočinku musí mít řidič novou denní dobu odpočinku. Je-li denní doba odpočinku v průběhu těchto 24 hodin alespoň 9 hodin, ale kratší než 11 hodin, považuje se dotyčná denní doba odpočinku za zkrácenou [1].
7. Mezi dvěma týdenními dobami odpočinku smí mít řidič nanejvýš tři zkrácené denní doby odpočinku [1].
8. Odchylně od článku 2, jsou-li ve vozidle přítomni nejméně dva řidiči, musí mít každý z nich denní odpočinek nejméně 9 hodin za každé období 30 hodin od skončení denní nebo týdenní doby odpočinku [1].
9. Ve kterýchkoli dvou po sobě následujících týdnech musí mít řidič dvě běžné týdenní doby odpočinku nebo jednu běžnou týdenní dobu odpočinku a jednu zkrácenou dobu odpočinku v celkové délce 24 hodin. Zkrácení však musí být vyrovnáno odpovídající dobou odpočinku vybranou v celku před koncem třetího týdne následujícího po dotyčném týdnu [1]. Týdenní doba odpočinku musí začít nejpozději po uplynutí šesti 24hodinových časových úseků od skončení předchozí týdenní doby odpočinku [1].
10. Řidič smí trávit denní dobu odpočinku nebo zkrácenou týdenní dobu odpočinku mimo místo obvyklého odstavení vozidla v zaparkovaném vozidle, je-li vybaveno lehátkem pro každého řidiče, pokud se tak rozhodne [1].
11. Týdenní doba odpočinku, která začíná v jednom týdnu a pokračuje do týdne následujícího, může být připojena k jednomu nebo druhému z těchto týdnů, avšak nikoli k oběma [1].

Existují výjimky konkrétně definované ve směrnici 561/2006Sb., mezi ně patří například odlišné počítání doby odpočinku, jede-li řidič spolu s vozidlem na trajektu či po železnici apod.

3.6.1 Tabelární porovnání dohody AETR a ES 561/2006 Sb.

Porovnání pravidel zabývajících se přestávkami řidičů dle dohody AETR a Nařízení ES č.561/2006 pomocí přehledové tabulky.

	AETR	Nařízení ES č. 561/2006
Denní doba řízení	max. 9 hodin (možné zvýšení 2x týdně na 10 hod.) mezi dvěma odpočinky	
Týdenní doba řízení	max. 56 hod (10 + 10 + 9 + 9 + 9 + 9)	max. 56 hod
Týdenní pracovní doba Nař. vlády č.589/2006 Sb. §5 odst. 1	48 hod., lze prodloužit na max. 60 hod, pokud za 26 po sobě jdoucích týdnů nebude překročena průměrná pracovní doba 48 hod. (včetně ostatních pracovních činností (bez přesčasů))	
Celková doba řízení za období dvou po sobě jdoucích týdnů	Max. 90 hod	
Přestávka v řízení	nejpozději po 4,5 hodinách řízení nejméně 45 minut. Lze rozdělit na trvající nejméně 15 min	nejpozději po 4,5 hodinách řízení nejméně 45 minut. Lze rozdělit pouze na 2 úseky: první 15 min a druhý 30 min.
Běžná denní doba odpočinku	nejméně 11 hod v průběhu 24 hod. od skončení předchozí doby odpočinku	
Rozdělení běžné denní doby odpočinku	při prodloužení na nejméně 12 hod lze rozdělit až do 3 úseků, přičemž jeden úsek musí být nejméně 8 souvislých hodin	při prodloužení na nejméně 12 hod lze rozdělit pouze do 2 úseků : První úsek nejméně 3 hod , druhý úsek nejméně 9 hod .
Přerušování běžné denní doby odpočinku na trajektu	1x nejvýše na 2 hod. za podmínek uvedených v čl.9 nařízení. Řidič však musí mít během odpočinku dispozici lůžko nebo lehátko	Nanejvýš 2x jinými činnostmi, které nepřesahují dobu trvání celkem 1 hod . Řidič však musí mít během odpočinku dispozici lůžko nebo lehátko
Zkrácená denní doba odpočinku	možné zkrácení max. 3x týdně až na 9 hod. s tím, že dojde do konce týdne k odpovídajícímu vyrovnání	možné zkrácení max. 3x až na 9 hod . mezi dvěma týdenními odpočinky, bez vyrovnání
Denní doba odpočinku (nejméně 2 řidiči)	8 hodin za každé časové období 30 hod	nejméně 9 hod . za každé období 30 hod. od skončení poslední doby odpočinku. Přítomnost druhého řidiče ve vozidle povinná s výjimkou první hodiny.
Běžná týdenní doba odpočinku	nejméně 45 hod . včetně jedné denní doby odpočinku	
Zkrácená týdenní doba odpočinku	nejméně 36 hod (je-li čerpána v místě obvyklého odstavení vozidla) nebo nejméně 24 hod. (mimo místo obvyklého odstavení vozidla), s vyrovnáním do konce 3 následujícího týdne	nejméně 24 hod . s vyrovnáním do konce 3 následujícího týdne
Začátek týdenního odpočinku	Po nejvýše šesti denních dobách řízení. (v případě mezinárodní osobní příležitostné dopravy po nejvýše 12-ti denních dobách řízení)	Nejpozději po uplynutí šesti 24hodinových časových úseků od skončení předchozího týdenního odpočinku.
Přesun řidiče do místa, kde se ujme vozidla		Nelze vykázat jako odpočinek. Pokud řídí vozidlo nespádající do působnosti tohoto nařízení musí vykázat jako jinou práci
Povinnost řidičů předložit záznamové listy ke kontrole	z běžného týdne a posledního dne týdne předcházejícího , během něhož řídili	z běžného dne a předchozích 28 kalendářních dní

Obrázek 1 - Tabelární porovnání AETR a ES č. 561/2006Sb [13].

3.7 Limitní podmínky doby výkonu práce řidiče dle 589/2006 Sb.

Nařízení vlády 589/2006 Sb. kterým se stanoví odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě, určuje ve své podstatě dolní mez dob přestávek řidičů tj. minimální délku přestávky, a horní mez výkonu pracovních dob, tj. maximální přípustnou délku výkonu pracovní činnosti. Tyto limitní podmínky se liší dle používaného dopravního prostředku a účelu jeho pracovního výkonu, tedy zda se jedná o přepravu nákladní či osobní.

3.7.1 Osádky nákladních automobilů a autobusů

1. Pracovní doba člena osádky nákladního automobilu nebo autobusu v silniční dopravě ve více pracovněprávních vztazích může ve svém souhrnu činit nejvýše 48h týdně [5].
2. Pracovní dobu je možné prodloužit až na **60 hodin týdně**, pokud její průměr bez práce přesčas nepřesáhne stanovenou týdenní pracovní dobu za období, které může činit nejvýše 26 týdnů po sobě jdoucích [5].
3. Délka směny může činit nejvýše **13** hodin [5].
4. Délka směny zaměstnance pracujícího v **noční době** může činit nejvýše **10 hodin** během 24 hodin po sobě jdoucích [5].
5. Zaměstnavatel poskytne členu osádky nákladního automobilu nebo autobusu v silniční přepravě nejdéle po **6 hodinách** nepřetržité práce přestávku v práci na jídlo a oddech v trvání **nejméně 45 minut**, pokud je pracovní doba člena pracovní doba člena osádky nákladního automobilu nebo autobusu v silniční dopravě **delší než 9 hodin** [5].
6. Přestávka v práci na jídlo a oddech dle bodu 5. může být rozdělena do několika částí v trvání nejméně **15 minut** [5].

3.7.2 Zaměstnanci údržby pozemních komunikací

1. Pracovní doba zaměstnance údržby pozemních komunikací v jednotlivých týdnech v zimním období a při práci v důsledku likvidace povětrnostní situace nesmí překročit **60hodin** a za vyrovnávací období nepřesahuje týdenní pracovní dobu [5].
2. Délka směny zaměstnance údržby pozemních komunikací v zimním období a při likvidaci povětrnostních situace může činit nejvýše **16 hodin** [5].
3. Délka nepřetržitého odpočinku zaměstnance údržby v zimním období nebo při likvidaci důsledku povětrnostní situace mezi jednotlivými směnami činní alespoň **11 hodin během 24h hodin po sobě jdoucích** [5].

4. Nepřetržitý odpočinek zaměstnance údržby pozemních komunikací může být v zimním období nebo při likvidaci důsledků povětrnostní situace zkrácen až na 6 hodin, pokud byla předchozí směna kratší než 6 hodin, až na dobu trvání této směny, nejméně však na dobu 3 hodin. Nepřetržitý odpočinek bude prodloužen o dobu zkrácení tohoto odpočinku [5].

Pracovní doba v zimním období nebo při likvidaci důsledků povětrnostní situace je rozvržena tak, že doba nepřetržitého odpočinku v týdnu během každého období sedmi po sobě jdoucích kalendářních dnů bude alespoň 24 hodin s tím, že za období 3 týdnů bude tento odpočinek činit celkem alespoň 105 hodin [5].

3.7.3 Řidiči kolejových vozidel

V porovnání s ostatními zmíněnými druhy dopravy patří mezi ty, na změny nejméně flexibilní. V případě vzniklého zpoždění na trase, si řidič kolejového vozidla nemůže vybrat přestávku jinde (na rozdíl od řidiče nákladních vozidel nebo řidiče zájezdových autobusů), než je plánováno v jízdním řádu. Obdobné je to např. i u osádek letadel.

3.7.4 Členové posádky letadel

Požadavky na odpočinek pro posádky letadel jsou definovány vyhláškou o bezpečnostní letové normě 466/2000 Sb. Ta stanovuje dle §18 bodu 5 bezpečnostní přestávku v délce alespoň 30 minut nejdéle po čtyřech hodinách a třiceti minutách doby letu [15]. Pokud počet přistání během doby letové služby přesáhne 4 přistání, pak je povinností poskytnout bezpečnostní přestávku po každých 3 hodinách letu [15]. Specifikem pro výkon práce členů letových posádek je doba odpočinku při překračování více časových pásem.

3.7.5 Řidiči MHD

Pro řidiče MHD platí dle ES 561/2000 Sb. výjimka, řidiči MHD se tedy řídí Nařízením vlády č. 353/2008 Sb. Pracovní doba řidiče MHD smí činit nejvýše 40h týdně. Může narůst v případě přesčasové práce a spolu s náhradním volnem tak může činit maximálně 60h týdně. Bezpečnostní přestávku, jejíž délka je alespoň 30 minut, musí řidič začít nejpozději po 4 hodinách pracovní činnosti. Přestávku je však možné i rozložit na více částí, avšak každá z částí má minimální délku trvání 10 minut. Díky tomu je možné při vhodné kompozici jízdního řádu využívat těchto bezpečnostních přestávek na obratištích linek, teoreticky je možné zahájit přestávku i na trase linky pomocí vhodného střídání řidičů. Pro aplikaci tohoto systému je však nutné využít právě jednoho řidiče, který v daném místě začíná svoji pracovní dobu k vystřídání pracovníka, který se právě chystá na povinnou, alespoň 10 – ti minutovou bezpečnostní přestávku, a právě jednoho řidiče, který v daném místě svou pracovní dobu ukončí, a to pomocí vhodného pořadí střídání řidičů. Lze však očekávat nevole řidičů k tomuto způsobu řešení přestávek a praktická funkčnost takového konceptu může být snadno narušena zpožděním některé

z linek. Denní odpočinek trvá nepřetržitě 11hodin. Zkrácený denní odpočinek trvá 9 hodin a smí se čerpat pouze 3x mezi dvěma týdenními odpočinky. Chybějící 2hodiny je nutné vyčerpat do konce následujícího týdne. Dělený denní odpočinek se skládá ze dvou nebo 3 částí přičemž jedna část musí trvat alespoň 8hodin a spolu s další jednou nebo dvěma částmi musí dát součet těchto odpočinků alespoň 12hodin. Pro denní odpočinek obecně platí, že veškeré doby dané pro denní odpočinek musí řidič vyčerpat do 24hodin od začátku pracovní činnosti. Týdenní odpočinek pro řidiče MHD je definován, jako doba nepřetržitého odpočinku v týdnu bude činit alespoň 24hodin. Tato doba musí mít součet za období 3 týdnů alespoň 105hodin.

3.7.6 Řidiči dálkových autobusů

1. Řidič musí dodržovat bezpečnostní přestávky podle nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006 ze dne 15. března 2006 o harmonizaci některých předpisů v sociální oblasti týkajících se silniční dopravy, o změně nařízení Rady (EHS) č. 3821/85 a (ES) č. 2135/98 a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 3820/85 (po 4,5 hod. řízení musí mít řidič nepřerušenou přestávku nejméně 45 minut). Přestávka je doba, během níž nesmí řidič řídit ani vykonávat žádnou jinou práci a která je určená výhradně k jeho zotavení [2].

2. Řidič musí dodržovat denní a týdenní dobu odpočinku podle výše zmíněného nařízení. Během běžné denní doby odpočinku musí mít řidič k dispozici lůžko nebo lehátko [2].

3. Při provozování mezinárodní dopravy mimo členské státy EU, EHP (Island, Lichtenštejnsko, Norsko) a Švýcarska se na dobu jízdy vztahuje dohoda AETR (Vyhláška č. 108/1976 Sb., o Evropské dohodě o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě, ve znění pozdějších předpisů), která je v souladu s výše uvedeným nařízením [2].

4. Pracovní doba řidiče musí být evidována. Dálkový autobus musí být vybaven tachografem.

Podle § 100 zákoníku práce je pro zaměstnance v dopravě vydáno speciální nařízení vlády o jejich pracovní době a době odpočinku, a tím je nařízení vlády č. 589/2006 Sb., kterým se stanoví odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě

Podle tohoto nařízení vlády jsou řidiči, pomocníci řidiče a průvodčí, u kterých délka žádného ze spojů nepřesahuje 50 km, nazýváni „členy osádky autobusu v linkové osobní dopravě“, aby je nařízení vlády odlišilo od zaměstnanců v městské hromadné dopravě.

Jejich právní úprava je v hlavě VI nařízení vlády. Podle § 19a tohoto nařízení vlády platí, že na pracovní dobu, dobu odpočinku a bezpečnostní přestávku člena osádky autobusu v linkové osobní dopravě se použijí ustanovení § 16 až 19, to znamená ustanovení, která platí pro řidiče městské hromadné dopravy. Členové osádky autobusu v linkové dopravě mají stejně jako řidiči městské hromadné

dopravy bezpečnostní přestávku, tzv. přestávku placenou. Podle § 19 citovaného nařízení vlády platí, že zaměstnavatel je povinen zajistit, aby doba řízení zaměstnance městské hromadné dopravy byla nejdéle po 4 hodinách řízení přerušena bezpečnostní přestávkou v trvání nejméně 30 minut, nenásleduje-li nepřetržitý odpočinek mezi dvěma směnami nebo nepřetržitý odpočinek v týdnu. Tato přestávka může být rozdělena do několika přestávek v trvání nejméně 10 minut.

Pro přestávku na jídlo a oddech platí obecná právní úprava (§ 88 zákoníku práce), tzn. po 6 hodinách nepřetržité práce 30 minut přestávka. Případně-li bezpečnostní přestávka na dobu přestávky v práci na jídlo a oddech, započítá se přestávka v práci na jídlo a oddech do pracovní doby.

Za dobu čekání mezi spoji náleží členu osádky autobusu v linkové osobní dopravě odměna podle § 9a, tzn., že za každou celou hodinu doby čekání mezi spoji přísluší členu osádky autobusu podle § 2 písm. a) odměna nejméně ve výši 90 % hodinové sazby nejvyšší úrovně zaručené mzdy stanovené pro pátou skupinu prací. Doby čekání mezi spoji se pro účely stanovení odměny v kalendářním měsíci sčítají.

3.7.7 Řidiči vozidel nákladní přepravy

Pro řidiče vozidel nákladní přepravy platí v rámci EU jednotná pravidla. Po 4,5 hod. řízení musí mít řidič nepřerušenu přestávku nejméně **45 minut**, pokud mu nezačíná doba odpočinku. Tato přestávka může být rozdělena na dvě části o délkách 15 a 30 minut, přičemž jedna z nich bude vložena do doby řízení a druhá bude čerpána po skončení doby řízení o celkové délce 4,5 hodiny. Denní doba odpočinku je stejná jako u řidiče MHD, řidič tedy musí mít nedělený odpočinek 11hodin, který může být zkrácen až na 9 hodin, to však nejvýše 3x týdně. Alternativou je dělený odpočinek – ten však ve svém součtu činí 12hodin a smí být čerpán ve dvou oddělených částech v rámci 24 hodin, přičemž první z těchto částí musí trvat nejméně 3 po sobě jdoucí hodiny a druhá nejméně 9 hodin.

Jsou-li ve vozidle 2 řidiči, musí mít každý z nich denní odpočinek v minimální délce trvání 9 po sobě následujících hodin, pro každé období 30hodin. Týdenní doba odpočinku pro řidiče nákladní dopravy má délku 45 hodin. Řidič musí mít ve kterýchkoli po sobě následujících dvou týdnech 2 běžné týdenní doby odpočinku – tedy 2x 45hodin. Může mít i jednu běžnou týdenní dobu odpočinku (45hodin) a jednu zkrácenou dobu odpočinku v délce 24hodin. Toto zkrácení však musí být vyrovnáno odpovídající dobou odpočinku vybranou před koncem 3. týdne, následujícím po dotyčném týdnu. Vyjádřeno v odpočinkových hodinách je to tedy 45h + 24h + kompenzace.

Celková doba řízení mezi dvěma denními odpočinky nebo jedním odpočinkem denním a jedním týdenním nesmí přesáhnout 9 hodin, 2x za týden může být prodloužena na 10 hodin. Týdenní doba řízení nesmí přesáhnout 56 hodin a nesmí být překročena maximální týdenní pracovní doba stanovená

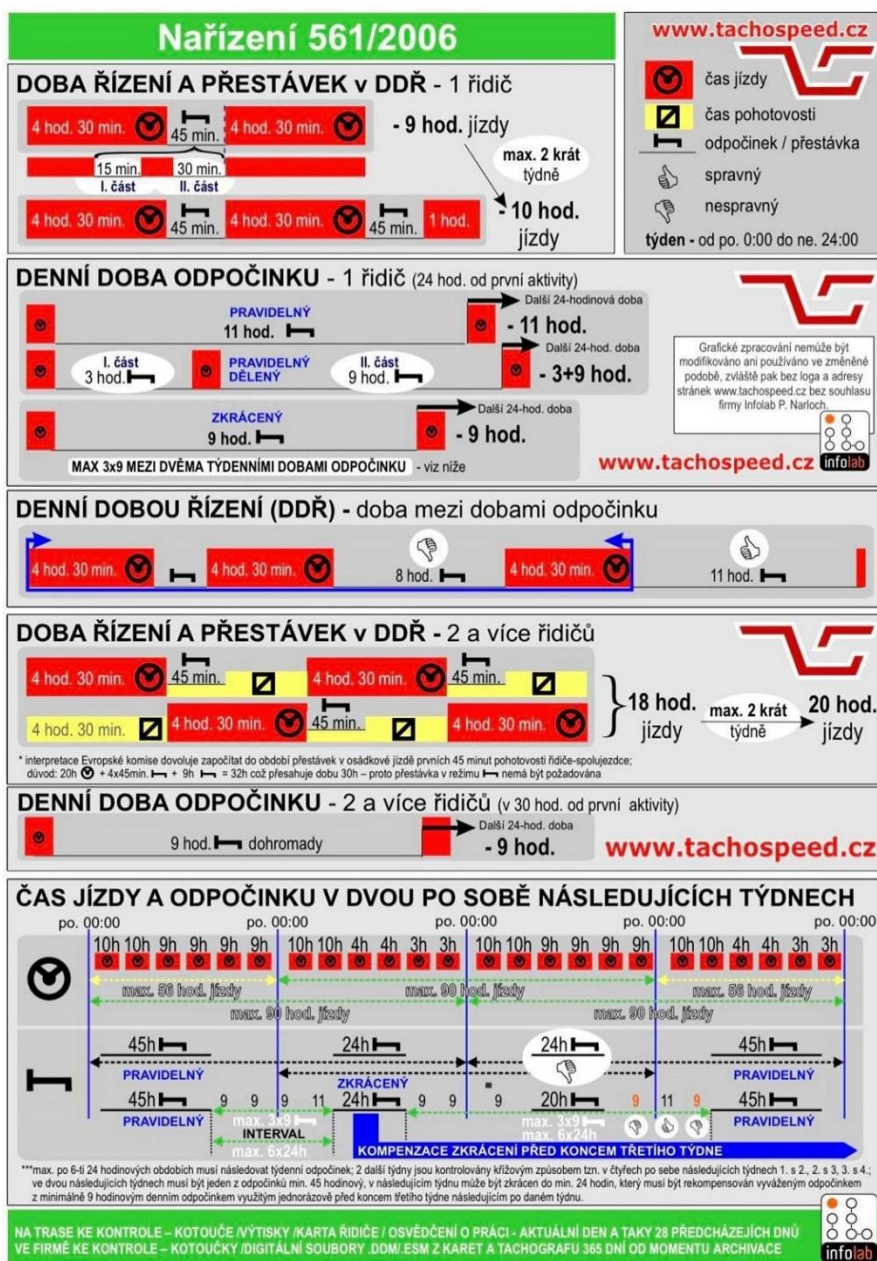
v nařízení vlády č. 589/2006 Sb. Celková doba řízení nesmí přesáhnout 90 hodin za období dvou po sobě následujících týdnů.

3.7.8 Řidiči vozů do 3,5 tuny

Přestávky řidičů vozidel o hmotnosti nižší než 3,5tuny se řídí zákonem 168/2002 Sb. Vzhledem k velmi těžko prokazatelné době řízení – tito řidiči nejsou povinni užívat tachograf či jiným záznamový formát – prokazující dobu výkonu pracovní činnosti, tito řidiči často překračují pracovní dobu stanovenou zákonem, a to buď z vůle vlastní nebo nátlaku zaměstnavatele. V aktuálním časovém horizontu se však dá očekávat nižší nátlak ze strany zaměstnavatele odůvodněný nedostatkem řidičů pro výkon pracovních činností.

4 Užití existujícího softwaru

Pro stanovení přestávek řidičů v rámci zákonem daných podmínek existuje několik software. Tyto software jsou určeny zejména pro firmy zabývající se dálkovou autobusovou dopravou nebo nákladní silniční přepravou, kdy je firmou splněna alespoň jedna z podmínek, aby se řidiči museli řídit ES56/2006. Jedním z takovýchto software je i tachospeed. Jedná se o speciální software založený na jednoduchém uživatelském rozhraní, jehož „demo“ verze je volně přístupná.



Obrázek 2 – Grafické znázornění doby odpočinku pro řidiče linkových autobusů [4].

Takovýto software dokáže po zadání délky pracovního výkonu spočítat, jaké jsou minimální nároky na bezpečnostní přestávku a to s ohledem na zákonná nařízení uvedená v kapitolách 3.2 a 3.3 této práce. Software též nabídne několik málo alternativ, jak lze tyto bezpečnostní přestávky čerpat.

5 Evidence pracovní doby - tachograf

Pro kontrolu dodržování přestávek při výkonu práce řidiče slouží tzv. tachograf. Z tohoto zařízení musí být možné dohledat záznamy o pracovní činnosti z posledních 28 dní (+ den aktuální). Tato povinnost je důsledkem nařízení ES 3821/85 . Tachografy se dělí do 2 základních skupin, a to:

- 1) automatické analogové tachografy, kdy jsou záznamy prováděny na záznamový list,
- 2) tachografy se zápisem na paměťovou kartu řidiče s dalším dělením
 - a. s manuálním záznamem – řidič zadává činnosti pomocí digitálního tachografu,
 - b. s automatickým záznamem.

*Pokud je tachograf z nějakého důvodu nefunkční, nebo pokud došlo k poškození záznamové karty, lze vést záznam pomocí tachografových výtisků a jejich ručního doplňování.

Pokud řidič nemá ani jeden z výše uvedených tachografů, může svoji pracovní činnost doložit ještě následujícími dvěma způsoby:

- 1) na území ČR může dle Vyhlášky č. 478/2000 Sb. použít i jiný doklad, který prokáže, že řidič řídil v uvedené období, tímto dokladem může být i tzv. žluté kolečko,
- 2) doloží-li činnost výkonu práce jiným dokladem, dle 2009/959/EU – formulářem potvrzení o činnostech.

Při kontrole záznamů z digitálního tachografu se používá tzv. kontrolní karta. Ta umožňuje kontrolním úřadům stahovat data z každého digitálního tachografu. V případě nutnosti opravy či kalibrace digitálního tachografu je nutné použít tzv. servisní kartu. Vizuální podoba digitálního tachografu je uvedena na obrázku 3.



Obrázek 3 – Digitální tachograf [14]

6 Optimalizační software

Předložená diplomová práce se zabývá matematickým modelováním problematiky bezpečnostních přestávek řidičů. Sestavené matematické modely jsou zpravidla řešeny pomocí software, kterých je k dispozici větší množství. Pro řešení modelů uvedených v diplomové práci byl zvolen software Xpress-IVE, jehož „demoverze“ je pro akademické účely volně a zdarma přístupná.

Software pracuje v programovacím jazyce zvaným MOSEL. Text programu v programovacím jazyce MOSEL by se dal formálně rozdělit na 6 základních částí:

- záhlaví programu,
- deklarační část,
- definování vstupních dat (konstant),
- definování omezující podmínky,
- účelová funkce,
- výstupní řešení.

V záhlaví programu se vyskytují klíčová slova *model* a *uses*. Tato klíčová slova jsou nutná pro správnou funkci programu. Deklarační část je uvozena klíčovým slovem *declarations*. Po tomto příkazu je vymezen prostor pro definování všech konstant a proměnných, se kterými je následně v programu pracováno. Konstanty i proměnné je nutné definovat včetně indexových rozsahů, kterých nabývají. Po nadefinování všech nutných proměnných je deklarační část ukončena klíčovým slovem *end-declarations*. Následně se zadávají vstupní data, se kterými bude program pracovat. K zadávání vstupních dat je možno využívat matice. Poté je třeba definovat omezující podmínky. Omezující podmínky vymezují množinu přípustných řešení. Stěžejním bodem je definování účelové funkce. Účelovou funkci zadáváme s využitím příkazem *minimize* nebo naopak *maximize*. K výpisům výsledků se používají příkazy *writeln*, *geotbjval*, *getsol*.

7 Oběhy vozidel

Každý plán jízd a konkrétní provozní koncept vykazuje konkrétní potřebu vozidel nutných k jeho vykonání. Oběhy vozidel, resp. jejich počet a vhodné doby obratu je tak nutno sledovat již v koncepční úrovni přípravy jízdního řádu [6].

V taktovém jízdním řádu by byla maximální efektivita nasazení vozidla dosažena tehdy, pokud by se vozidlo obracelo vždy v taktových uzlech a doba obratu by odpovídala přestupním dobám [6].

7.2 Obecné zásady návrhu oběhů vozidel

Uvažování s minimálními dobami obrátů po celou dobu provozní periody však není příliš vhodné [6]. To je dáno tím, že při vzniku zpoždění neexistuje časová rezerva pro jeho redukci. To je následně předáváno mezi návaznými spoji v rámci oběhu.

Minimální doby obratu lze realizovat v období ranní špičky, která je na počet nasazených vozidel určující. Oběhy vozidel musí respektovat provozní a technické zázemí dopravce (údržba, čištění, zbrojení atp.) [6].

7.3 Vykonávání běžné údržby vozidel

Žádný dopravce nemá technické zázemí ve všech obratových stanicích [6]. Některá vozidla proto musí vykonat režijní jízdu do té obratové stanice, kde se nachází potřebné zázemí nutné pro vykonání údržbového úkonu. Orientační přehled běžné údržby vozidel dle periodicity a odhadovaná doba vykonávání jsou znázorněny v tabulkách 1 a 2.

Tabulka 1 – Orientační přehled běžné údržby vozidel dle periodicity [6].

		Tankování	Vyčítání tržeb	Zbrojení
	Autobusy	500 - 800 km	1x/den 1x/týden	/
ŽELEZNICE	Motorové vozy a lokomotivy	400 - 800 km	/	Doplnění vody - spolu s tankováním
	Elektrické vozy a lokomotivy	/	/	4 000 – 8 000 km (provozní ošetření)
	Osobní vozy	/	/	4 000 – 8 000 km (doplnění vody, čištění a odsávání toalet)

Tabulka 2 – Orientační přehled doby vykonání běžné údržby vozidel [6]

	Tankování	Zbrojení	Provozní ošetření
Autobusy	15 - 30 min	/	/
Železnice		1 - 3 h* (nafta, voda)	3 - 4 h

7.4 Snížení neproduktivních prostojů

Výše zmíněné úkony vykonávání základní údržby vozidla je vhodně provádět v časech, kdy je vozidlo odstaveno – tedy bez narušení oběhu vozidla. Je proto vhodné, aby oběh každého vozidla byl vytvořen tak, aby alespoň jednou dosáhlo vozidlo té koncové stanice, v níž je umístěno zázemí pro běžnou údržbu. V takové stanici by mělo mít vozidlo plánovaný prostoje, jehož minimální doba trvání musí být větší než maximální doba trvání běžného údržbového úkonu. Doba trvání běžného údržbového úkonu lze snížit na úkor zvýšení četnosti provádění běžné údržby.

7.5 Odhadovaná limitní délka oběhů vozidel

Standardní odhadovaná kilometráž oběhů vozidel pro jednotlivé druhy dopravy je uvedena v tabulce 3. Tyto orientační hodnoty denního oběhu vozidel je důležité brát v potaz pro určení údržby většího rozsahu (např. výměna pneumatik atp.).

Tabulka 3 – Orientační přehled denní kilometráže oběhů vozidel [6].

	Druh dopravy	Orientační denní kilometráž oběhů vozidel
Autobusová doprava	Dálková	500 km
	Regionální	200 km
Železniční doprava	Dálková	1000 km
	Regionální	400 km

7.6 Časová rezerva

Dopravní cesty patří z hlediska spolehlivosti k nespolehlivým cestám. To je dáno ať už výskytem dopravních nehod, kongescemi, uzavírkami či jinými zvláštními vlivy.

Tyto vlivy vytvářejí změny oproti původním, naplánovaným trasám a jejich časovým výkonům, tudíž mají zásadní vliv na určování bezpečnostních přestávek (je-li např. dálniční odpočívadlo uvažované pro vykonání bezpečností přestávky dočasně uzavřeno, je nutné tuto skutečnost

zakomponovat již do vstupních omezujících podmínek a dočasně jej vyřadit z možných míst k vykonání povinné bezpečnostní přestávky).

Výskyt kongescí, které z našeho pohledu vytvářejí neočekávané zdržení na trase, lze mnohdy predikovat. Vykonává-li řidič jízdu v části trasy ve špičkové hodiny v místě, kde dochází k periodickým kongescím (např. páteční odpoledne), predikce založená na zkušenostech z předchozích obdobných místně-časově specifických dopravních poměrů bývá velice přesná. Z již dostupných technologií ji např. predikují i individuální navigační systémy používané v automobilové dopravě. Největší problém z hlediska predikce představují dopravní nehody a jiná omezení (např. uzavírka způsobená vlivem počasí – pád stromu, nesjízdnost komunikace atp.), které lze predikovat jen s určitou pravděpodobností. V takovém případě jsme teoreticky schopni porovnávat spolehlivost tras z hlediska pravděpodobnosti např. výskytu nehod, založených na zkušenostech, prakticky však nám takový údaj může pro stanovení odhadovaného zdržení při využití této trasy a s ním spojenou problematikou k vykonání bezpečnostních přestávek pomoci jen omezeně.

Pro stanovení časové rezervy je tedy důležité znát tyto aspekty:

- délku trasy,
- čas nutný pro vykonání trasy,
- průměrné zdržení vozidel na trase,
- spolehlivost trasy.

8 Analýza existujících metod podle doporučené literatury

Důležitým krokem k další práci je prozkoumat, jaké možnosti nabízejí již řešené optimalizační úlohy. Pro získání komplexního přehledu v tomto směru posloužila práce „Truck Driver Scheduling Problem“ od autorů M.Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi, která byla vydána v prosinci 2016. V ní autoři prezentovali vybrané práce, které pracují s problematikou optimalizace řidičů nákladních automobilů. Zmínění autoři sestavili klasifikaci, dle které hodnotili, jakými problematikami se každá ze zkoumaných prací zabývá. Zjistili, že existuje množství výzkumných prací zaměřených na uplatňování pracovních předpisů týkajících se povinnosti plánování dob odpočinků a přestávek, na druhé straně je nedostatek prací obsahujících problematiku zkoumání vlivu dob odpočinků a přestávek spolu s psychofyzikálními zážitky, které bezpečnost ovlivňují a jsou potvrzeny zkušenostmi řidičů [9]. Uvedené práce, zaměřené na pracovní předpisy dob odpočinků a přestávek, jsou však užity konkrétně – nejen pro konkrétní druh dopravního prostředku ale ve většině případů i pro konkrétní společnost. Vyskytují se v nich tedy specifika, která většinou nelze užívat pro jiný účel ani v rámci stejného druhu dopravy.

Zkoumané přístupy, jimiž se práce „Truck Driver Scheduling Problem“ zabývá, jsou též místně-specifické, tedy řídí se zákonnými nařízeními v zemích působnosti.

Kompletní přehled zkoumaných výzkumných prací spolu s problematikou, kterou ve své publikaci zohledňuje a řeší, je uveden v tabulce č. 4.

Papers	Problems' Types				Nature of the good transported		Work Hours Regulations						Various constraints required						
	Scheduling			Routing	Ordinary	Dangers	UnitedState	EuropeanUnion	Canada	Africa	Australia	Other	DutyDuration	RestDuration	MealBreakDuration	BreakLocation	Safety	Psycho-physic	Driver's Experience
	Driver	Crew	Vehicle																
(Goel 2014)	X				X		X						X	X	X		X		
(Goel & Vidal 2014)	X			X	X		X	X	X	X	X		X	X	X		X		
(Goel & Irnich 2014)	X			X	X		X						X	X	X		X		
(Chen et al. 2013)		X			X							X	X	X	X				
(Drexler et al. 2013)	X			X	X			X					X	X	X				
(Rancourt et al. 2013)	X			X	X		X						X	X					
(Goel & Kok 2012)		X			X			X					X	X	X				
(Goel & Rousseau 2012)	X			X	X				X				X	X	X				
(Goel et al. 2012)	X		X		X						X		X	X	X				
(Goel 2012a)	X				X						X		X	X	X				
(Goel 2012b)	X				X				X				X	X	X				
(Goel 2012c)	X				X		X	X					X	X	X				
(Wen et al. 2011)	X			X	X							X	X						
(Knust & Schumacher 2011)	X					X						X	X	X					
(Ren et al. 2010)	X			X	X							X	X	X					
(Kok et al. 2010)	X			X	X			X					X	X	X				
(Kok et al. 2010)	X			X	X			X					X	X	X				
(Goel 2010)	X				X			X					X	X	X				
(Prescott-Gagnon et al. 2010)	X			X	X			X					X	X	X				
(Archetti & Savelsbergh 2009)	X			X	X							X	X	X					
(Oughalime et al. 2009)	X			X	X							X	X		X	X			
(Goel 2009a)	X				X			X					X	X					
(Goel 2009b)	X				X		X						X	X					
(Portugal et al. 2009)	X				X							X	X	X	X				
(Zäpfel & Bögl 2008)	X		X		X							X	X	X					
(Mesquita & Paiais 2008)	X		X		X							X							
(Erera et al. 2008)	X				X							X	X						
(Desaulniers 2007)		X			X							X	X						
(Kwan et al. 2001)	X				X						X		X	X					

Tabulka 4 – Klasifikační kritéria zabývající se problematikou rozvrhu řidičů [9]

Přibližný rozbor, čím se jednotlivé práce autorů zmíněných v tabulce 4 je následující:

*(Goel 2014) se zabíral problémem vozidlového plánování s cílem posoudit dopad změn provozních předpisů na provozní náklady a bezpečnost silničního provozu. Pro řešení tohoto problému byla navržena simulační metoda. Výsledky ukazují, že dodatečné náklady a přínosy z peněžních fondů na bezpečnost silničního provozu jsou ve stejném pořadí jako u všech regulačních možností a pro některé z nich jsou přínosy z peněžních fondů nad rámec dodatečných provozních nákladů [9].

*(Goel & Vidal 2014) se zabývali problémem trasování vozidla a rozpisu plánování směn řidičů nákladních vozidel s využitím hybridního genetického algoritmu. Cílem jejich práce je minimalizace přepravní náklady s přihlédnutím k regulaci pracovní doby. Výsledky výpočtů ukázaly, že pravidla EU vedou k větší bezpečnosti ve srovnání s kanadskými, australskými a americkými pravidly [9].

*(Goel & Irnich 2014) se zabývali problémem kombinovaného směřování a rozvržením nákladních vozů s cílem vytvořit kalendář, který by splňoval omezení pracovní doby. K řešení tohoto problému autoři navrhli oborový a cenový algoritmus, který je prvním exaktním algoritmem, který řeší danou problematiku na bázi kombinovaného VRTDSP [9].

*(Chen et al 2013) se zabývali problémem rozvržením skupin s pravidly čínského stravování, ve kterém navrhli přístup k řešení tohoto problému. Cílem příspěvku je minimalizovat počet směn a provozní náklady. Tento přístup byl testován v software ILOG Cplex a výsledky ukázaly, že tento přístup může být aplikován na řešení velkoplošného problému plánování skupin [9].

*Problematika souběžného směřování a rozvržení vozidel a posádek v dálkové silniční dopravě v Evropě byla dále zpracována (Drexler et al. 2013). V této práci musí být sběr a dodávka zásilek s využitím heterogenního vozového parku a řidičů prováděna v na bázi víceúrovňového plánování. Pro vyřešení tohoto problému byla navržena meta-heuristika s velkou prošetřovanou oblastí a výsledky ukazují platnost tohoto přístupu [9].

*Problém ohledně rozvržení skupin řidičů v evropské nákladní silniční dopravě byl také zpracován (Goel & Kok 2012), kteří se snažili zformulovat kalendář, který by odpovídal nařízení (ES) č. 561/2006. Pro vyřešení tohoto problému autoři použili heuristickou metodou Depth First Breadth Second, která může nalézt dobré řešení, ačkoliv tento problém nebere v úvahu minimalizaci nákladů.

* Text byl přeložen z originálu (M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi - Truck Driver Scheduling Problem) autorem práce M. Peřinou. Vzhledem k tomu, že autor není držitelem jazykového certifikátu překladatelské úrovně, se tedy jedná o neautorizovaný překlad

* (Goel & Rousseau 2012) se zabírali problematikou rozvrhu řidičů nákladních vozidel v Kanadě, přičemž určili možnost návštěvy sledovaných lokalit v daném časovém intervalu tak, aby byly respektovány kanadské předpisy o pracovní době řidičů z povolání. K řešení tohoto problému autoři hodnotili výkonnost exaktního algoritmu, která byla porovnávána se dvěma heuristickými přístupy, které vyžadují méně času na výpočet bez záruky nalezení optimálního řešení. Výsledky ukázaly značnou efektivitu heuristických přístupů [9],

*(Goel et al. 2012) řešili problematiku pracovní doby australských řidičů nákladních vozidel. Cílem této práce bylo navrhnout rozvrh, který respektuje australské právo platné od září 2008 týkající se únavy řidičů těžkých nákladních vozidel. V rámci řešení této problematiky autoři hodnotili návrh exaktní metody, kterou srovnávali se čtyřmi heuristickými metodami, které nebyly tak časově náročné. Výsledky ukázaly účinnost těchto heuristik založených na zvolené metodě [9],

*(Goel 2012a) se zabýval variantou problematiky rozvržení pracovní doby pro řidiče nákladních vozidel, která se snažila minimalizovat celkovou dobu trvání pracovní doby. Výsledky programu „Mixed Integer“, který byl zvolen k řešení dané problematiky, ukázaly významné zkrácení doby v daném pracovním plánu [9],

*(Goel 2012b) se zabýval rozvrhem pracovní doby řidičů nákladních vozidel u kanadských přepravních společností, který musí zajistit, aby plánování a rozvržení pracovní doby odpovídalo předpisům o pracovní době řidičů. V prvním kroku byla problematika testována pomocí programu ILOG Cplex 12, který snížil výpočetní čas a současně respektoval kanadské zákony. V druhém kroku byl použit iterativní a dynamický přístup. Výsledky druhé části ukázaly významné snížení zkoumané pracovní doby [9],

*(Goel 2012c) se dále zaměřil na problematiku rozvrhů pracovních dob řidičů nákladních vozidel, kde řidiči mohli odpočívat ve vyhrazených prostorech nebo na adekvátních odpočívadlech. Cílem této práce bylo nalézt přiřazení problematiky k zákonům týkajících se systému hodinových služeb, jejichž provádění začíná ze stejného místa v odpovídajícím časovém úseku a s minimální dobou trvání. Navržený model v tomto článku je velice flexibilní a může být konfigurován tak, aby zohledňoval rozdílné soubory pravidel stanovenými vládními předpisy a smlouvami. K řešení této problematiky přistoupil autor za využití dynamického programování, jehož výsledky ukázaly efektivitu proti regulaci pracovní doby ve Spojených státech a Evropské unii [9].

* Text byl přeložen z originálu (M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi - Truck Driver Scheduling Problem) autorem práce M. Peřinou. Vzhledem k tomu, že autor není držitelem jazykového certifikátu překladatelské úrovně, se tedy jedná o neautorizovaný překlad

*(Wen et al. 2011) zkoumali trasování vozidel a problém s plánováním pracovní doby řidičů v rámci dánského království u společnosti Danmark s důrazem na nutnost snížit celkové náklady na doručení. Pro řešení dané problematiky byla použita meta-heuristická metoda Multilevel Variable Neighborhood Search, jejíž výsledky ukázaly, že ji lze použít k řešení dalších problémů se směřováním vozidel [9],

*(Knust & Schumacher 2011) se zaměřili na problematiku rozvrhu (plánování) pracovní doby řidičů (tankových) nákladních vozidel v malých ropných společnostech. Cílem této práce bylo přiřadit řidiče na každou pozici, která odpovídala zákonným omezením a bezpečnosti, celkové pracovní době řidičů. K řešení dané problematiky autoři navrhli smíšený celočíselný lineární model. Výsledky ukázaly, že daný algoritmus může generovat proveditelné rozvrhy v krátkém časovém horizontu [9],

*(Ren et al. 2010) se zaměřil na novou variantu problematiky směřování vozidel s využitím časových oken, vícesměnného provozu a přesčasů. Cílem této práce bylo navrhnout soubor tras a jejich rozvržení tak, aby splňovaly všechny dané požadavky a byla co nejlépe využita časová okna s minimálními celkovými náklady v plánovacím horizontu. K řešení tohoto problému autoři navrhli dvě heuristiky: Shift Dependent (SD) a Shift Independent (ID) [9],

*(A. L. Kok et al. 2010) se zabývali studiem problematiky směřování vozidel s primárním cílem určit soubor tras a jejich rozvržení, aby vyhovovaly všem požadavkům a využily časová okna s minimálními celkovými náklady pro plánovací horizont. Pro vyřešení tohoto problému byla navržena optimalizační metoda spočívající v návrhu doby odjezdu vozidla na bázi dynamického programování. Výsledky studie ukázaly významnou minimalizaci trvání služby [9],

*(Kok et al. 2010) se zaměřili na trasování vozidel a problematiku jejího rozvržení, jejímž hlavním účelem bylo vytvořit směřování, které by bylo v souladu s legislativou ES o řízení a pracovní době. Jako způsob, jak najít odpověď na tento problém, byl navržen heuristická metoda plánování přestávek [9].

* Text byl přeložen z originálu (M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedí - Truck Driver Scheduling Problem) autorem práce M. Peřinou. Vzhledem k tomu, že autor není držitelem jazykového certifikátu překladatelské úrovně, se tedy jedná o neautorizovaný překlad

*(Goel 2010) se zabýval problematikou plánování pracovní doby řidičů v EU usilujíc o nalezení přijatelného harmonogramu rozvržení pracovní doby řidičů nákladních vozidel, který by se řídil evropskými předpisy. Navrhnul přístup s názvem „Breadth First Search“, který byl testován a testování ukázalo, že tento přístup zaručí nalezení harmonogramu směn v souladu s nařízením ES [9],

*(Prescott-Gagnon et al. 2010) se zabývali evropskými předpisy pro řidiče v rámci trasování vozidel tak, aby vytvořili trasy v souladu s evropskými předpisy. K vyřešení dané problematiky byla navržena meta-heuristika „Large Neighborhood Search“ a výpočetní výsledky potvrdily účinnost této metody ve srovnání s odvětvovou a cenovou heuristikou a generátorem Tabu Search Column [9].

*(Archetti & Savelsbergh 2009) se přímo zabývali problematikou plánování rozvrhu, řidičů v silniční dopravě. V této práci se autoři snažili studovat a specifikovat dopad nařízení předpisů týkajících se pracovní doby na problematiku plánování jízd [9],

*(Oughalime et al. 2009) se zabývali problematikou využití vozidel a sestavení rozvrhu řidičů s cílem minimalizovat celkový počet směn a celkové náklady na zajištění provozu [9],

*(Goel 2009a) se zaměřil na problematiku rozvržení směn řidičů s respektováním předpisů ES č. 551/2006 Sb. V této práci se snažil vytvořit rozvrh řidičů a pracovní doby řidičů nákladních vozidel v rámci plánování horizontů na dobu delší než jeden týden. K řešení problematiky byl použit algoritmus „Depth First Search“ spolu s metodou „Trip Calculation“ [9],

*(Goel 2009b) se zabýval problematikou plánování směn řidičů nákladních vozidel, které jsou regulovány americkými předpisy o pracovní době. Cílem práce bylo vytvoření vhodného rozvržení řidičů a jejich pracovní doby pro horizont větší než jeden týden. K řešení dané problematiky byl využit algoritmus Depth First Search spolu s metodou Trip Calculation [9],

*(Portugal et al. 2009) zpracoval problematiku obecného rozvrhu pracovní doby řidičů za použití nového matematického modelu nazvaného Set Partitioning/Covering [9],

* Text byl přeložen z originálu (M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi - Truck Driver Scheduling Problem) autorem práce M. Peřinou. Vzhledem k tomu, že autor není držitelem jazykového certifikátu překladatelské úrovně, se tedy jedná o neautorizovaný překlad

*(Zäpfel & Bögl 2008) řešili problematiku plánování směn řidičů s možností outsourcingu. Hlavním cílem této práce bylo minimalizovat celkové náklady pro všechny trasy. K řešení daného problému byla využita genetické algoritmy v kombinaci s metodou „Tabu Search“. Výsledky práce ukázaly, že použitá meta-heuristika je k řešení dané problematiky vhodná [9],

*(Mesquita & Paiaš 2008) řešili problematiku směn řidičů s využitím lineárního programování, konkrétně techniky Branch and Bound. Vypočítané výsledky (výsledná data) ukázala účinnost (použitelnost) navrhovaného přístupu [9],

*(Erera et al. 2008) se zaměřili na problematiku dynamického rozvrhování směn řidičů. Cílem této práce bylo zvolit rozvrhy řidičů pro zadané fixní období. K řešení tohoto problému navrhli autoři techniku založenou na hladovém algoritmu. Spolehlivost navrhované techniky byla potvrzena různými testovacími úlohami [9].

*(Desaulniers 2007) řešil problematiku směřování vozidel a sestavení rozvrhu pro řidiče s ohledem na optimalizaci fixních nákladů. Pro vyřešení dané problematiky autor použil účelovou funkci v kombinaci s metodou generování sloupců a zabýval se hodnocením dopadu rostoucích fixních nákladů na rozdílnost pracovních dob. Výsledky ukázaly, že s rostoucími fixními náklady se zvyšuje rozdílnost pracovních dob [9],

*(Kwan et al. 2001) se zabýval problematikou rozvrhování řidičů na bázi hybridního genetického algoritmu. Výsledky ukázaly, že navrhovaná metoda generuje lepší řešení, než jsou rozvrhy směn řidičů vytvořených odborníky na plánování rozvrhů řidičů a jsou srovnatelné s výsledky získanými celočíselným lineárním programováním [9],

* Text byl přeložen z originálu (M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi - Truck Driver Scheduling Problem) autorem práce M. Peřinou. Vzhledem k tomu, že autor není držitelem jazykového certifikátu překladatelské úrovně, se tedy jedná o neautorizovaný překlad

8.1 Vyhodnocení publikovaných metod

Metody zmíněné v práci *Truck Driver Scheduling problem* autorů *M.Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi* publikované v roce 2016 obsahují celou řadu přístupů cílených na konkrétní situace závislé na geografických podmínkách. Některé z nich se věnují i problematice plánování směn řidičů při zohlednění ustanovení ES 561/2006 Sb., např. Goel 2010, Kok et al. 2010. Podle očekávání nebyla ve zmíněných pracích žádná, která by se zabývala Nařízením vlády ČR č. 589/2006 Sb., kterým se stanoví odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě (viz. Podkapitola 3.3)

Problematikou plánování směn řidičů se dlouhodobě a systematicky zabývá Prof. Dr. Asvin Goel, jehož práce se v dané publikaci vyskytují nejvíce.

Při řešení dané problematiky se uplatňuje celá řada přístupů, nejčastěji je zmiňováno použití genetických algoritmů v kombinaci s různými dalšími přístupy. V několika případech bylo zaznamenáno použití exaktních přístupů, zejména pro srovnání úspěšnosti a efektivity heuristických přístupů nebo při řešení rozsáhlých úloh.

V dalším textu budou podrobněji rozebrány tři další exaktní přístupy nazvané pracovně následujícími způsoby:

1. sekvenční exaktní přístup (Majer, Palúch, 2016),
2. jednofázový exaktní přístup založený na lineárním programování,
3. rozšířený jednofázový exaktní přístup na bázi modelu Vehicle Routing Problem with Time Windows.

8.1 Sekvenční exaktní přístup T.Majera a S. Palúcha

Autoři se své práci zabývali problematikou rozvrhování směn řidičů ve veřejné autobusové dopravě s využitím lineárního matematického modelu. Podle jejich sdělení v literatuře byla funkčnost modelu experimentálně ověřena na reálných údajích z městské hromadné dopravy v souměstí Martin - Vrútky [7].

Jedná se o lineární matematický model, ve kterém se minimalizuje celkový počet vozidel potřebných k obsluze zadané množiny spojů $S = \{1.2.3 \dots n\}$, a který zohledňuje i plánování bezpečnostních přestávek řidičů.

Spojem je v rámci této metody uvažována uspořádaná čtveřice – $cod_k, cpr_k, mod_k, mpr_k$.

cod_k ... čas odjezdu spoje $k \in S$ z výchozí zastávky/stanice,

mod_k ... místo odjezdu spoje $k \in S$,

cpr_k ... čas příjezdu spoje $k \in S$ do cílové zastávky/stanice,

mpr_k ... místo příjezdu spoje $k \in S$.

Prázdné přejezdy jsou popsány maticí M . Jednotlivé prvky matice $M = \{m(u, v)\}$ představují doby potřebné k přejezdům vozidel neobsazených cestujícími ze zastávky u do zastávky v [7].

Cílem optimalizace je snížit počet vozidel na minimální přípustnou hranici. Způsobem jak tohoto dosáhnout je, aby každé vozidlo vykonalo co nejvyšší počet spojů. Abychom zjistili, zda vozidlo může po obsluze spoje i obsloužit spoj j , zavedeme podmínku [7] ve tvaru (1):

$$cod_j \geq cpr_i + m(mpr_i, mod_j) \quad (1)$$

V případě, že čas odjezdu spoje $j \in S$ nastane dříve, než je čas příjezdu autobusu po obsluze spoje $i \in S$ do výchozí zastávky/stanice spoje $j \in S$ (hodnota cod_j je větší nebo rovna hodnotě $cpr_i + m(mpr_i, mod_j)$), pak je možné, aby vozidlo, jež obsloužilo spoj $i \in S$, obsloužilo též spoj $j \in S$.

Kromě toho je zavedena do výpočtu množina $E = \{(i, j); i \in S, j \in S, i < j\}$. Prvky této množiny jsou dvojice spojů, přičemž spoj $i \in S$ časově předchází spoji $j \in S$.

Za účelem rozhodování je do úlohy je zavedena množina bivalentních rozhodovacích proměnných x_{ij} . Proměnná x_{ij} modeluje rozhodnutí, zda spoj $j \in S$ bude ($x_{ij} = 1$) nebo nebude ($x_{ij} = 0$) obsluhován bezprostředně za spojem $i \in S$ stejným autobusem v turnuse [7].

Pokud by pro všechny proměnné platilo $x_{ij} = 0$, potom by na obslužení všech spojů bylo potřeba $|S| = n$ autobusů, neboť pro obsluhu každého spoje by byl vytvořen samostatný turnus a každý turnus by obsahoval právě jeden spoj [7]. Nebo ještě jinak vyjádřeno, každý spoj by byl obsluhován jiným

autobusem [7]. Pokud by právě jedna proměnná x_{ij} nabyla hodnoty 1, potom by se celkový počet potřebných autobusů rovnal $n - 1$, neboť právě jeden turnus by obsahoval 2 spoje. Každá proměnná x_{ij} , která nabyde hodnoty 1, ušetří právě jedno vozidlo.

Počet potřebných autobusů potom vyjadřuje vztah (2):

$$n - \sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \quad (2)$$

Proto také platí, že minimalizovat počet autobusů znamená řešit ekvivalentní úlohu o maximalizaci funkce:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{i,j} \quad (3)$$

Matematický model pro řešení problému s minimálním počtem turnusů by tedy měl tvar [7]:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{i,j} \rightarrow \max \quad (4)$$

za podmínek:

$$\sum_{i \in (i,j) \in E} x_{i,j} \leq 1 \quad \text{pro } j \in S \quad (5)$$

$$\sum_{j \in (i,j) \in E} x_{i,j} \leq 1 \quad \text{pro } i \in S \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad (i, j) \in E \quad (7)$$

Výraz (4) reprezentuje účelovou funkci modelu – počet přejezdů autobusů mezi spoji, který je maximalizován (tím je minimalizován i počet použitých autobusů). Skupina omezujících podmínek (5) zajišťuje, že na výchozí zastávku/stanici spoje $j \in S$ přijede maximálně jeden autobus. Skupina omezujících podmínek (6) zajišťuje, že z cílové zastávky/stanice spoje $i \in S$ odjede maximálně jeden autobus. Skupina omezujících podmínek (7) vymezuje definiční obory proměnných použitých v modelu.

Model (4) – (7) má však jednu zásadní nevýhodu, a to, že při plánování neproduktivních přejezdů autobusů mezi spoji nepřihlíží k celkové době těchto neproduktivních přejezdů (předpokládáme, že doba neproduktivního přejezdu je přímo úměrná délce neproduktivního přejezdu). Za účelem minimalizace celkové délky neproduktivních přejezdů autobusů (vyjádřené celkovou dobou) je ve druhé fázi řešení nutno řešit model ve tvaru:

$$\sum_{(i,j) \in E} m(mpr_i, mod_j)x_{i,j} \rightarrow \min \quad (8)$$

za podmínek:

$$\sum_{i(i,j) \in E} x_{i,j} \leq 1 \quad \text{pro } j \in S \quad (9)$$

$$\sum_{j(i,j) \in E} x_{i,j} \leq 1 \quad \text{pro } i \in S \quad (10)$$

$$\sum_{i(i,j) \in E} x_{i,j} = |S| - T \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad (i, j) \in E \quad (12)$$

Výraz (8) reprezentuje účelovou funkci modelu – celkovou dobu neproduktivních přejezdů autobusů mezi spoji. Skupiny omezujících podmínek (9), (10) a (12) mají stejné významy jako u předchozího modelu. V podmínce (11) symbol $|S|$ reprezentuje počet spojů (mohl by být nahrazen i symbolem n) a symbol T reprezentuje počet vytvořených turnusů. Podmínka tedy vyjadřuje, že (maximální) neproduktivní počet přejezdů získaný v předchozí fázi řešení zůstane zachován, tedy nebude navyšován počet nasazených vozidel.

Model (8) – (12) zohledňují délky přejezdů mezi obsluhami spojů, však nezapočítává délky přejezdů z depa ke spojům a ze spojů zpět do depa. Aby mohly být tyto další neproduktivní přejezdy zohledněn, zavedou se do modelu (8) – (12) další dvě skupiny rozhodovacích bivalentních proměnných a to skupina proměnných u_i modelujících přejezdy z depa ke spoji $i \in S$ a skupina proměnných v_i modelujících přejezdy ze spoje $i \in S$ do depa. Označíme-li symbolem D depo, přeje model (8) – (12) do tvaru

$$\sum_{i(i,j) \in E} m(mpr_i, mod_j) x_{i,j} + \sum_{i \in S} m(D, mod_i) u_i + \sum_{i \in S} m(mpr_i, D) v_i \rightarrow \min \quad (13)$$

za podmínek:

$$u_j + \sum_{i(i,j) \in E} x_{i,j} = 1 \quad \text{pro } j \in S \quad (14)$$

$$v_i + \sum_{j(i,j) \in E} x_{i,j} = 1 \quad \text{pro } i \in S \quad (15)$$

$$\sum_{i(i,j) \in E} x_{i,j} = |S| - T \quad (16)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad (i, j) \in E \quad (17)$$

$$u_i \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in S \quad (18)$$

$$v_i \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in S \quad (19)$$

Výraz (13) reprezentuje účelovou funkci modelu – celkovou dobu neproduktivních přejezdů autobusů mezi spoji, tentokrát již zohledňující i neproduktivní přejezdy z depa na výchozí zastávky/stanice spojů a neproduktivní přejezdy z cílových zastávek/stanic spojů do depa. Protože musíme umožnit příjezd vozidla z depa ke každému spoji a umožnit odjezd do depa od každého spoje, je v účelové funkci u nově přidaných členů uvedena množina všech spojů S . Skupiny omezujících podmínek (9) a (10) nově přecházejí do tvarů (14) a (15) a nově obsahují i proměnné u_i a v_i , protože ke každému spoji $i \in S$ musí

být umožněn příjezd autobusu z depa a od každého spoje $i \in S$ musí být umožněn odjezd autobusu z depa. Vzhledem k minimalizaci hodnoty funkce (13) je nutno relační znaménko \leq v obou skupinách podmínek nahradit relačním znaménkem $=$. Kdyby ke změně relačního znaménka nedošlo, nedošlo by k započítání hodnot neproduktivních přejezdů z/do depa do účelové funkce. Komentář k omezujícím podmínkám (16) a (17) jsou stejné jako u předchozího modelu (8) – (12), skupiny omezujících podmínek (18) a (19) vymezují definiční obory nově přidaných proměnných.

Zpracování problematiky dodržování bezpečnostních přestávek

Autoři se při zohlednění požadavků na bezpečnostní přestávky řídili následujícími zásadami: Bezpečnostní přestávka je plánována nejpozději po 4 hodinách řízení vozidla a měla by trvat minimálně 30minut. Lze ji však rozdělit i na více částí, přičemž každá část ale musí trvat nejméně 10 minut. Přerušení řízení vozidla na méně než 10 minut se nezapočítává do doby přestávky ale do doby řízení vozidla [7].

Z této definice vyplývá, že bezpečnostní přestávky mohou nabývat mnoha časových variací. Z hlediska množství přestávek se bude jednat alespoň o jednu přestávku v délce trvání alespoň 30minut, několika kratších přestávek o délce 10 minut – tedy minimálně třech. Této variabilitě je nutné přizpůsobit i podmínky, jejichž cílem je právě dodržování bezpečnostních přestávek. Pokud by byly podmínky nastaveny pouze tak, že po 4h jízdy následuje vždy 30 minut trvající bezpečnostní přestávka, jednalo by se pouze o jedno z možných řešení oběhu vozidel beroucí ohled na bezpečnostní přestávky, nikoli však o optimální řešení, protože to může obsahovat rozdělení doby přestávek na více dílčích zákonem umožněných obdobích.

Autoři formulovali základní myšlenku jejich přístupu následovně: „Pokud v rámci navrženého turnusu není dosaženo bezpečnostní přestávky, minimálně jeden spoj z množiny spojů v rámci tohoto turnusu nebude zvoleným vozidlem obslužen“. V takovém případě je třeba minimálně jeden spoj z vytvořeného turnusu vyjmout, čehož bude dosaženo vyjmutím jednoho neproduktivního přejezdu z již vytvořeného turnusu. Vynětí spoje z již vytvořeného turnusu se realizuje doplňkovou omezující podmínkou. Postup vyjímání se neproduktivních přejezdů se opakuje až do stavu, kdy každý turnus odpovídá požadavkům na bezpečnostní přestávky nebo se zjistí, že neexistuje přípustné řešení úlohy. Uvažujme pro názornost jednoduchý turnus složený ze čtyř spojů s obecným označením $p \rightarrow r \rightarrow s \rightarrow t$, ve kterém není dodržen požadavek bezpečnostní přestávky. V rámci tohoto turnusu tedy platí, že $x_{pr} = 1$, $x_{rs} = 1$ a $x_{st} = 1$. Turnus tedy obsahuje tři neproduktivní přejezdy. V souladu s předchozí teoretickou úvahou potřebujeme snížit počet spojů v turnuse cestou snížení počtu neproduktivních přejezdů. V rámci existujícího turnusu se vyskytly tři neproduktivní přejezdy, je tedy třeba docílit toho, aby se v něm uskutečnily maximálně 2 neproduktivní přejezdy. Toho dosáhneme podmínkou ve tvaru:

$$x_{pr} + x_{rs} + x_{st} \leq 2$$

Omezující podmínky tohoto typu je třeba přidat pro všechny turnusy, v nichž nejsou dodržena pravidla pro plánování bezpečnostních přestávek.

Po výpočtu modelu s jednou nebo více podmínkami tohoto typu se může stát, že opět dojde k porušení ustanovení o bezpečnosti přestávek, ale už propojením jiných spojů [7] (vzniknou nové turnusy). Pokud se tak stane, přidáme do modelu další podmínky a model znovu vyřešíme. Postup opakujeme do té doby, dokud nebudou mít všechny turnusy bezpečnostní přestávku správně rozplánovány [7]. Vzhledem ke zmenšování množiny přípustných řešení se též může stát, že model nebude mít přípustné řešení. To by znamenalo, že třeba zvýšit počet turnusů, neboť není možné vytvořit turnusový plán s minimálním počtem autobusů a zároveň dodržet ustanovení o bezpečnostních přestávkách [7].

8.2 Jednofázový exaktní přístup založený na lineárním programování

Jako druhý v pořadí bude popsán model pracovně označený jako jednofázový exaktní přístup založený na lineárním programování. Z původního modelu bude převzata množina spojů S a bude doplněno jedno stanoviště, tzv. výchozí depo s indexem 0. Účelovou funkcí bude, stejně jako v předchozím případě, celkový počet použitých vozidel a cílem optimalizace bude jeho minimalizace. Vstupními údaji do modelu (konstantami) tedy budou:

t_i ...čas odjezdu spoje $i \in S$ vyjádřený ve zvolených časových jednotkách vztažmo ke zvolenému vztažnému časovému okamžiku, např. když bude čas odjezdu v 6.30, zvolený vztažný časový okamžik 0.00 a délka zvolené časové jednotky bude 1 minuty, potom $t_i = 390$),

T_i ...doba spoje $i \in S$ dle jízdního řádu vyjádřená ve stejných časových jednotkách jako t_i (doba naplánovaná k přejezdu vozidla z výchozí zastávky/stanice do cílové zastávky/stanice),

τ_{ij} ...doba přejezdu cestujícími neobsazeného vozidla z cílové zastávky/stanice spoje $i \in S$ do výchozí zastávky/stanice spoje $j \in S$.

Za účelem modelování rozhodnutí bude stejně jako v předchozím sekvenčním modelu zavedena bivalentní rozhodovací proměnná x_{ij} . Proměnná x_{ij} opět bude modelovat rozhodnutí, zda spoj $j \in S$ bude ($x_{ij} = 1$) nebo nebude ($x_{ij} = 0$) obsluhován bezprostředně za spojem $i \in S$ stejným vozidlem. Matematický model má tvar:

$$\sum_{j \in S} x_{0j} \rightarrow \min \quad (20)$$

za podmínek

$$\sum_{i \in S \cup \{0\}} x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j \in S \quad (21)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} \leq 1 \quad \text{pro } i \in S \quad (22)$$

$$t_i + T_i + \tau_{ij} \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \text{pro } i \in S; j \in S \quad (23)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in S; j \in S \quad (24)$$

Výraz (20) reprezentuje účelovou funkci – počet vozidel nasazených k obsluze všech spojů s požadavkem na minimalizaci její hodnoty. Skupina omezujících podmínek (21) zajistí, že k obsluze každého spoje přijede právě jedno vozidlo. Skupina omezujících podmínek (22) zajistí, že po obsluze každého spoje odjede vozidlo právě jedním směrem. Skupina podmínek (23) zajistí, že když vozidlo po obsluze spoje $i \in S$ nestihne přejezd k obsluze spoje $j \in S$, potom $x_{ij} = 0$ (k přejezdu vozidla po obsluze spoje $i \in S$ k obsluze spoje $j \in S$ nedojde). Skupina omezujících podmínek (24) vymezuje definiční obory proměnných použitých v modelu). Pokud bychom chtěli minimalizovat i celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost mezi spoji (vyjádřeno např. celkovou dobou neproduktivních přejezdů), postupovalo by se analogicky jako u předchozího modelu autorů Majera a Palúcha.

Za účelem dosažení zohlednění bezpečnostních přestávek budou do modelu (20) – (24) následně v případě potřeby doplňovány dodatečné podmínky, které ve svém přístupu navrhuji autoři Majer a Palúch. Proto bude prostřednictvím modelu (20) – (24) zároveň testována náročnost přístupu navrženého autory Majerem a Palúchem.

8.2.1 Vstupní data pro výpočetní experiment

Model popsáný na začátku podkapitoly 8.3 byl podroben výpočetnímu experimentu. K experimentu byla vybrána linka č. 134 provozovaná Dopravním podnikem hlavního města Prahy, ze které byly čerpány údaje o četnosti spojů, jízdních dob a časů odjezdů. Tato linka byla vybrána z toho důvodu, že i když délka trasy linky činí 8 km a jízdní doba je zhruba 30 minut, konečné zastávky linky jsou od sebe vzdáleny pouze cca 2 km, časově přibližně 5 minut, tzn., že neproduktivní přejezdy vozidel mezi konečnými zastávkami se v některých situacích mohou jevit jako výhodné [8].

8.2.2 Popis řešené linky

Orientační přehled hodnot linkových intervalů provozu v rámci dnů a denních dob je zobrazen v tabulce č. 5

Tabulka 5 – Intervaly linky č. 134

Pracovní den				Sobota			Neděle		
RŠ	Se	OŠ	Ve	Dop	Odp	Ve	Dop	Odp	Ve
6	15	7/8	15 – 20	15	15	15 – 20	20	15	15 – 20

Testování bylo provedeno v optimalizačním software Xpress-IVE. Text programu je na obrázku 4. Data k maticím tau a B jsou pak zobrazeny v příloze.

```

!@encoding CP1250
model ModelName
uses "mumxprs": !gain access to the Xpress-Optimizer solver

declarations
x:array(0..41,1..41)of mpvar
t:array(1..41)of real
T:array(1..41)of real
B:array(1..41,1..7)of real
tau:array(1..41,1..41)of real
d:array(1..41,1..41)of real
end-declarations

t::[01,09,16,22,28,35,41,48,55,61,67,74,80,86,92,98,104,110,116,122,
    128,135,143,150,158,166,176,186,196,206,216,228,243,258,273,288,
    303,318,333,348,363]
T::[31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,
    31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31]
M:=1000

tau::[]

B::[]

((tau(6,12)+T(12))*x(6,12)+(tau(12,18)+T(18))*x(12,18)+(tau(18,24)+T(24))*x(18,24)+(tau(24,28)+T(28))*x(24,28))<=120

forall(j in 1..41)sum(i in 0..41)x(i,j)=1
forall(i in 1..41)sum(j in 1..41)x(i,j)<=1

forall(i in 1..41,j in 1..41)t(i)+T(i)+tau(i,j)<=t(j)+M*(1-x(i,j))

forall(i in 1..41,j in 1..41)x(i,j)is_binary

uf:=sum(j in 1..41)x(0,j)
minimize(uf)

writeln("huf je: ",getobjval)
forall(i in 0..41,j in 1..41|getsol(x(i,j))=1)writeln("x(",i,",",j,")=",getsol(x(i,j)))
end-model

```

Obrázek 4 – Zapsaný kód jednofázového exaktního přístupu

Výstupem zapsaného kódu uvedeného na obrázku 4 jsou pak hodnoty uvedené na obrázku 5. Znázorněné oběhy vozidel jsou pak uvedeny v tabulce 6.

```

huf je: 6
x(0,1)=1
x(0,2)=1
x(0,3)=1
x(0,4)=1
x(0,5)=1
x(0,6)=1
x(1,7)=1
x(2,8)=1
x(3,9)=1
x(4,10)=1
x(5,11)=1
x(6,12)=1
x(7,13)=1
x(8,14)=1
x(9,15)=1
x(10,16)=1
x(11,17)=1
x(12,18)=1
x(13,19)=1
x(14,20)=1
x(15,21)=1
x(16,22)=1
x(17,23)=1
x(18,24)=1
x(20,25)=1
x(21,26)=1
x(22,27)=1
x(23,28)=1
x(25,29)=1
x(26,30)=1
x(27,31)=1
x(28,32)=1
x(30,33)=1
x(31,34)=1
x(32,35)=1
x(33,36)=1
x(34,37)=1
x(35,38)=1
x(36,39)=1
x(37,40)=1
x(38,41)=1

```

Tabulka 6 – Znárodněné oběhy vozidel jednofázového exaktního přístupu

Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4	Vozidlo 5	Vozidlo 6
x(0,1)	x(0,2)	x(0,3)	x(0,4)	x(0,5)	x(0,6)
x(1,7)	x(2,8)	x(3,9)	x(4,10)	x(5,11)	x(6,12)
x(7,13)	x(8,14)	x(9,15)	x(10,16)	x(11,17)	x(12,18)
x(13,19)	x(14,20)	x(15,21)	x(16,22)	x(17,23)	x(18,24)
	x(20,25)	x(21,26)	x(22,27)	x(23,28)	
	x(25,29)	x(26,30)	x(27,31)	x(28,32)	
		x(30,33)	x(31,34)	x(32,35)	
		x(33,36)	x(34,37)	x(35,38)	
		x(36,39)	x(37,40)	x(38,41)	

Obrázek 5 – Výstup z programu Xpress jednofázového exaktního přístupu

Výsledné oběhy vozidel však nyní nedodrží bezpečnostní přestávky, proto bylo nutné zavést omezující podmínky. Zapsaný kód po zavedení těchto podmínek je zobrazen na obrázku 6. Hodnoty matic τ a B jsou součástí přílohy 1.

```

!@encoding CPl250
model ModelName
uses "mimxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver

declarations
x:array(0..41,1..41)of mpvar
t:array(1..41)of real
T:array(1..41)of real
B:array(1..41,1..7)of real
tau:array(1..41,1..41)of real
d:array(1..41,1..41)of real
end-declarations

t::[01,09,16,22,28,35,41,48,55,61,67,74,80,86,92,98,104,110,116,122,
128,135,143,150,158,166,176,186,196,206,216,228,243,258,273,288,
303,318,333,348,363]
T::[31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,
31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31,31]
M:=1000

tau::[]

B::[]

((tau(6,12)+T(12))*x(6,12)+(tau(12,18)+T(18))*x(12,18)+(tau(18,24)+T(24))*x(18,24)+(tau(24,28)+T(28))*x(24,28))<=120

forall(j in 1..41)sum(i in 0..41)x(i,j)=1
forall(i in 1..41)sum(j in 1..41)x(i,j)<=1

forall(i in 1..41,j in 1..41)t(i)+T(i)+tau(i,j)<=t(j)+M*(1-x(i,j))

x(0,1)+x(1,7)+x(7,13)+x(13,19)<=3
x(0,1)+x(1,8)+x(8,14)+x(14,20)<=3
x(0,1)+x(1,7)+x(7,13)+x(13,20)<=3
x(0,1)+x(1,8)+x(8,14)+x(14,21)<=3
x(1,13)+x(13,21)+x(21,26)+x(26,31)<=3

x(0,2)+x(2,8)+x(8,14)+x(14,20)<=3
x(0,2)+x(2,9)+x(9,15)+x(15,21)<=3
x(0,2)+x(2,8)+x(8,14)+x(14,21)<=3
x(2,10)+x(10,16)+x(16,22)+x(22,27)<=3
x(0,2)+x(2,8)+x(8,15)+x(15,21)<=3

x(0,3)+x(3,9)+x(9,15)+x(15,21)<=3
x(0,3)+x(3,10)+x(10,16)+x(16,22)<=3
x(0,3)+x(3,9)+x(9,15)+x(15,22)<=3
x(0,3)+x(3,9)+x(9,15)+x(15,23)<=3
x(0,3)+x(3,10)+x(10,17)<=2
x(0,3)+x(3,9)+x(9,16)+x(16,22)<=3

x(0,4)+x(4,10)+x(10,16)+x(16,22)<=3
x(0,4)+x(4,11)+x(11,17)+x(17,23)<=3
x(0,4)+x(4,10)+x(10,16)+x(16,23)<=3
x(0,4)+x(4,11)+x(11,17)+x(17,27)<=3
x(0,4)+x(4,10)+x(10,17)+x(17,23)<=3
x(23,29)+x(29,33)+x(33,36)+x(36,39)<=3

x(0,5)+x(5,11)+x(11,17)+x(17,23)<=3
x(0,5)+x(5,12)+x(12,18)+x(18,24)<=3
x(0,5)+x(5,11)+x(11,17)+x(17,24)<=3
x(5,13)+x(13,20)+x(20,25)+x(25,29)<=3
x(0,5)+x(5,11)+x(11,18)+x(18,24)<=3

x(0,6)+x(6,12)+x(12,18)+x(18,24)<=3
x(19,27)+x(27,31)+x(31,34)+x(34,37)<=3
x(0,6)+x(6,12)+x(12,19)+x(19,25)<=3

x(0,7)+x(7,14)+x(14,22)<=2

forall(i in 1..41,j in 1..41)x(i,j)is_binary

uf:=sum(j in 1..41)x(0,j)
minimize(uf)

writeln("huf je: ",getobjval)
forall(i in 0..41,j in 1..41|getsol(x(i,j))=1)writeln("x(",i,",",j,")=",getsol(x(i,j)))
end-model
|
if PROJECTDIR <> '' then
setparam('workdir', PROJECTDIR)
writeln("Project directory: " + PROJECTDIR)
end-if

writeln("Begin running model")
!...
writeln("End running model")

end-model

```

Obrázek 6 – Zapsaný kód jednofázového exaktního přístupu *po doplnění omezujících podmínek*

huf je: 7
 $x(0,1)=1$
 $x(0,2)=1$
 $x(0,3)=1$
 $x(0,4)=1$
 $x(0,5)=1$
 $x(0,6)=1$
 $x(0,7)=1$
 $x(1,8)=1$
 $x(2,12)=1$
 $x(3,9)=1$
 $x(4,10)=1$
 $x(5,11)=1$
 $x(6,13)=1$
 $x(7,14)=1$
 $x(8,15)=1$
 $x(9,16)=1$
 $x(10,20)=1$
 $x(11,17)=1$
 $x(12,18)=1$
 $x(13,19)=1$
 $x(14,21)=1$
 $x(15,22)=1$
 $x(16,23)=1$
 $x(17,25)=1$
 $x(18,24)=1$
 $x(20,26)=1$
 $x(21,27)=1$
 $x(22,29)=1$
 $x(24,28)=1$
 $x(25,31)=1$
 $x(26,30)=1$
 $x(28,32)=1$
 $x(29,34)=1$
 $x(30,33)=1$
 $x(31,36)=1$
 $x(32,35)=1$
 $x(33,37)=1$
 $x(34,39)=1$
 $x(35,38)=1$
 $x(37,40)=1$
 $x(38,41)=1$

Tabulka 7 – Znárodně oběhy vozidel jednofázového exaktního přístupu po doplnění omezujících podmínek

Vozidlo 1	Vozidlo 2	Vozidlo 3	Vozidlo 4	Vozidlo 5	Vozidlo 6	Vozidlo 7
$x(0,1)$	$x(0,2)$	$x(0,3)$	$x(0,4)$	$x(0,5)$	$x(0,6)$	$x(0,7)$
$x(1,8)$	$x(2,12)$	$x(3,9)$	$x(4,10)$	$x(5,11)$	$x(6,13)$	$x(7,14)$
$x(8,15)$	$x(12,18)$	$x(9,16)$	$x(10,20)$	$x(11,17)$	$x(13,19)$	$x(14,21)$
$x(9,16)=1$	$x(18,24)$	$x(16,23)$	$x(20,26)$	$x(17,25)$		$x(21,27)$
$x(10,20)=1$	$x(24,28)$		$x(26,30)$	$x(25,31)$		
$x(11,17)=1$	$x(28,32)$		$x(30,33)$	$x(31,36)$		
$x(12,18)=1$	$x(32,35)$		$x(33,37)$			
$x(13,19)=1$	$x(35,38)$		$x(37,40)$			
$x(14,21)=1$	$x(38,41)$					
$x(15,22)=1$						
$x(16,23)=1$						
$x(17,25)=1$						
$x(18,24)=1$						
$x(20,26)=1$						
$x(21,27)=1$						
$x(22,29)=1$						
$x(24,28)=1$						
$x(25,31)=1$						
$x(26,30)=1$						
$x(28,32)=1$						
$x(29,34)=1$						
$x(30,33)=1$						
$x(31,36)=1$						
$x(32,35)=1$						
$x(33,37)=1$						
$x(34,39)=1$						
$x(35,38)=1$						
$x(37,40)=1$						
$x(38,41)=1$						

Obrázek 7 - Výstup z programu Xpress jednofázového exaktního přístupu po doplnění omezujících podmínek

Ačkoli po doplnění podmínek došlo k rozšíření nutného počtu vozidel na 7, není počet omezujících podmínek k dosažení plnění bezpečnostních přestávek pro všechna vozidla.

8.2.3 Slabé stránky navrženého způsobu omezujících podmínek

Jak vyplývá z experimentů realizovaných s modelem v rámci navržené linky, pro dosažení optimálního řešení zohledňujícího dodržení bezpečnostních přestávek, je model nutno řešit sekvenčně (opakovaně), přičemž:

- a) po ukončení každého optimalizačního výpočtu je provést kontrolu dodržení bezpečnostní přestávky,
- b) v případě, že existují turnusy, ve kterých bezpečnostní přestávka není dodržena, je nutno model doplnit o podmínky, které budou snižovat počty přejezdů v rámci těch turnusů, u nichž není bezpečnostní přestávka dodržena,
- c) zopakovat optimalizační výpočet s modelem z předchozí sekvence doplněným o nové podmínky odstraňující nepřípustnost turnusů spočívající v nedodržení bezpečnostní přestávky.

Reálně a zcela logicky, optimalizační software postupuje tak, že spoj, který odstraní z turnusu původního vozidla, přiřadí k jinému vozidlu. Vzhledem k optimalizačnímu kritériu program v takovém případě vyhoví podmínkám i tak, že přeskládá spoje v rámci turnusu takovým způsobem, který ještě nebyl omezen. Tím vzniká zásadní problém v řešení spočívající rozsáhlosti omezujících podmínek zmíněných v předchozí podkapitole 8.3.2.

V navrženém přístupu je sice garantováno nalezení optimálního řešení, není ovšem dopředu jasné, jak časově náročný bude optimalizační výpočet (kolik sekvencí bude zapotřebí provést). Při vzrůstu počtu spojů je postup spočívající v ručním prověřování přípustnosti turnusů z pohledu zachování bezpečnostních přestávek obtížně realizovatelný. Vzhledem k tomu takový postup je z hlediska řešení takřka nepoužitelný, není tato metoda vhodná pro tvorbu oběhu vozidel s přihlédnutím k dodržování bezpečnostních přestávek při velkém počtu spojů a malých časových rozdílů mezi jednotlivými spoji.

Protože aplikace přístupu autorů Majera a Palúcha s ručním ověřováním přípustnosti je v běžných provozních podmínkách prakticky nemožná, bylo od dalšího zkoumání vhodnosti jejich přístupu upuštěno. Další úvahy byly vedeny směrem k využití úlohy označované v odborné literatuře anglickým ekvivalentem Capacitated Vehicle Routing with Time Windows. Uvedený typ úlohy totiž obsahuje omezující podmínky zajišťující dodržení kapacity nasazovaných vozidel, které mohou být lehce převedeny do časových tvarů.

8.3 Model úlohy VRP s kapacitním omezením vozidel a časovými okny jako nástroj pro plánování oběhů vozidel

Úloha se primárně používá pro řešení svozu nebo rozvozu zásilek, příp. jiné obsluhy vrcholů dopravní sítě. Vrcholy reprezentují místa vyžadující obsluhu a depo, v němž může docházet k odstávkám a údržbě vozidel. Každý z obsluhovaných vrcholů má přiděleno ohodnocení reprezentující jeho požadavek. Hrany spojující vrcholy reprezentují minimální cesty a jejich ohodnocení doby nebo délky přejezdů mezi vrcholy grafu. Pro každý vrchol (zpravidla kromě depa) je dále definováno časové okno, ve kterém má být realizována jeho obsluha. Úkolem je naplánovat takové jízdy ze střediska k vrcholům (takové přejezdy mezi vrcholy), aby každý vrchol byl obslužen právě jednou ve svém časovém okně jízdou začínající a končící ve středisku, a zároveň je požadováno, aby celková doba nebo délka neproduktivních přejezdů (účelová funkce) nabyla minimální hodnoty.

Vrcholy sítě (kromě depa) však nemusí být interpretovány pouze jako místa, která mají být navštívena. Mohou (kromě depa) představovat formálně také spoje, které je nutno v průběhu plánovacího období obsloužit. Hrany potom mohou reprezentovat časově neproduktivní přejezdy mezi spoji a jejich ohodnocení doby nebo délky neproduktivních přejezdů. Ohodnocení vrcholů reprezentují doby spojů. V případě, že nejdříve možné časy obsluh všech vrcholů jsou shodné s nejpozději přípustnými časy obsluh těchto vrcholů a místo požadavku vrcholu přidělíme vrcholům ohodnocení reprezentující doby spojů, dostáváme tvar úlohy VRPTW vhodný pro optimalizaci oběhů vozidel. V takto formulované úloze vytvořená okružní jízda reprezentuje potom turnus vozidla.

8.3.1 Základní model úlohy VRPTW upravený pro plánování oběhů vozidel

V dopravní síti je definováno depo a množina spojů N . Necht $N \cup \{0\} = N_0$. Dále je definována množina vozidel V , jejichž počet je dostatečný z hlediska nutnosti obsloužit spoje množiny N [16]. Pro každé vozidlo $k \in V$ je známa jeho maximální doba jízdy $TMAX$ (předpokládá se, že maximální doba jízdy je stejná pro všechny vozidla). Pro každý obsluhovaný spoj $i \in N$ je formálně definován interval $\langle Tmin_i; Tmax_i \rangle$, kde $Tmin_i = Tmax_i$ reprezentující začátek obsluhy spoje a definována doba spoje T_i [16].

V souvislosti se zadáním v předchozím odstavci práce je zaveden předpoklad, že doba neproduktivního přejezdu není závislá na kapacitě vozidla – tedy jakkoli kapacitní vozidlo vyžaduje k neproduktivnímu přejezdu mezi spoji stále stejnou dobu. Předpokládá se, že pro potřeby MHD by reálné rozdíly za provozu byly minimální. Problémy by však mohly nastat u dopravy železniční. Zde totiž kapacita vozidla vyjádřená jeho parametry (délka nebo hmotnost vlaku) a nasazený typ hnacího vozidla rozhoduje o rychlosti neproduktivního přesunu na trase vlaku.

Rekapitulace označení množina a konstant:

N_0 ... množina obsluhovaných spojů (spoj 0 reprezentuje středisko),

N ... množina obsluhovaných spojů bez střediska,

V ... množina obslužných vozidel,

t_{ij} ... hodnota doby neproduktivního přejezdu vozidla po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$ po trase odpovídající neproduktivní ujeté vzdálenosti (nezávislá na kapacitě vozidla $k \in V$),

T_i ... doba spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $T_i = 0$),

$TMAX$... maximální doba oběhu,

$Tmin_i$... čas nejdříve možného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmin_i = 0$),

$Tmax_i$... čas nejpozději přípustného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmax_i = 0$),

Proměnné vyskytující se v modelu:

x_{ijk} ... bivalentní proměnná reprezentující vznik neproduktivního přejezdu vozidlem $k \in V$ po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$,

y_{ik} ... pomocná proměnná použitá v anticyklické podmínce modelu (zabraňuje vzniku turnusů neprocházejících střediskem),

s_{ik} ... proměnná modelující čas zahájení obsluhy spoje $i \in N$ vozidlem $k \in V$.

Matematický model úlohy je možno zapsat v následujícím tvaru:

$$\min f(x, y, s) = \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in N_0 \\ j \neq i}} \sum_{k \in V} t_{ij} x_{ijk} \quad (26)$$

za podmínek:

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \text{pro } j \in N \quad (27)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} = \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{jik} \quad \text{pro } j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (28)$$

$$y_{ik} - y_{jk} + |N| x_{ijk} \leq |N| - 1 \quad \text{pro } i \in N, j \in N \text{ a } k \in V \quad (29)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} (t_{ij} + T_j) x_{ijk} \leq TMAX \quad \text{pro } k \in V \quad (30)$$

$$s_{ik} + T_i + t_{ij} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N \text{ a } k \in V \quad (31)$$

$$s_{jk} \geq Tmin_j \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (32)$$

$$s_{jk} \leq T \max_j \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (33)$$

$$x_{00k} = 0 \quad \text{pro } k \in V \quad (34)$$

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (36)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N \text{ a } k \in V \quad (37)$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (38)$$

Funkce (26) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost při obsluze spojů. Omezující podmínky ve skupině (27) se vytvářejí pro všechny obsluhované spoje a zajistí, že každý spoj bude obslužen právě jedním vozidlem. Omezující podmínky ve skupině (28) se vytvářejí pro kombinace všech obsluhovaných vrcholů a všech obslužných vozidel a zajistí, že počet odjezdů obslužného vozidla po obsluze každého spoje bude roven počtu příjezdů vozidel k obsluze spoje (tedy, zajistí kontinuitu vozidel na příjezdu a odjezdu z obsluhovaného spoje). Skupina omezujících podmínek (29) zajistí, že nevznikne nepřipustný turnus (turnus neprocházející střediskem). Omezující podmínky ve skupině (30) zajistí, že v rámci každého turnusu bude dodržena maximální doba řízení. Omezující podmínky ve skupině (31) zajistí, že bude-li stejné vozidlo obsluhovat spoj $j \in N$ po spoji $i \in N$, potom bude také vytvořena časová přípustnost mezi začátkem obsluhy spoje $j \in N$ a začátkem obsluhy vrcholu $i \in N$. Omezující podmínky ve skupinách (32) a (33) zajišťují, že obsluhy spojů započnou ve stanovených časových okamžicích. Aby bylo možno modelovat i časové přejezdy z depa, rozšíříme množinu N o depo, přičemž položíme $z_{0k} = 0$ pro $k \in V$ a $s_0 = 0$. Omezující podmínky ve skupině (34) zajistí, že nebude docházet k tvorbě turnusů neobsahujících žádný spoj (při experimentu s modelem docházelo ke vzniku takových jízd, které však nemají vliv na hodnotu účelové funkce). Omezující podmínky ve skupinách (36), (37) a (38) vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu.

Přehledová matice vzdáleností, požadovaná doba obsluhy vrcholů a požadovaný čas obsluhy vrcholů jsou zobrazeny tabulkami 8,9 a 10

Tabulka 8 – Doby přejezdů mezi jednotlivými spoji

	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
V_0	0	1	2	3	4	2
V_1	1	0	2	2	3	1
V_2	3	2	0	1	2	3
V_3	4	1	3	0	3	4
V_4	4	4	4	3	0	2
V_5	3	2	1	4	5	0

Tabulka 9 – Doby spojů

Depo/spoj	Depo	Spoj 1	Spoj 2	Spoj 3	Spoj 4	Spoj 5
Vrchol reprezentující spoj	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Doba spoje T_i	0	5	3	1	0,5	2

Tabulka 10 – Časy odjezdů jednotlivých spojů

Spoj i	1	2	3	4	5	6
$Tmin_i$	0	10	11	18	40	45
$Tmax_i$	100	10	11	18	40	45

Funkčnost modelu bude prověřena na jednoduchém testovacím příkladu. Zapsaný kód v optimalizačním software Xpress-IVE je uveden na obrázku 8.

```

!@encoding CP1250
model vrptw
uses "mmxprs"

declarations
n=5
uzel=0..n
vozidlo=1..5

t:array(uzel,uzel)of real !doba přejezdu mezi uzly
T:array(uzel)of real !doba obsluhy uzlu
Tmax:array(uzel)of real
Tmin:array(uzel)of real
x:array(uzel,uzel,vozidlo)of mpvar !rozhodnutí o (ne)uskutečnění přejezdu
y:array(1..n,vozidlo)of mpvar !anticyklická proměnná
s:array(uzel,vozidlo)of mpvar
end-declarations|

TMAX:=15

t:=[0,1,2,3,4,2,
1,0,2,2,3,1,
3,2,0,1,2,3,
4,1,3,0,3,4,
4,4,4,3,0,2,
3,2,1,4,5,0]

T:=[0,5,3,1,0.5,2]

Tmin:=[0,10,11,18,40,45]
Tmax:=[100,10,11,18,40,45]

M:=100000

forall(j in 1..n)sum(i in uzel,k in vozidlo)x(i,j,k)=1
forall(j in 0..n,k in vozidlo)sum(i in uzel)x(i,j,k)=sum(i in uzel)x(j,i,k)
forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)y(i,k)-y(j,k)+n*x(i,j,k)<=n-1

forall(k in vozidlo)sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)<=TMAX

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)s(i,k)+T(i)<=s(j,k)+M*(1-x(i,j,k))

forall(j in uzel,k in vozidlo)s(j,k)<=Tmax(j)*sum(i in uzel)x(i,j,k)
forall(j in uzel,k in vozidlo)Tmin(j)*sum(i in uzel)x(i,j,k)<=s(j,k)

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)x(i,j,k)is_binary

uf:=sum(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo)t(i,j)*x(i,j,k)
minimize(uf)

writeln("huf je ",getobjval)
forall(i in uzel,j in uzel,k in
vozidlo|getsol(x(i,j,k))=1)writeln("x(",i,",",j,",",k,")=",getsol(x(i,j,k)))
forall(k in vozidlo)writeln("Delka jizdy vozidla ",k," je ",getsol(sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)))
!forall(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo|getsol(x(i,j,k))>0)writeln("s(",i,",",k,")=",getsol(s(i,k)))
forall(i in uzel,k in vozidlo|getsol(s(i,k))>0)writeln("s(",i,",",k,")=",getsol(s(i,k)))

end-model

```

Obrázek 8 – Zapsaný kód pro model VRP s časovými okny

```

huf je 15
x(0,1,1)=1
x(0,2,2)=1
x(1,5,1)=1
x(2,3,2)=1
x(3,4,2)=1
x(4,0,2)=1
x(5,0,1)=1
Delka jizdy vozidla 1 je 12
Delka jizdy vozidla 2 je 14.5
Delka jizdy vozidla 3 je 0
Delka jizdy vozidla 4 je 0
Delka jizdy vozidla 5 je 0
s(1,1)=10
s(2,2)=11
s(3,2)=18
s(4,2)=40
s(5,1)=45

```

Obrázek 9 – Výstupní údaje modelu VRP s časovými okny

8.3.2 Rozšíření základního modelu úlohy VRPTW o možnost prodloužení oběhu při čerpání nedělené bezpečnostní přestávky

Základním modelem pro vytvoření optimalizovaných oběhů vozidel s dodržением bezpečnostních přestávek řidičů je model, jenž dodržuje pevně danou minimální dobu přestávky. Model funguje tak, že po naplnění určité doby provozu vozidla je nutné naplánovat bezpečnostní přestávku. Aby získané řešení bylo možné prohlásit za optimální, je nutné tuto bezpečnostní přestávku definovat v minimální možné délce, která je pro daný druh dopravy možná. Model s nedělenou přestávkou je vhodný pro případy, že např. má být bezpečnostní přestávka využita jako přestávka na oběd. V případě rozdělení bezpečnostní přestávky na více částí (jež se rozlišují podle druhu dopravy a platných zákonů na ně vztažených, popsaných v kapitole 3 této práce), by dílčí část v mnoha případech nebyla reálně dostatečně dlouhá tak, aby v její délce vytvořila řidiči dostatečnou dobu na oběd.

Případně-li bezpečnostní přestávka na dobu přestávky v práci na jídlo a oddech, započítá se přestávka v práci na jídlo a oddech do pracovní doby [1].

V dopravní síti je definováno depo a množina spojů N . Nechť $N \cup \{0\} = N_0$. Dále je definována množina vozidel V , jejichž počet je dostatečný z hlediska nutnosti obsloužit spoje množiny N [16]. Pro každé vozidlo $k \in V$ je známa jeho maximální doba jízdy $TMAX$ (předpokládá se, že maximální doba jízdy je stejná pro všechny vozidla). Pro každý obsluhovaný spoj $i \in N$ je opět formálně definován interval $\langle Tmin_i; Tmax_i \rangle$, kde $Tmin_i = Tmax_i$ reprezentující začátek obsluhy spoje a definována doba spoje T_i [16].

Dále je definována množina přestávek P , přičemž každá z nich má délku o velikosti p . Čerpání přestávky o velikosti p umožní prodloužit dobu oběhu o další hodnotu $TMAX$.

Označení množin a konstant je shodné s označením v kapitole 8.4.1.

N_0 ... množina obsluhovaných spojů (spoj 0 reprezentuje středisko),

N ... množina obsluhovaných spojů bez střediska,

V ... množina obslužných vozidel,

P ... množina přestávek,

t_{ij} ... hodnota doby neproduktivního přejezdu vozidla po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$ po trase odpovídající neproduktivní ujeté vzdálenosti (nezávislá na kapacitě vozidla $k \in V$),

$TMAX$... maximální doba oběhu,

T_i ... doba spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $T_i = 0$),

$Tmin_i$... čas nejdříve možného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmin_i = 0$),

$Tmax_i$... čas nejpozději přípustného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmax_i = 0$),

p ... doba definované přestávky

Proměnné vyskytující se v modelu:

x_{ijk} ... bivalentní proměnná reprezentující vznik neproduktivního přejezdu vozidlem $k \in V$ po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$,

y_{ik} ... pomocná proměnná použitá v anticyklícké podmínce modelu (zabraňuje vzniku turnusů neprocházejících střediskem),

s_{ik} ... proměnná modelující čas zahájení obsluhy spoje $i \in N$ vozidlem $k \in V$,

w_{ik} ... proměnná modelující vznik bezpečnostní přestávky $i \in P$ v případě vozidla $k \in V$.

Matematický model úlohy je možno zapsat v následujícím tvaru:

$$\min f(x, y, s, w) = \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in N_0 \\ j \neq i}} \sum_{k \in V} t_{ij} x_{ijk} + 1000 * \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in V} x_{0jk} + 0.001 * \sum_{i \in P} \sum_{k \in V} w_{ik} \quad (39)$$

za podmínek:

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \text{pro } j \in N \quad (40)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} = \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{jik} \quad \text{pro } j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (41)$$

$$y_{ik} - y_{jk} + |N| x_{ijk} \leq |N| - 1 \quad \text{pro } i \in N, j \in N \text{ a } k \in V \quad (42)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} (t_{ij} + T_j) x_{ijk} + \sum_{i \in P} p w_{ik} \leq TMAX + TMAX \sum_{i \in P} w_{ik} \quad \text{pro } k \in V \quad (43)$$

$$s_{ik} + T_i + t_{ij} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N \text{ a } k \in V \quad (44)$$

$$s_{jk} \geq Tmin_j \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (45)$$

$$s_{jk} \leq Tmax_j \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (46)$$

$$x_{00k} = 0 \quad \text{pro } k \in V \quad (47)$$

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (48)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N \text{ a } k \in V \quad (49)$$

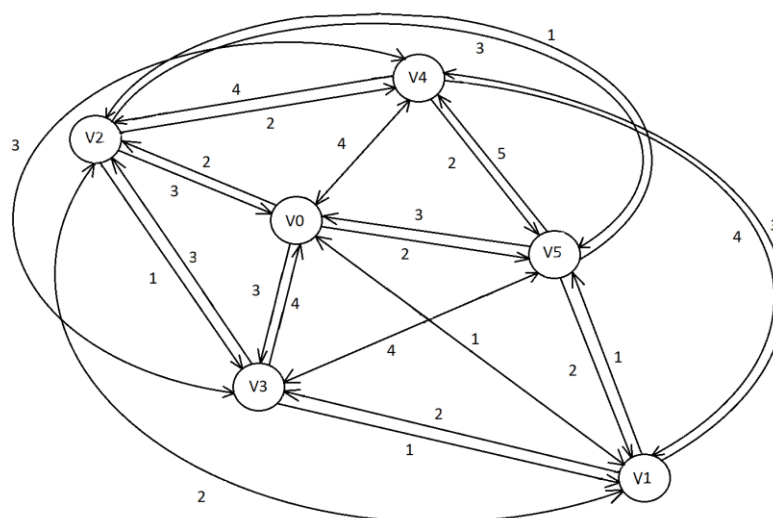
$$s_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (50)$$

$$w_{ik} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in P \text{ a } k \in V \quad (51)$$

Funkce (39) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost při obsluze spojů (první člen) a současně při minimálním počtu vozidel (druhý člen). Poslední člen

účelové funkce zajistí, aby nebyly čerpány bezpečnostní přestávky v nadbytečných případech (což se při řešení bez přidaného třetího členu stávalo, protože nic takovému jevu nebránilo). Omezující podmínky ve skupině (40) se vytvářejí pro všechny obsluhované spoje a zajistí, že každý spoj bude obslužen právě jedním vozidlem. Omezující podmínky ve skupině (41) se vytvářejí pro kombinace všech obsluhovaných vrcholů a všech obslužných vozidel a zajistí, že počet odjezdů obslužného vozidla po obsluze každého spoje bude roven počtu příjezdů vozidel k obsluze spoje (tedy, zajistí kontinuitu vozidel na příjezdu a odjezdu z obsluhovaného spoje). Skupina omezujících podmínek (42) zajistí, že nevznikne nepřípustný turnus (turnus neprocházející střediskem). Omezující podmínky ve skupině (43) zajistí, že v rámci každého turnusu bude při překročení maximální doby řízení bez požadované bezpečnostní přestávky tato bezpečnostní přestávka přičtena. Omezující podmínky ve skupině (44) zajistí, že bude-li stejné vozidlo obsluhovat spoj $j \in N$ po spoji $i \in N$, potom nebude také vytvořena časová nepřípustnost mezi začátkem obsluhy spoje $j \in N$ a začátkem obsluhy spoje $i \in N$. Omezující podmínky ve skupinách (45) a (46) zajišťují, že obsluhy spojů započnou ve stanovených časových okamžicích. Aby bylo možno modelovat i časové přejezdy z depa, rozšíříme opět množinu N o depo, přičemž opět položíme $z_{0k} = 0$ pro $k \in V$ a $s_0 = 0$. Omezující podmínky ve skupině (47) zajistí, že nebude docházet k tvorbě turnusů neobsahujících žádný spoj (při experimentu s modelem docházelo ke vzniku takových jízd, které však nemají vliv na hodnotu účelové funkce). Omezující podmínky ve skupinách (48), (49), (50) a (51) vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu. Funkčnost modelu bude prověřena opět na jednoduchém testovacím příkladu.

Na obrázku č. 10 jsou zobrazeny délky jednotlivých spojů a vrcholy, jež obsluhují, pomocí kompletního grafu.



Obrázek 10 – Časové vzdálenosti spojů vyjádřené kompletním grafem

Přehledová matice vzdáleností, požadovaná doba obsluhy vrcholů a požadovaný čas obsluhy vrcholů jsou zobrazeny tabulkami 11,12 a 13.

Tabulka 11 – Doby přejezdů mezi jednotlivými spoji

	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
V_0	0	1	2	3	4	2
V_1	1	0	2	2	3	1
V_2	3	2	0	1	2	3
V_3	4	1	3	0	3	4
V_4	4	4	4	3	0	2
V_5	3	2	1	4	5	0

Tabulka 12 – Doby spojů

Depo/spoj	Depo	Spoj 1	Spoj 2	Spoj 3	Spoj 4	Spoj 5
Vrchol reprezentující spoj	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Doba spoje T_i	0	5	3	1	0,5	2

Tabulka 13 – Časy odjezdů jednotlivých spojů

Spoj i	1	2	3	4	5	6
$Tmin_i$	0	10	11	18	40	45
$Tmax_i$	100	10	11	18	40	45

Kód v optimalizačním software Xpress-IVE je uveden na obrázku 11.

```

model vrptw_vice_prestavek
uses "mmaxprs"

declarations
n=5
uzel=0..n
vozidlo=1..3
prestavka=1..5

t:array(uzel,uzel)of real
T:array(uzel)of real
Tmax:array(uzel)of real
Tmin:array(uzel)of real
x:array(uzel,uzel,vozidlo)of mpvar
y:array(1..n,vozidlo)of mpvar
s:array(uzel,vozidlo)of mpvar
w:array(prestavka,vozidlo)of mpvar
end-declarations

TMAX:=9

t:=[0,1,2,3,4,2,
    1,0,2,2,3,1,
    3,2,0,1,2,3,
    4,1,3,0,3,4,
    4,4,4,3,0,2,
    3,2,1,4,5,0]

T:=[0,5,3,1,0.5,2]

Tmin:=[0,10,11,18,40,45]
Tmax:=[100,10,11,18,40,45]

M:=100000
p:=5

forall(j in 1..n)sum(i in uzel,k in vozidlo)x(i,j,k)=1
forall(j in 0..n,k in vozidlo)sum(i in uzel)x(i,j,k)=sum(i in uzel)x(j,i,k)
forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)y(i,k)-y(j,k)+n*x(i,j,k)<=n-1

forall(k in vozidlo)sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)+sum(i in prestavka)p*w(i,k)<=TMAX+TMAX*sum(i in prestavka)w(i,k)

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)s(i,k)+T(i)<=s(j,k)+M*(1-x(i,j,k))

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)x(i,j,k)is_binary

forall(i in prestavka,k in vozidlo)w(i,k)is_binary

uf:=sum(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo)t(i,j)*x(i,j,k)+1000*sum(j in uzel,k in vozidlo)x(0,j,k)+0.001*sum(i in prestavka,k in vozidlo)w(i,k)
minimize(uf)

writeln("uf je ",getobjval)
forall(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo|getsol(x(i,j,k))=1)writeln("x(",i,",",j,",",k,")=",getsol(x(i,j,k)))
forall(k in vozidlo)writeln("Delka jizdy vozidla ",k," je ",getsol(sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)+p*sum(i in prestavka)w(i,k)))
/forall(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo|getsol(x(i,j,k))>0)writeln("s(",i,",",k,")=",getsol(s(i,k)))
forall(i in uzel,k in vozidlo|getsol(s(i,k))>0)writeln("s(",i,",",k,")=",getsol(s(i,k)))
forall(i in prestavka,k in vozidlo|getsol(w(i,k))>0)writeln("w(",i,",",k,")=",getsol(w(i,k)))

end-model

```

Obrázek 11 – Zapsaný kód pro model s nedělenou přestávkou

Výstupní hodnoty

Po kontrole syntaktické správnosti zapsaného kódu, bylo zahájeno řešení programu a po ukončení optimalizačního výpočtu byly vypsaný výsledky, viz. obrázek 12.

```

uf je 1010
x(0,5,1)=1
x(1,0,1)=1
x(2,4,1)=1
x(3,1,1)=1
x(4,3,1)=1
x(5,2,1)=1
Delka jizdy vozidla 1 je 41.5
Delka jizdy vozidla 2 je 0
Delka jizdy vozidla 3 je 0
s(1,1)=6.5
s(2,1)=2
s(3,1)=5.5
s(4,1)=5
w(1,1)=1
w(2,1)=1
w(3,1)=1
w(5,1)=1

```

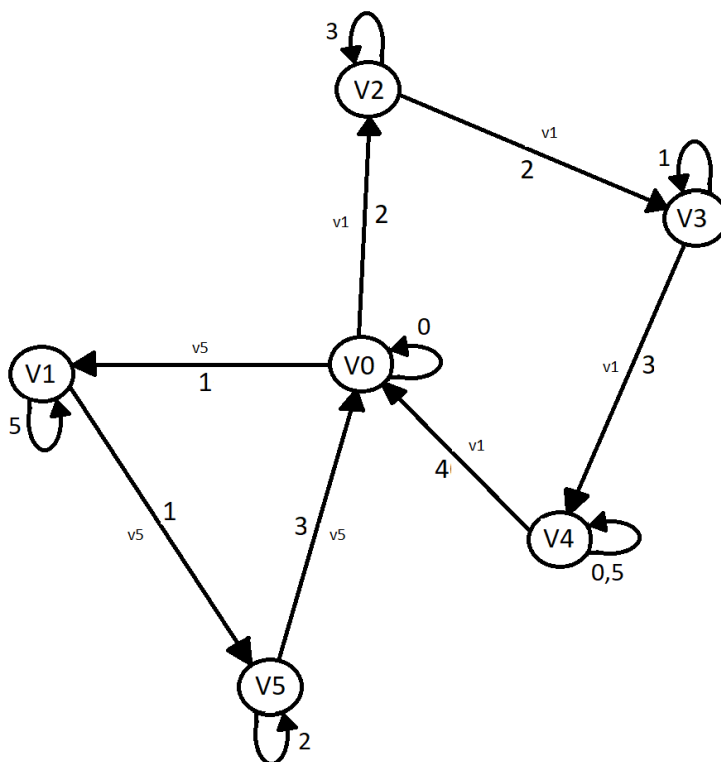
Obrázek 12 – Výstupní údaje modelu s nedělenou přestávkou

Z výsledků uvedených na obrázku 5 mj. vyplývají výsledné oběhy vozidel, kde v_x značí číslo vozidla a V_x označení obsluhovaného vrcholu. Výsledná posloupnost konkrétních oběhů vozidel je následující:

$v_5: V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_5 \rightarrow V_0$

$v_1: V_0 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_0$

Výsledné oběhy vozidel s nedělenou bezpečnostní přestávkou jsou pak znázorněny grafem na obrázku 12.



Obrázek 13 – Výsledné oběhy vozidel s nedělenou přestávkou řidičů

8.3.3 Rozšíření základního modelu úlohy VRPTW o možnost prodloužení oběhu vozidla při možnosti pánovat nedělenou i dělené bezpečnostní přestávky

Model pro oběhy vozidel s dělenými přestávkami vozidel byl vytvořen na základě možnosti dělit bezpečnostní přestávky řidičů na dílčí části o limitních minimálních parametrech. Tyto limitní parametry se liší podle druhu dopravy, jakou řidič vozidla vykonává. V modelovaném příkladu byla uvažována pravidla pro přestávku řidičů linkových autobusů. V té je možné rozdělit bezpečnostní přestávku řidiče, jejíž minimální délka trvání je 45 minut, na dvě přestávky, kdy první musí mít délku alespoň 15minut a druhá 30minut (viz část 3.2 – 3.3 o zákonných nařízeních).

V dopravní síti je definováno depo a množina spojů N . Nechť $N \cup \{0\} = N_0$. Dále je definována množina vozidel V , jejichž počet je dostatečný z hlediska nutnosti obsloužit spoje množiny N [16]. Pro každé vozidlo $k \in V$ je známa jeho maximální doba jízdy $TMAX$ (předpokládá se, že maximální doba jízdy je stejná pro všechny vozidla). Pro každý obsluhovaný spoj $i \in N$ je formálně definován interval $\langle Tmin_i; Tmax_i \rangle$, kde $Tmin_i = Tmax_i$ reprezentující začátek obsluhy spoje a definována doba spoje T_i [16].

Dále je definována množina přestávek P , přičemž první přestávka má délku p , druhá a třetí přestávka představují její dělení o délkách q_1 a q_2 , přičemž platí, že $p = q_1 + q_2$. Je tedy možno čerpat buď přestávku o délce p nebo dvě přestávky o celkové délce $q_1 + q_2$.

Označení množin a konstant je shodné s označením v kapitole 8.4.1.

N_0 ... množina obsluhovaných spojů (spoj 0 reprezentuje středisko),

N ... množina obsluhovaných spojů bez střediska,

V ... množina obslužných vozidel,

P ... množina přestávek

t_{ij} ... hodnota doby neproduktivního přejezdu vozidla po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$ po trase odpovídající neproduktivní ujeté vzdálenosti (nezávislá na kapacitě vozidla $k \in V$),

T_i ... doba spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $T_i = 0$),

$Tmin_i$... čas nejdříve možného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmin_i = 0$),

$Tmax_i$... čas nejpozději přípustného začátku obsluhy spoje $i \in N_0$ (pro $i = 0$ platí $Tmax_i = 0$),

p ... doba nedělené přestávky,

q_1 ... první část dělené přestávky,

q_2 ... druhá část dělené přestávky.

Proměnné vyskytující se v modelu:

x_{ijk} ... bivalentní proměnná reprezentující vznik neproduktivního přejezdu vozidlem $k \in V$ po obsluze spoje $i \in N_0$ k obsluze spoje $j \in N_0$,

y_{ik} ... pomocná proměnná použitá v anticyklíci podmínice modelu (zabraňuje vzniku turnusů neprocházejících střediskem),

s_{ik} ... proměnná modelující čas zahájení obsluhy spoje $i \in N$ vozidlem $k \in V$,

w_k ... proměnná modelující vznik nedělené přestávky pro vozidlo $k \in V$,

z_{ik} ... proměnná modelující vznik části $i \in P \setminus \{1\}$ dělené přestávky pro vozidlo $k \in V$.

Matematický model úlohy je možno zapsat v následujícím tvaru:

$$\min f(x, y, w, z, s, u) = \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in N_0 \\ j \neq i}} \sum_{k \in V} t_{ij} x_{ijk} + 1000 * \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in V} x_{0jk} + 0.001 * \sum_{k \in V} w_k \quad (52)$$

za podmínek:

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} \sum_{k \in V} x_{ijk} = 1 \quad \text{pro } j \in N \quad (53)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{ijk} = \sum_{\substack{i \in N_0 \\ i \neq j}} x_{jik} \quad \text{pro } j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (54)$$

$$y_{ik} - y_{jk} + |N| x_{ijk} \leq |N| - 1 \quad \text{pro } i \in N, j \in N \text{ a } k \in V \quad (55)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} (t_{ij} + T_j) x_{ijk} + p w_k + \sum_{i \in \{1,2\}} q_i z_{i,k} \leq TMAX + TMAX \left[w_k + \frac{1}{2} \left(\sum_{i \in \{1,2\}} z_{ik} \right) \right] \quad (56)$$

pro $k \in V$

$$s_{ik} + T_i + t_{ij} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N \text{ a } k \in V \quad (57)$$

$$2w_k + \sum_{i \in \{1,2\}} z_{ik} = 2u \quad \text{pro } k \in V \quad (58)$$

$$u \leq w_k + \sum_{i \in \{1,2\}} z_{ik} \quad \text{pro } k \in V \quad (59)$$

$$s_{jk} \geq T \min_j \sum_{i \in N_0, i \neq j} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (60)$$

$$s_{jk} \leq T \max_j \sum_{i \in N_0, i \neq j} x_{ijk} \quad \text{pro } j \in N \text{ a } k \in V \quad (61)$$

$$x_{00k} = 0 \quad \text{pro } k \in V \quad (62)$$

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i \in N_0, j \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (63)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N \text{ a } k \in V \quad (64)$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \text{pro } i \in N_0 \text{ a } k \in V \quad (65)$$

$$w_k \in \{0; 1\} \quad \text{pro } k \in V \quad (66)$$

$$z_{ik} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } k \in V \quad (67)$$

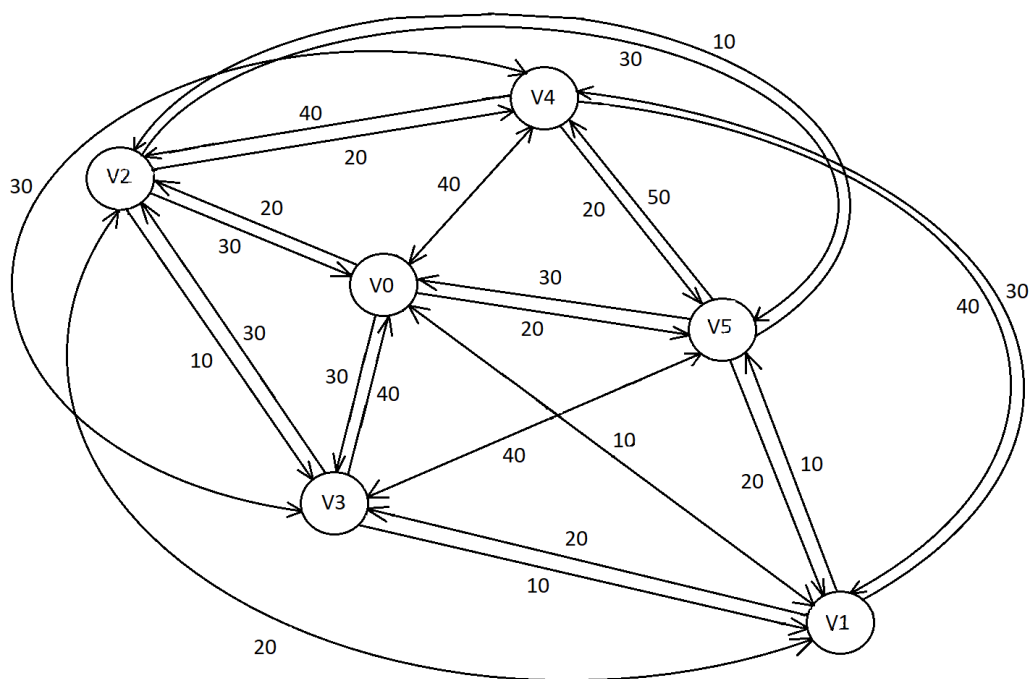
$$u \in \{0; 1\} \tag{68}$$

Funkce (52) reprezentuje optimalizační kritérium – celkovou neproduktivně ujetou vzdálenost při obsluze spojů (první člen) a současně počet použitých vozidel (druhý člen). Omezující podmínky ve skupině (53) se vytvářejí pro všechny obsluhované spoje a zajistí, že každý spoj bude obslužen právě jedním vozidlem. Omezující podmínky ve skupině (54) se vytvářejí pro kombinace všech obsluhovaných vrcholů a všech obslužných vozidel a zajistí, že počet odjezdů obslužného vozidla po obsluze každého spoje bude roven počtu příjezdů vozidel k obsluze spoje (tedy, zajistí kontinuitu vozidel na příjezdu a odjezdu z obsluhovaného spoje). Skupina omezujících podmínek (55) zajistí, že nevznikne nepřipustný turnus (turnus neprocházející střediskem). Omezující podmínky ve skupině (56) zajistí, že v rámci každého turnusu bude dodržena maximální doba řízení a v případě, že dodržena nebude tak bude připočítána doba bezpečnostní přestávky k celkové době oběhu vozidla. Tato doba bude bud započítána bud formou celé, nedělené přestávky nebo součtem dílčích dob v případě, že přestávka bude rozdělena na dvě části. Omezující podmínky ve skupině (57) zajistí, že bude-li stejné vozidlo obsluhovat spoj $j \in N$ po spoji $i \in N$, potom bude také vytvořena časová přípustnost mezi začátkem obsluhy spoje $j \in N$ a začátkem obsluhy vrcholu $i \in N$. Omezující podmínky (58) a (59) zajišťují možnost rozdělení přestávek a správné načítání dělených přestávek. Omezující podmínky ve skupinách (60) a (61) zajišťují, že obsluhy spojů započnou ve stanovených časových okamžicích. Aby bylo možno modelovat i časové přejezdy z depa, rozšíříme množinu spojů N opět o depo, přičemž opět položíme $z_{0k} = 0$ pro $k \in V$ a $s_0 = 0$. Omezující podmínky ve skupině (62) zajistí, že nebude docházet k tvorbě turnusů neobsahujících žádný spoj (při experimentu s modelem docházelo ke vzniku takových jízd, které však nemají vliv na hodnotu účelové funkce). Omezující podmínky ve skupinách (63), (64), (65), (66), (67) a (68) vymezují definiční obory proměnných použitých v modelu.

Funkčnost modelu bude prověřena na jednoduchém testovacím příkladu.

Doba jízdy mezi jednotlivými vrcholy grafu je popsána v tabulce číslo 9. Pro tento model je uvažováno jedno depo a šest 6 vrcholů, která má obsloužit. Hrany mezi vrcholy představují jednotlivé spoje, vrcholy prezentují výchozí a koncové stanice linek.

Na obrázku č. 14 jsou zobrazeny délky jednotlivých spojů a vrcholy, jež obsluhují, pomocí kompletního grafu. Vstupní hodnoty jsou zobrazeny pomocí tabulek 14,15 a 16.



Obrázek 14 – Časové vzdálenosti spojů vyjádřené kompletním grafem

Tabulka 14 – Doba jízdy mezi jednotlivými vrcholy

	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
V_0	0	10	20	30	40	20
V_1	10	0	20	20	30	10
V_2	30	20	0	10	20	30
V_3	40	10	30	0	30	40
V_4	40	40	40	30	0	20
V_5	30	20	10	40	50	0

Tabulka 15 – Požadovaná doba obsluhy jednotlivých vrcholů

Depo/spoj	Depo	Spoj 1	Spoj 2	Spoj 3	Spoj 4	Spoj 5
Vrchol reprezentující spoj	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
Doba spoje T_i	0	50	30	10	5	20

Tabulka 16 – Požadovaný čas obsluhy jednotlivých vrcholů

Spoj i	1	2	3	4	5	6
$Tmin_i$	0	10	11	18	40	45
$Tmax_i$	100	10	11	18	40	45

Kompletní zobrazení kódu z prostředí optimalizačního programu Xpress-IVE pro oběhy vozidel s dělenou přestávkou je uvedeno na obrázku 15.

```

model vrptw_vice_prestavek
uses "mxxprs"

declarations
n=5
uzel=0..n
vozidlo=1..3
prestavka=1..3

t:array(uzel,uzel)of real
T:array(uzel)of real
Tmax:array(uzel)of real
Tmin:array(uzel)of real
x:array(uzel,uzel,vozidlo)of mpvar
y:array(1..n,vozidlo)of mpvar
u:mpvar
z:array(1..2,vozidlo)of mpvar
s:array(uzel,vozidlo)of mpvar
w:array(vozidlo)of mpvar
q:array(1..2)of real
end-declarations

TMAX:=100

p:=45

t:=[0,10,20,30,40,20,
    10,0,20,20,30,10,
    30,20,0,10,20,30,
    40,10,30,0,30,40,
    40,40,40,30,0,20,
    30,20,10,40,50,0]

T:=[0,50,30,10,5,20]
q:=[15,30]
Tmin:=[0,10,11,18,40,45]
Tmax:=[100,10,11,18,40,45]
M:=100000

forall(j in 1..n)sum(i in uzel,k in vozidlo)x(i,j,k)=1
forall(j in 0..n,k in vozidlo)sum(i in uzel)x(i,j,k)=sum(i in uzel)x(j,i,k)
forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)y(i,k)-y(j,k)+n*x(i,j,k)<=n-1

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)s(i,k)+T(i)<=s(j,k)+M*(1-x(i,j,k))

forall(k in vozidlo)2*w(k)+sum(i in 1..2)z(i,k)=2*u
forall(k in vozidlo)u<=w(k)+sum(i in 1..2)z(i,k)

forall(k in vozidlo)sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)+p*w(k)+sum(i in 1..2)q(i)*z(i,k)<=TMAX+TMAX*(w(k)+(sum(i in 1..2)z(i,k))/2)

forall(i in 1..n,j in 1..n,k in vozidlo)x(i,j,k)is_binary
forall(i in 1..2,k in vozidlo)z(i,k)is_binary
forall(k in vozidlo)w(k)is_binary
u is_binary

uf:=sum(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo)t(i,j)*x(i,j,k)+1000*sum(j in uzel,k in vozidlo)x(0,j,k)+0.001*sum(k in vozidlo)w(k)
minimize(uf)

writeln("uf je ",getobjval)
forall(i in uzel,j in uzel,k in vozidlo|getsol(x(i,j,k))=1)writeln("x(",i,",",j,",",k,")=",getsol(x(i,j,k)))
forall(k in vozidlo)writeln("Delka jizdy vozidla ",k," je ",getsol(sum(i in uzel,j in uzel)(t(i,j)+T(j))*x(i,j,k)+p*w(k)+sum(i in 1..2)q(i)*z(i,k)))

forall(i in uzel,k in vozidlo|getsol(s(i,k))>0)writeln("s(",i,",",k,")=",getsol(s(i,k)))
forall(k in vozidlo|getsol(w(k))>0)writeln("w(",k,")=",getsol(w(k)))
forall(i in 1..2,k in vozidlo|getsol(z(i,k))>0)writeln("z(",i,",",k,")=",getsol(z(i,k)))
writeln("u=",getsol(u))

end-model

```

Obrázek 15 – Kód pro dělenou přestávku z prostředí programu Xpress

Výstupní hodnoty

Po zkontrolování zapsaného kódu a spuštění program vypsal údaje, jež jsou v kompletním znění zobrazeny na následujícím obrázku č. 16.

```
uf je 2140
x(0,3,1)=1
x(0,5,2)=1
x(1,0,1)=1
x(2,4,2)=1
x(3,1,1)=1
x(4,0,2)=1
x(5,2,2)=1
Delka jizdy vozidla 1 je 155
Delka jizdy vozidla 2 je 190
Delka jizdy vozidla 3 je 45
s(1,1)=10
s(1,3)=99950
s(2,2)=20
s(4,2)=50
z(1,1)=1
z(1,2)=1
z(1,3)=1
z(2,1)=1
z(2,2)=1
z(2,3)=1
u=1
```

Obrázek 16 – Výstupní údaje ke kódu dělených přestávek

Proměnná x vyjadřuje, která hrana (spoj) je obsloužena. Její 3 indexy vyjadřují počáteční vrchol spoje, koncový vrchol spoje a číslo vozidla v tomto pořadí.

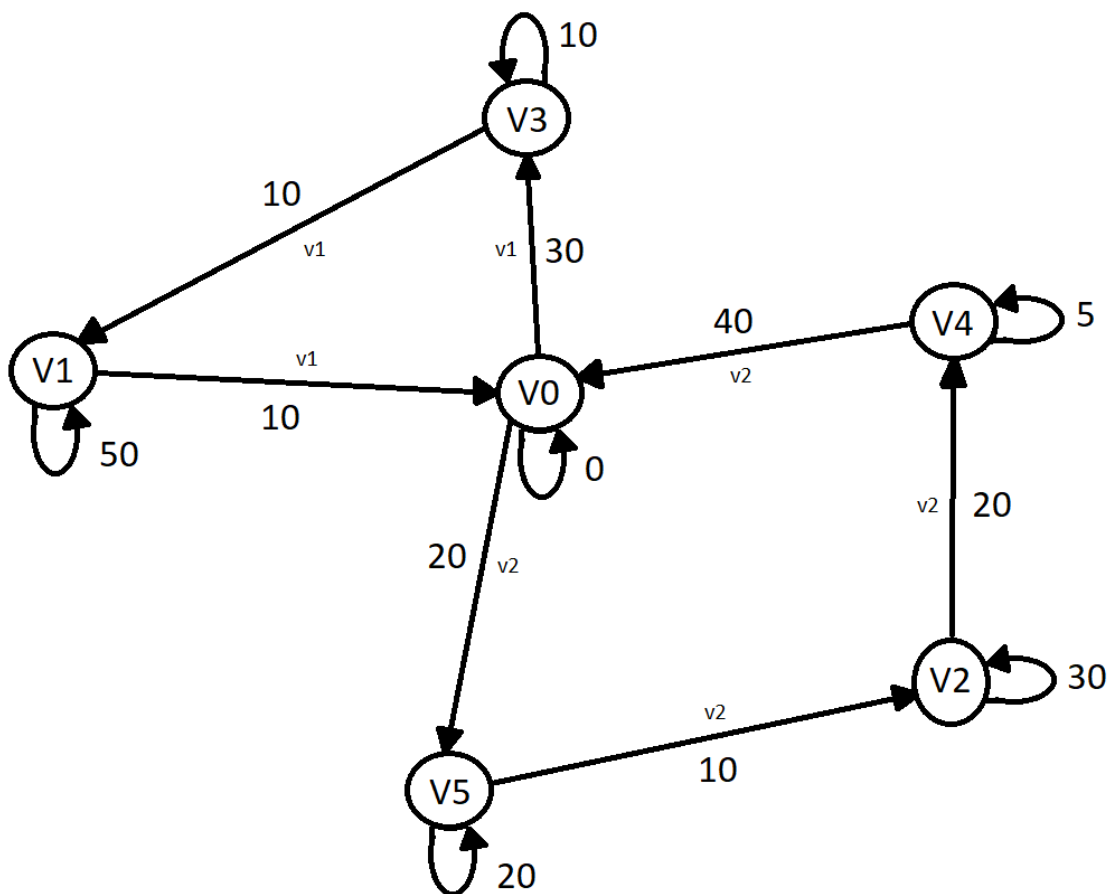
Z výsledků uvedených na obrázku 9 mj. vyplývají výsledné oběhy vozidel, kde v_x značí číslo vozidla a V_x označení obsluhovaného vrcholu. Výsledná posloupnost konkrétních oběhů vozidel je následující:

$v_1: V_0 \rightarrow V_3 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$

$v_2: V_0 \rightarrow V_5 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4 \rightarrow V_0$

Schéma znázorňující programem navržené oběhy vozidel je zobrazeno na obrázku č. 17.

Ohodnocení hran mezi různými vrcholy představuje dobu jízdy. Tou může být doba spoje nebo i Přesun představují zejména ty hrany, jež incidují s vrcholem V_0 , jenž představuje depo. Smyčky u vrcholů představují čas, jenž je nutný pro vykonání obsluhy daného vrcholu. Index v_1 respektive v_2 u konkrétních hran označuje, zda bude jízda vykonána vozidlem 1 nebo 2.



Obrázek 17 – Výsledné oběhy vozidel s možností dělených přestávek řidičů

Složení pracovních výkonů vozidla v1 a v2 je popsáno formou tabulky č. 17 respektive 18.

Tabulka 17 – Pracovní výkon vozidla v1

T- doba obsluhy; t-doba přesunu	T(0)	t(0,3)	T(3)	t(3,1)	T(1)	t(1,0)	T(0)
Časové trvání	0 min	30 min	10 min	10 min	50 min	10 min	0 min

Tabulka 18 – Pracovní výkon vozidla v2

T- doba obsluhy; t-doba přesunu	T(0)	t(0,5)	T(5)	t(5,2)	T(2)	t(2,4)	T(4)	t(4,0)	T(0)
Časové trvání	0 min	20 min	20 min	10 min	30 min	20 min	5 min	40 min	0 min

8.4 Diskuze

Optimalizační výpočty byly provedeny na úloze obsahujícím jedno středisko a pět spojů. Uvedené simulované modely neberou ve svém rozsahu v potaz střídání řidičů na vozidle. Pokud by řidič střídán v čase, kdy ještě nedosáhl limity pro započítání přestávky, přestávka se z pohledu vozidla nekoná. Není však reálný předpoklad, že by směna řidiče v tomto ohledu trvala méně než 4,5h.

9 Závěr

Cílem diplomové práce „Problematika bezpečnostních přestávek řidičů při optimalizaci oběhů vozidel“ bylo analyzovat stávající stav podmínek upravujících bezpečnostní přestávky řidičů, analyzovat známé, v ideálním případě již aplikované metody, jimiž již byly v minulosti prováděny optimalizace oběhů vozidel, případně vybrat takové, které by mohly být použity i pro zohlednění dodržování bezpečnostních přestávek. Na základě této analýzy výběru vhodné metody sestavit funkční optimalizační model, který bude dodržovat parametry definované bezpečnostní přestávky.

Tohoto bylo dosaženo výslednými modely, které dokáží pracovat jak s pevně definovanou délkou přestávky tak s dělenou formou přestávek.

Je nutné však dodat, že zadané parametry modelu svým charakterem splňují kritéria pouze pro některé druhy dopravy. Zejména nepočítají směnnost řidičů, která dokáže oběhům vozidel definovat množství dalších omezujících podmínek při dodržování pracovních dob v rámci dnů, týdnů a měsíců. Pojmy jako denní doba odpočinku a týdenní doba odpočinku pak dávají tušit, že oběh vozidel by musel být plánován v horizontu týdnů před uvedením, což zejména v nákladní dopravě by pro dopravce znamenalo obrovský problém. Z tohoto důvodu jsou výsledné modely v uvedené formě vhodné k použití výpočtů oběhů vozidel a zohlednění dodržování bezpečnostních přestávek v cyklicky se opakujících dopravních výkonech – typicky jízdní, případně letové řády.

Výsledky definovaných modelů pak dávají mj. minimální vozovou potřebu avšak s absencí zálohových vozidel.

Zdroje

- 1 Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006 ze dne 15. března 2006 o harmonizaci některých předpisů v sociální oblasti týkajících se silniční dopravy, o změně nařízení Rady (EHS) č. 3821/85 a (ES) č. 2135/98 a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 3820/85 (Text s významem pro EHP)
- 2 HRUBÁ KATEŘINA Bezpečnostní informace řidičů dálkových autobusů [online] – dostupné na: <https://www.bozpinfo.cz/desatero-bozp-ridicu-dalkovych-autobusu> [cit.18.10.2018]
- 3 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/15/ES o úpravě pracovní doby osob vykonávajících mobilní činnost v silniční dopravě
- 4 Program tachospeed [online], dostupné na <http://tachospeed.cz/> [cit. 21.10.2018]
- 5 Nařízení vlády 589/2006 Sb., kterým se stanoví odchylná úprava pracovní doby a doby odpočinku zaměstnanců v dopravě.
- 6 VÍT JANOŠ– výukové materiály pro ČVUT FD K617 – 8 Oběhy vozidel
- 7 T.MAJER, S. PALÚCH - Model tvorby turnusov v autobusovej doprave s respektováním bezpečnostnej prestávky
- 8 VOJTĚCH JÁNKÝ, LUKÁŠ NEKOLNÝ – popis linky č. 134 [online], dostupné na <https://www.tram-bus.cz/mhd-praha/autobusy/linky-autobusu/denni/linky-100-149/linka-134/> [cit. 10.5.2019]
- 9 M. Koubaa, S Dhouib, D. Dhouib, A. Mhamedi - Truck Driver Scheduling Problem.
- 10 Výklad pojmu MD, zveřejněný na webových stránkách - https://www.techportal.cz/33/neobchodni-preprava-zbozi-uniqueidgOkE4NvrWuPXXmwm_6smSuUcmfcl5oAT1UWBS0t|gLw/ [cit. 19.5.2019]
- 11 LEFENSOR s.r.o., [online], dostupné na <https://www.penize.cz/pracovni-pravo/313708-vyrovnavaci-obdobi> [cit. 19.5.2019]
- 12 Centrum služeb pro silniční dopravu, zveřejněno na webových stránkách https://www.cspsd.cz/storage/files/Pracovni_rezim_ridicu.pdf [cit. 19.5.2019]
- 13 Centrum přeprav – dopravní a logistický webový portál <http://www.centrum-preprav.cz/clanky-prilohy/aetr-vs-561.pdf> [cit. 18.5.2019]
- 14 Mechanika Teplice, společnost zabývající se digitálními tachografy a jejich použitím. Webové stránky společnosti <https://www.mechanikadc.cz/> [cit. 20.5.2019]

- 15 Vyhláška o bezpečnostní letové normě 466/2006 Sb.
- 16 DUŠAN TEICHMANN - výukové materiály k předmětu Kvantitativní metody v dopravě, FD ČVUT

Seznam obrázků

- 1 – Tabelární porovnání AETR a ES č. 561/2006Sb [13]
- 2 – Grafické znázornění doby odpočinku pro řidiče linkových autobusů [4]
- 3 – Digitální tachograf
- 4 – Zapsaný kód jednofázového exaktního přístupu
- 5 – Výstup z programu Xpress jednofázového exaktního přístupu
- 6 – Zapsaný kód jednofázového exaktního přístupu po doplnění omezujících podmínek
- 7 – Výstup z programu Xpress jednofázového exaktního přístupu po doplnění omezujících podmínek
- 8 – Zapsaný kód pro model VRP s časovými okny
- 9 – Výstupní údaje modelu VRP s časovými okny
- 10 – Časové vzdálenosti spojů vyjádřené kompletním grafem
- 11 – Zapsaný kód pro model s nedělenou přestávkou
- 12 – Výstupní údaje modelu s nedělenou přestávkou
- 13 – Výsledné oběhy vozidel s nedělenou přestávkou řidičů
- 14 – Časové vzdálenosti spojů vyjádřené kompletním grafem
- 15 – Kód pro dělenou přestávku z prostředí programu Xpress
- 16 – Výstupní údaje ke kódu dělených přestávek
- 17 – Výsledné oběhy vozidel s možností dělených přestávek řidičů

Seznam tabulek

- 1 – Orientační přehled běžné údržby vozidel dle periodicity [6]
- 2 – Orientační přehled doby vykonání běžné údržby vozidel [6]
- 3 – Orientační přehled denní kilometráže oběhů vozidel [6]
- 4 – Klasifikační kritéria zabývající se problematikou rozvrhu řidičů [9]
- 5 – Intervaly linky č. 134 [8]
- 6 – Znázorněné oběhy vozidel jednofázového exaktního přístupu
- 7 – Znázorněné oběhy vozidel jednofázového exaktního přístupu po doplnění omezujících podmínek
- 8 – Doby přejezdů mezi jednotlivými spoji
- 9 – Doby spojů
- 10 – Časy odjezdů jednotlivých spojů
- 11 – Doby přejezdů mezi jednotlivými spoji
- 12 – Doby spojů
- 13 – Časy odjezdů jednotlivých spojů
- 14 – Doba jízdy mezi jednotlivými vrcholy
- 15 – Požadovaná doba obsluhy jednotlivých vrcholů
- 16 – Požadovaný čas obsluhy jednotlivých vrcholů
- 17 – Pracovní výkon vozidla v1
- 18 – Pracovní výkon vozidla v2

Seznam tabulek

- 1 – Hodnoty matic τ a B