

Tomáš Vicherek<sup>1</sup>

## Navádění vlaků do bezkonfliktních tras

**Klíčová slova:** *rescheduling, optimalizace, automatické stavění vlakových cest, navádění vlaků*

### Úvod

Pro železnici jsou typické vysoké pořizovací i provozní náklady dopravních prostředků i dopravní cesty. Jen odpisy vozidel, náklady na periodickou údržbu a náklady času přepravovaných lidí, zboží a personálu mohou na jedné trati dosahovat řádově tisíců korun za minutu.

Zvyšováním spolehlivosti a odstraňováním závislostí mezi různě zpožděnými vlaky lze dosáhnout kombinace:

- zlepšení plnění jízdního řádu,
- snížení rezerv nutných pro uspokojivou stabilitu provozu, tj. zvýšení využití výrobních faktorů.

Jednou z cest, jak tomuto cíli napomoci, je zvyšování efektivity řízení provozu. To se v posledních dekadách naplňuje především:

- zaváděním moderních zabezpečovacích systémů,
- zaváděním dálkového řízení,
- vytvářením stále komplexnějších informačních systémů usnadňujících a zkvalitňujících rozhodování řídicích pracovníků,
- budováním nadřazených systémů řízení.

Poslední jmenovaná položka doposud slaví v zahraničí větší úspěchy než v ČR.

Postupná automatizace řízení pohybu vlaků na trati dále oprostí řídicí pracovníky od rutinní práce. To jim umožní lépe se soustředit na problémy, které jsou počítačem obtížně řešitelné, neboť tvoří příliš komplexní či měkký systém. Pro kvalitní automatické stavění vlakových cest (ASVC) je vhodné přesně počítat trasy konkrétních, v oblasti se aktuálně či v blízké době vyskytujících vlaků. Pokud jsou k dispozici z mnoha hledisek optimální trasy respektující aktuální dopravní situaci, otevírá se možnost vlaky do těchto tras co nejpřesněji navést. Tímto v ideálním případě vznikne jakési rozšíření systému Automatického vedení vlaku (AVV).

Vyšší plynulost provozu přinese jak úsporu trakční energie a lepší využití infrastruktury, tak snížení míry přenášeného zpoždění mezi vlaky.

---

<sup>1</sup> Ing. Tomáš Vicherek, 1986, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra technologie a řízení dopravy, interní doktorand; AŽD Praha, s.r.o., Závod Technika, Výzkum a vývoj, vývojové pracoviště 9 – Technologie a řízení dopravy, samostatný vývojový pracovník, Vicherek.Tomas@azd.cz

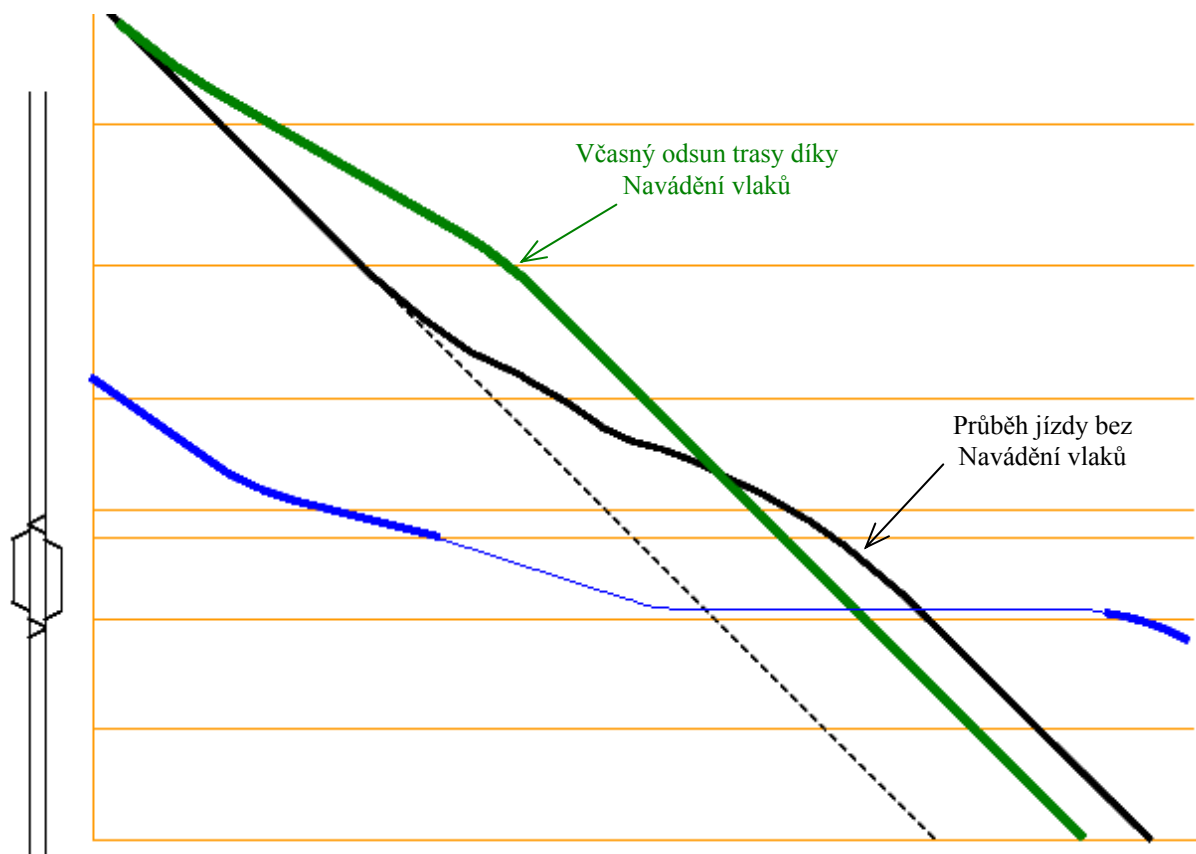
Cílem autorovy diplomové práce [1], na níž staví tento článek, bylo simulační ověření možných přínosů funkce Navádění vlaků na trati Hranice na Moravě – Prosenice na základě splněného grafikonu vybraného dne JŘ 2009/10, a to na vlastním, za tímto účelem vyvinutém software.

Autor této práce se nechal inspirovat výběrovou přednáškou pana Marco Lüthiho z ETH Zürich, týkající se projektu PULS 90 SBB, přednesenou na Univerzitě Pardubice dne 15. 4. 2008, viz [2, 3].

Dále je nutno podotknout, že řízení železničního provozu na základě aktuálních odchylek či dokonce občasně navádění vlaků do optimálních časových poloh je železnici dlouhodobě vlastní, autor se zabývá simulačním ověřením možnosti dalšího zefektivnění a automatizace těchto činností.

## 1 Motivace pro zavedení funkce Navádění vlaků

Nechť jedou dva vlaky po shodné koleji stejným směrem. Zpožděný pomalejší první vlak má být předjet rychlejším druhým vlakem:



**Obrázek 1** – Efekt navedení do bezkonfliktní trasy

**Zdroj:** Autor

Princip navádění vlaků do bezkonfliktních tras spočívá v myšlence, že pokud je včas řízeně opožděn druhý vlak, může tento dosáhnout cíle dříve. Zároveň dojde k úspoře trakční energie, neboť druhý vlak nemusel zastavit či výrazně zpomalit u hlavního návěstidla.

Celý proces popisuje Obrázek 1: první vlak je znázorněn modře a vjíždí do stanice sníženou rychlostí vedlejším směrem. Rychlý vlak bez včasné informace (černě) jej v posledních prostorových oddílech před stanicí dojede, silně sníží rychlost, aby se pak pomalu rozjížděl. Alternativou při Navádění vlaků je trasa rychlého vlaku, který včas dostane pokyn k opoždění své trasy (zeleně). Tento vlak kritické místo projede rychleji a dříve, než vlak bez navádění a předjetý vlak může odjet dříve.

Na základě obsazování a uvolňování kolejových úseků program Navádění vlaků sleduje pohyb vlaků na trati a řeší případné konflikty. Mění tedy plán cest i časový průběh trasy vlaku. Pokud by se měly dva vlaky dojet či sjet, pošle příslušnému (druhému) vlaku s dostatečným předstihem zprávu, že má zpomalit (energeticky vhodné načasování výběhu, následné jízdy a konečného opětovného rozjezdu v kontextu se statickým rychlostním profilem), aby kritický úsek projel ve stanovený čas a blokoval kritické prvky dopravní cesty co nejkratší dobu. Pozitivním důsledkem je:

- úspora trakční energie,
- snížení přeneseného zpoždění,
- lepší využití infrastruktury.

### 1.1 *Forma výstupní informace pro strojvedoucího*

Informace pro strojvedoucí může mít grafickou či textovou podobu. Textová podoba může být například následující:

1. „za 12 sekund začněte zpomalovat výběhem na 126 km/h,“
2. „udržujte tuto rychlost po dobu 54 sekund do 12:37:46,“
3. „poté opět zrychlete na 160 km/h.“

Je pravděpodobné, že většinu potřebného prodloužení jízdní doby bude možno uskutečnit vhodným zařazováním výběhů před každým snížením rychlosti. Podobný asistenční systém zjišťující polohu vlaku prostřednictvím GPS (avšak se statickým JŘ) se používá například u DB (EBuLa). V Lötschbergském tunelu je na vlak buď počítačem nebo dispečerem zasílána velmi jednoduchá zpráva o optimální rychlosti.

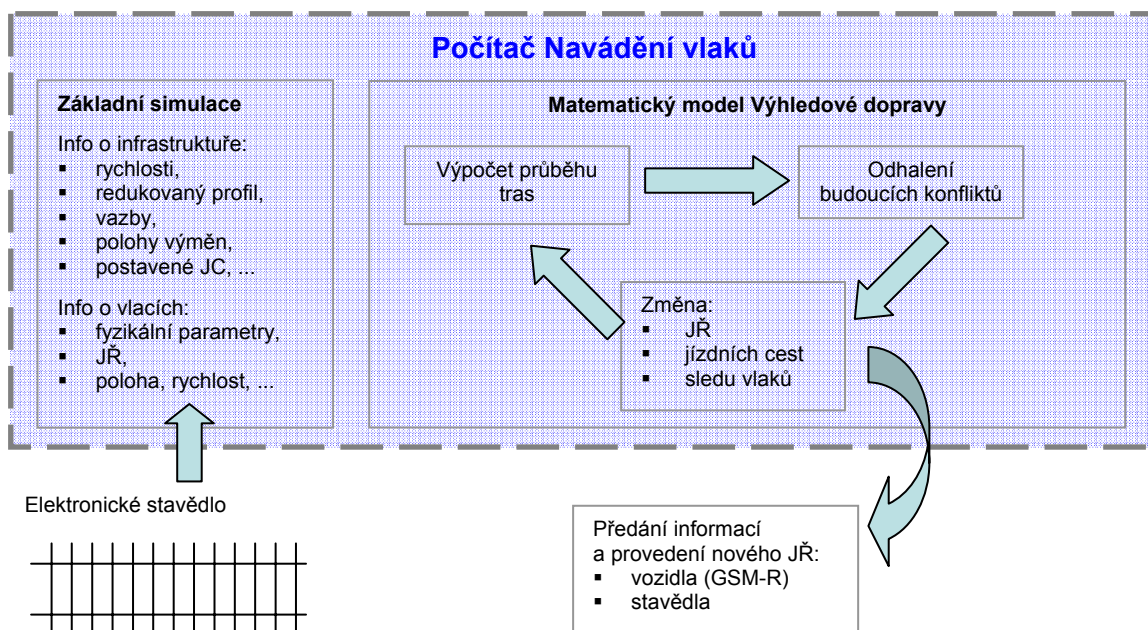
Prvotním úkolem strojvedoucího je nespouštět oči z trati, proto je každá nutnost sledování obrazovky diskutabilní. Po vzoru VZ ETCS by bylo možné např. předávat informace i prostřednictvím několikasekundových akustických signálů (tónů s měnícími se frekvencemi, např. pomalu klesající tón = zadej výběh, během výběhu ticho, poté pomalu klesající až konstantní tón = jízda stálou rychlostí, pomalu rostoucí tón – začni rozjezd na plnou rychlost).

Z hlediska bezpečnosti je důležité, aby informace asistenčního charakteru nebyly rušivé pro bezpečnou práci strojvedoucího. Z formy jejich poskytování musí být zřejmé, že mají nižší prioritu než návěsti či informace vlakového zabezpečovače.

## 2 **Detailní popis funkce Navádění vlaků**

Funkce je nikoli bezpečná nadstavba stávajících zabezpečovacího zařízení pro optimalizaci a automatizaci provozu na ucelených traťových úsecích. Případná chyba nebezpečným směrem je zachycena zabezpečovacím zařízením.

Postup výpočtu popisuje Obrázek 2:



**Obrázek 2** – Postup Navádění vlaků

**Zdroj: Autor**

Velmi důležité jsou **informace o vlastnostech vlakových souprav**, tj. jízdní řád, hnací vozidlo, stanovená rychlost, délka, hmotnost, druh vlaku, apod. Tyto informace bude program získávat z již existujících informačních systémů. V současné době informace o vlastnostech vlakových souprav v ČR u nákladních vlaků soukromých dopravců v IS provozního řízení téměř zcela chybí. U vlaků osobní dopravy GTN uvádí především informace dle JŘ. Zcela nedostatečně jsou rovněž řešeny informace o mimořádnostech na vlaku. [4]

Konstantními informacemi jsou **parametry infrastruktury**, tj. topologie, redukovaný profil, traťové rychlosti, délky kolejí, polohy izolovaných styků apod. Nevyhovující datovou podobou mají informace o plánovaných či aktuálních pomalých jízdách a výlukách. Tyto informace bude proto nutno zpočátku zadávat do programu ručně. [4]

Program získává v reálném čase **informace z elektronických stavědel o událostech v kolejišti**. Hlavními událostmi jsou obsazování a uvolňování kolejových úseků, důležité jsou také informace o stavění a rušení jízdních cest, přestavování výměn, stavech přejezdů, atd. Na základě těchto událostí běží na počítači v oblasti důležitých parametrů co nejuvěrnější model reálného provozu – **Základní simulace (ZS)**.

Základní simulace vytváří dostatečně podrobnou a aktuální datovou základnu pro **Matematický model Výhledové dopravy (MMVD)**. Tento model je druhou částí programu a je generován při významných změnách ve skutečném provozu, tj. řádově několikrát za minutu. Jeho úkolem je v první fázi navrhnout tzv. Základní trasy vlaků, tj. pomocí autorem vyvinutých algoritmů hledání cest v grafu kolejiště určit prvotně použité staniční a traťové koleje, sestavit adekvátní statický rychlostní profil a na základě něj spočítat jízdní doby vlaku. Při znalosti vypočteného času fyzického

obsazování a uvolňování jednotlivých kolejových úseků čelem vlaku lze určit časová rozmezí, v nichž je daný kolejový úsek vyhrazen jízdě konkrétního vlaku. Tato časová rozmezí se pro účely Navádění vlaků nazývají "okna vyhrazení". Tímto se využívá tzv. Sperrtreppentheorie, která se používá v německy mluvících zemích jako alternativa provozních intervalů.

V následující fázi jsou v tomto souboru Základních tras vlaků (tj. jakémsi scénáři výhledové dopravy) hledány konflikty. Jsou tedy hledány kolejové úseky, které jsou po určitou dobu zároveň vyhrazeny pro jízdu dvou vlaků. Pokud je takovýto konflikt odhalen, je řešen buď změnou koleje jednoho z vlaků, nebo úpravou časového průběhu trasy jednoho z vlaků. Každou z uvedených změn je konflikt zúčastněných dvou vlaků na dané části kolejiště vyřešen. Vzniklo několik různých scénářů Výhledové dopravy. Pozměněné trasy jsou přepočteny a v rámci každého scénáře se opět hledají a řeší konflikty.

V takto vzniklých scénářích vznikne často několik bezkonfliktních scénářů výhledové dopravy. Každý scénář je ohodnocen dle účelové funkce. Ta se v simulacích v rámci diplomové práce skládala ze součtu:

- ceny času cestujících ve vlacích (použito 90 Kč/osobová hodina dle [5]),
- ceny spotřebované trakční energie (použito 2,6 Kč/kWh mechanické práce).

Cena času cestujících byla dále zvážena podle druhu vlaku. Při praktické aplikaci není problém uplatnit jiné, daleko širší multikriteriální hodnocení.

Na základě tohoto globálního kritéria (Kč) je vybrán jeden bezkonfliktní scénář Výhledové dopravy, který bude uskutečněn. Pro jeho uskutečnění jsou podstatné informace o:

- plánovaných vlakových cestách,
- potřebných zásazích do jízdy vlaku – navádění vlaků do bezkonfliktních tras.

Právě druhá z uvedených možností řešení konfliktů rozšiřuje funkci automatického stavění vlakových cest o Navádění vlaků a je předmětem zkoumání. Vlak, jehož trasa má být pro plynulé řešení budoucího konfliktu od určitého místa trasy odsunuta, bude naveden na virtuální cílový bod.

### 3 Výpočet cílového bodu

Cílový bod je datová struktura sloužící k upravování průběhu trasy vlaku počítané v Matematickém modelu Výhledové dopravy. Vyznačuje se **polohou** na trati, **časem**, v němž jej má naváděný vlak dosáhnout a **rychlostí**, kterou má vlak v momentě dosažení cílového bodu mít. V analogii s AVV si lze jako cílové body představit časy a místa zastavení vlaku v zastávce. Tuto představu lze rozšířit o možnost umístění cílových bodů s nenulovou rychlostí kdekoli na trati. Grafickou interpretací mohou být body v nákresem JŘ doplněné o rychlost.

#### 3.1 Určení cílové rychlosti

Cílová rychlost musí odpovídat v daném místě maximální možné rychlosti (samozřejmě s ohledem na další dynamický profil jízdy vlaku). Důvodem pro volbu tohoto postupu je zajištění minimalizace doby obsazení kritických prvků v následujících prostorových oddílech. Toto může být důležité například při křížování vlaků a zkracuje se tímto i vliv křížování na předjížděný vlak.

Jedním z důvodů pro nižší cílovou rychlost může být návaznost na další cílový bod v rámci sekvence cílových bodů při jízdě rychlejšího vlaku za pomalejším. Vznikají totiž situace, kdy navedení na bližší cílový bod znamená již energeticky vhodně neodvratitelný předčasný příjezd na vzdálenější cílový bod. Některé cílové body se v takové situaci musí ignorovat a směrodatné zůstávají jen ty nejvíce omezující.

### 3.2 Určení cílového času

Čas cílového bodu vychází z:

- očekávaného času uvolnění kritického kolejového úseku (posledního společného pro obě trasy vlaku) první vlakem,
- doby reakce KO (1 – 3 sekundy),
- doby projevu této změny na monitoru zadávacího počítače dispečera (1 s),
- doby na uvolnění závěru kritického kolejového úseku (u rozvětveného KÚ 5 s, jinak 1 s),
- doby na zadání další JC:
  - obsluha člověkem normativně 6 s, ve skutečnosti často stisknutí klávesové zkratky makra cesty (1 s),
  - nebo zadání povelu od ASVC (cca 1 s),
- doby potřebné na postavení nové vlakové cesty (vlastní měření autora na SZZ ESA 11 na CDP Přerov, hodnoty se mohou v jiných stanicích či za jiného počasí o několik sekund lišit):
  - pokud nedochází k přestavování výměn 7 s,
  - pro jednu skupinu přestavovaných výměn 18 s (dle síly napájecího zdroje většinou maximálně 4 či 6 výměn),
  - pro každou další přestavovanou skupinu výměn navíc 9 sekund,
- doby odložení rozsvícení povolujícího znaku, pokud se cesta nachází v přibližovacím úseku PZZ
  - při „podržení“ přejezdu 0 s,
  - jinak dle místních poměrů,
- doby potřebné k doručení nového povolení k jízdě na hnací vozidlo vlaku:
  - u VZ LS možná i mírně záporná složka vlivem několik sekund trvající doby aktualizace znaku na opakovači kvůli použití dodatečného kódování KO.
  - u ETCS řádově jednotky sekund.

Ve chvíli, kdy dojde na vlakovém zabezpečovači k prodloužení povolení k jízdě, shoduje se poloha čela naváděného vlaku v ideálním případě s polohou vypočítaného cílového bodu.

### 3.3 Určení cílové polohy na trati

Kilometrická poloha vychází ze vzdálenosti, jaká musí být mezi právě uvolněným kritickým prvkem a následným vlakem. Kritický kolejový úsek (KÚ) do doby postavení další cesty kryje návěstidlo v poloze zakazující jízdu (tzv. kryjící návěstidlo). Jeho předvěstí je v případě automatického bloku předchozí návěstidlo



v poloze výstraha. V druhém prostorovém oddíle před návěstidlem kryjícím kritický KÚ se do kolejových obvodů kóduje žlutý kód VZ LS. Cílový bod se má nacházet:

- a) u vlaků a v místech s rychlostí nad 120 km/h na začátku druhého prostorového oddílu před návěstidlem kryjícím kritický prvek, tj. nejméně 2 000 m před kritickým KÚ,
- b) u vlaků a v místech s rychlostí do 120 km/h včetně na dohlednost před předvěstí návěstidla kryjícího kritický KÚ, tj. pro rychlost 120 km/h a 1000 m dlouhý prostorový oddíl 1 400 m před kritickým KÚ. Dohlednost lze zahrnout buď do kilometrické polohy cílového bodu v závislosti na rychlosti vlaku, nebo patřičným prodloužením mezery mezi okny vyhrazení. Druhá varianta je jednodušší například v případě, že se naváděný vlak právě rozjíždí.

### 3.4 Diskuse polohy cílového bodu

Případ respektující jízdu na nejméně dva volné prostorové oddíly znamená, že pokud se vlak nenachází v přímém rovném úseku a není opticky vidět na více než dva oddíly dopředu, nemá strojvedoucí šanci ani zaznamenat, že se rozjíždí proti nejméně dva kilometry vzdálené návěsti stůj.

Druhý případ znamená, že se strojvedoucí někdy i dle pokynu Navádění vlaků rozjíždí, přestože na návěstním opakovací svítí žluté světlo, které se změní až 12 s (dohlednost) před projetím návěsti výstraha. Navíc přesný čas změny návěstního znaku lze s velkou mírou jistoty (např. s jistotou nad 95 % zpoždění do 1 sekundy) znát jen několik desítek sekund předem – doba stavění jízdní cesty je při známé poloze výměn ve stanici s velkou přesností předpověditelná. V posledních například 18 sekundách (plus případná dohlednost a rezerva) tak funkce Navádění vlaků může dále potvrdit či zamítnout správnost navádění a tím připravit strojvedoucího na možnou potřebu brzdění k návěsti stůj.

Předtím, než Navádění vlaků obdrží poslední událost omezujícího vlaku, je tedy čas cílového bodu zatížen jistou mírou nejistoty. Každý proces ale lze statisticky popsat. Bez kvalitního vlakového zabezpečovače může být z bezpečnostního hlediska nepřijatelným problémem následující situace: Omezující vlak zvyšuje nenadále zpoždění ve chvíli, kdy se za ním jedoucí vlak již (na pokyn Navádění vlaků) rozjíždí proti návěsti výstraha. Toto může být při pobytu omezujícího vlaku ve stanici/zastávce často se vyskytující jev. Proto bude potřebné při výpočtu času cílového bodu započítávat jistou rezervu zjištěnou na základě záznamů z předchozího provozu.

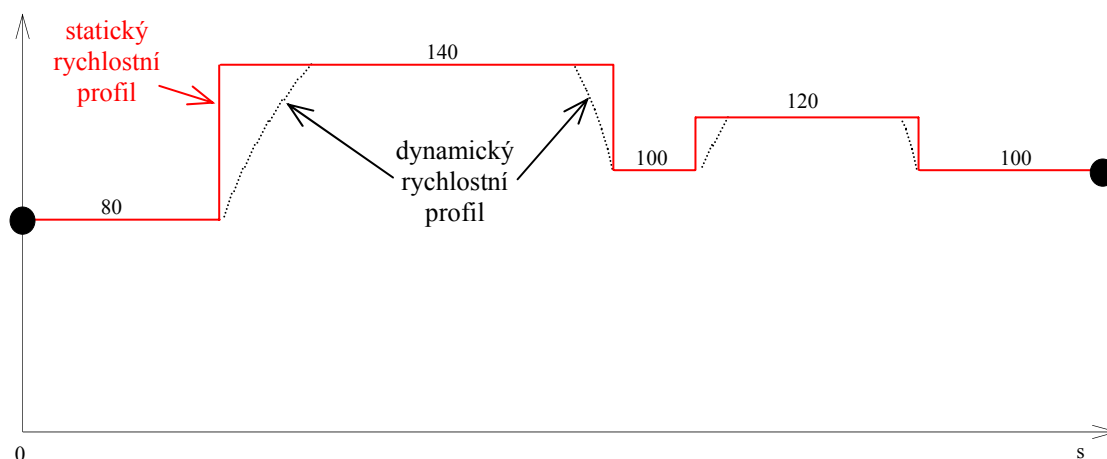
Přesné nastavení polohy cílového bodu je citlivá záležitost. Faktem je, že vzdálenost cílového bodu od kryjícího návěstidla přímo ovlivňuje časovou smysluplnost Navádění vlaků. Příliš opatrné stanovení vzdálenosti cílového bodu má za následek nadměrné prodloužení vzdálenosti mezi vlaky v kritických okamžicích. Pozitivní efekt Navádění vlaků na redukci přenášeného zpoždění by se tímto změnil na negativní.

Bez Navádění vlaků dochází k rozjezdům zpožděného vlaku oddíl po oddílu za omezujícím vlakem v současné době mnohem častěji, než tomu bude s Naváděním vlaků. Tato funkce tak může mít pozitivní vliv na bezpečnost železniční dopravy.

## 4 Energeticky efektivní způsoby prodloužení jízdní doby

V provozu často nastává situace, kdy vlak má být na určitém místě později, než umožňuje fyzikálně nejrychlejší způsob jízdy. Důvodem může být jak plánovaný příjezd do následující zastávky (od roku 1993 v ČR součást Optimalizátoru jízdy vlaku AVV), tak na základě dopravní situace vzniklá potřeba řízeně opozdit vlak pro zamezení konfliktu tras, tj. navést vlak na vypočtený cílový bod.

Možnost či potřeba prodloužení jízdní doby mezi dvěma body poskytuje šanci dosáhnout znatelných úspor trakční energie. Úspora energie na sekundu možného prodloužení jízdní doby (JD) roste s rychlostí a hmotností vlaku, klesá s pravděpodobností rekuperace (v ČR málo využívaná). Nejvyšší úspora energie na jednu sekundu přináší první sekunda. S rostoucím prodlužováním JD tedy klesá úspora energie na sekundu prodloužení JD. Jako příklad je na obrázku 3 uveden následující statický (červeně) a v něm nejrychlejší možný dynamický rychlostní profil:



**Obrázek 3** – Modelový statický a dynamický rychlostní profil

**Zdroj: Autor**

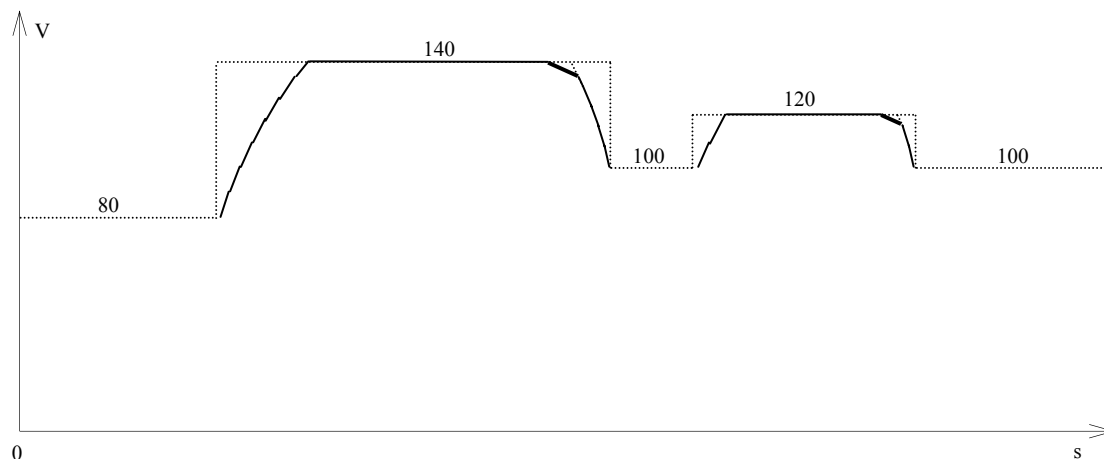
Černé body znázorňují místa na trati, u kterých je dána nejen kilometrická poloha, ale i čas, v němž mají být dosaženy a rychlost vlaku v okamžiku jejich dosažení.

Levý bod je například aktuální poloha vlaku. Pravý bod je cílový bod vytvořený Naváděním vlaků, při předjíždění vlaků často v místě druhého oddílového návěstidla před vjezdovým návěstidlem, popř. na dohlednost před posledním odd. návěstidlem automatického bloku, rozbor viz podkapitola 3.3 *Určení cílové polohy na trati*. Oba body jsou vlastně zadáním celé úlohy.

### 4.1 Prodlužování jízdní doby výběhem

Takovýto rychlostní profil umožňuje zpočátku spořit energii na dvou místech, a to při snižování rychlosti ze 140 na 100 km/h a ze 120 na 100 km/h. Pokud prodloužíme jízdní dobu tohoto profilu o několik málo sekund, je účelné to provést dle obrázku 4:





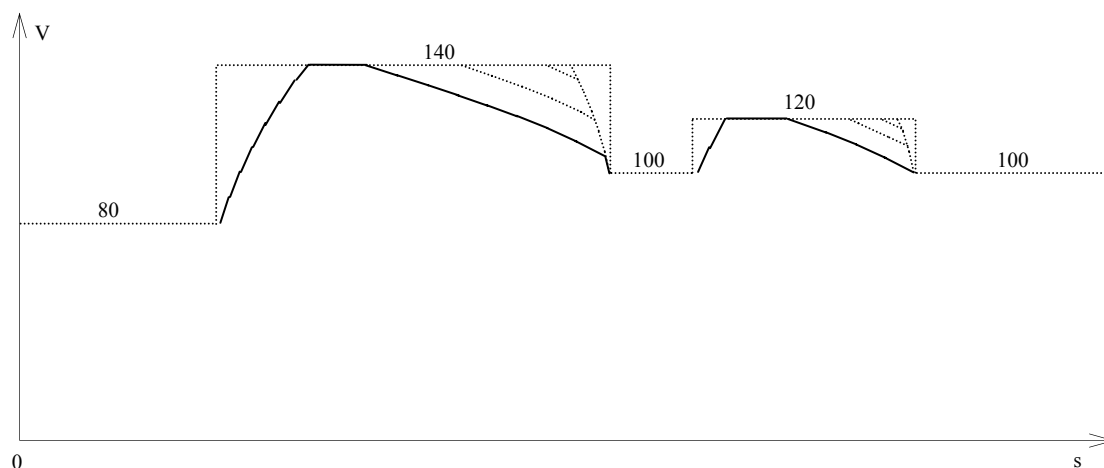
**Obrázek 4** – Výběhy pro krátké prodloužení jízdní doby, řádově o sekundy **Zdroj: Autor dle [6]**

Jelikož doba, o kterou můžeme prodloužit JD, je konstantní a mezi dvěma pevnými body existují dvě příležitosti k výběhu, musí se konstantní doba přerozdělit při zvážení následujících faktorů:

- Ve vyšší rychlosti dochází k vyšší úspoře energie na sekundu doby trvání výběhu. Důvodem je nárůst jízdních odporů mj. dle kvadratické funkce rychlosti.
- Snížení rychlosti o konstantní změnu má ve vyšší rychlosti relativně menší vliv na prodloužení JD (např. snížení rychlosti výběhem o 5 km/h z rychlosti 140 km/h je v poměru k původní rychlosti nižší než snížení rychlosti výběhem o 5 km/h z rychlosti 40 km/h).

Dle [6] je vhodné konstantní dobu možného prodloužení přerozdělit v poměru druhých mocnin rychlostí.

Pokud je nutno dále prodloužit jízdní dobu, vypadají výběhy následovně:



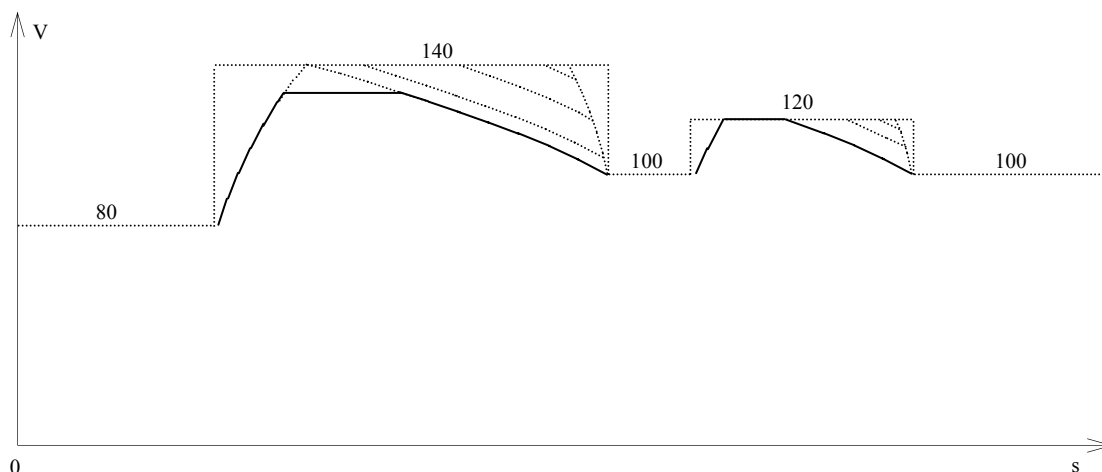
**Obrázek 5** – Výběh pro prodloužení jízdní doby řádově o 10 sekund **Zdroj: Autor dle [6]**

Na obrázku 5 je vidět, že přerozdělování doby se zastavilo ve chvíli, kdy bylo u druhého výběhu dosaženo nejnižší možné rychlosti (100 km/h).

Při dalším prodlužování jízdní doby se zvětšuje jen první výběh a je dosaženo stavu, kdy již nelze dále prodlužovat žádný výběh. Je nutno začít snižovat maximální dosaženou rychlost.

#### 4.2 Prodlužování jízdní doby snižováním maximální rychlosti

Jízdní odpory jsou největší v nejvyšší rychlosti, proto je z energetického hlediska účelné alokovat další sekundy doby prodloužení JD přednostně na snížení nejvyšších dosažených rychlostí:



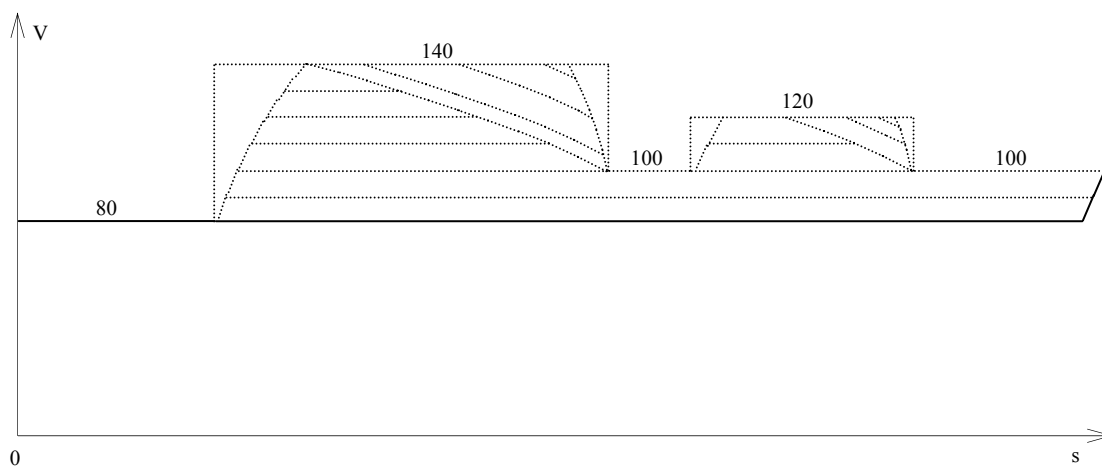
**Obrázek 6** – Snižování rychlosti pro prodloužení JD o desítky sekund

**Zdroj: Autor dle [6]**

Potud autor při vysvětlování energeticky optimálních strategií prodlužování JD čerpal od např. Dr. Ivo Myslivce [6].

V případě, že je nutno prodloužit jízdní dobu o řádově několik minut, je nutno dále snižovat maximální rychlost, dokud není dosaženo rychlosti dané cílovým bodem.

V této chvíli se již rychlostní profil skládá z velké části z jízdy konstantní rychlostí. Pro další zvýšení prodloužení JD lze dále snižovat maximální rychlost, před cílovým bodem je nutno dosáhnout předepsané rychlosti (podrobnější rozbor aspektů tohoto kroku viz podkapitola 3.1 *Určení cílové rychlosti*). Energetický efekt snižování maximální rychlosti spočívá v tom, že odpor vzduchu, který je ve vyšších rychlostech dominantním vozidlovým odporem, roste přibližně s druhou mocninou rychlosti. Spotřebovaná energie na konstantní dráze roste s o jednu derivaci nižší mírou, tedy přibližně lineárně s rychlostí.



**Obrázek 7** – Pro prodloužení jízdní doby o několik minut je nutno udržovat nižší rychlost

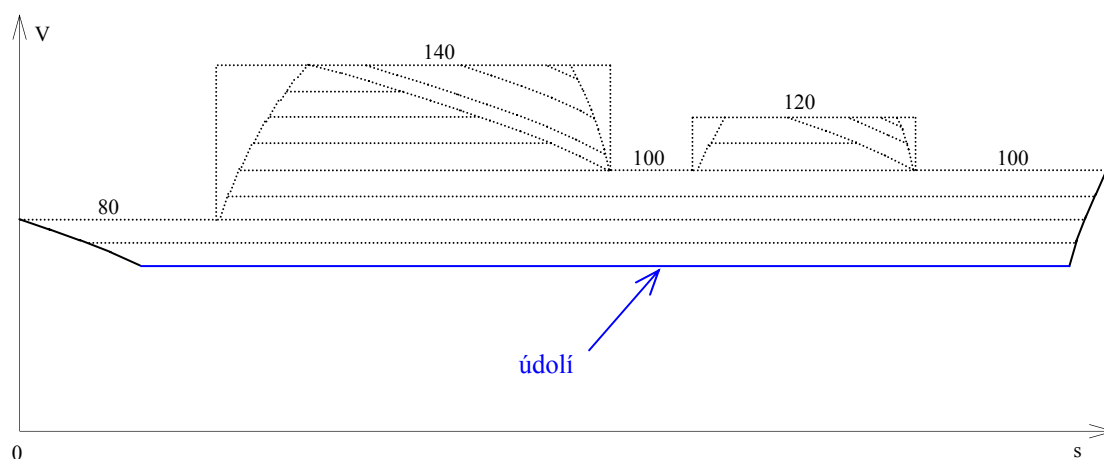
**Zdroj: Autor**

Nyní bylo dosaženo prodloužení JD o řádově jednotky minut. Pro další prodlužování JD je nutno zadat výběh co nejdříve, nejlépe ihned po získání informace o potřebě výrazně prodloužit JD, popř. po uplynutí dohlednosti.

#### 4.3 Další prodlužování jízdní doby

Čím kratší je úsek jízdy konstantní rychlosti (po „dně údolí“), tím důležitější je zadat výběh včas. V případě dalšího zkracování konstantního úseku až k setkání výběhu s rozjezdem, lze již dalšího prodloužení jízdní doby dosáhnout (dle naléhavosti a obtížnosti většího prodloužení doby):

- snížením cílové rychlosti při opětovném rozjezdu na rychlost danou cílovým bodem,
- nahrazením počátečního výběhu brzděním vypočtené intenzity, neboť dřívější brzdění na určitou rychlost znamená nižší ztrátu kinetické energie než pozdější brzdění na rychlost nižší, problematická bude ale přesnost realizace požadovaného zpomalení strojvedoucím,
- snížením cílové rychlosti předchozího cílového bodu (pokud jej vlak ještě neminul),
- nebo oddálením odjezdu vlaku z předchozí stanice / zastávky.



**Obrázek 8** – Použití „údolí výběhem“ pro několikaminutové prodloužení JD

**Zdroj: Autor**

## 5 Provedení simulací

Pro ověření možných přínosů aplikace Navádění vlaků bylo zvoleno porovnání dvou simulací železničního provozu: První bez jakýchkoli algoritmů Navádění vlaků pro nastavení prostředí dle skutečných událostí z GTN a druhá s algoritmy Navádění vlaků. Ekonomický přínos Navádění vlaků byl určován z rozdílu nákladů zpoždění a spotřeby energie simulace bez Navádění vlaků a simulace s Naváděním vlaků.

Efekt funkce se projeví z energetického i časového hlediska nejmarkantněji na trati s hustým provozem (mnoha konflikty) a vysokými přírážkami na rozjezd a zastavení. Tyto jsou způsobeny buď nízkým měrným výkonem nebo vysokými dosahovanými rychlostmi vlaků. Vliv mohou mít i nepříznivé sklonové poměry. Vybraný úsek je proto kvůli množství těžkých nákladních vlaků a silně smíšenému provozu velmi vhodný. První traťová kolej mezi Drahotušemi a Prosenicemi se považuje za nejzatíženější v ČR dle hrubých tun za rok.

Generování tras v reálném čase pro ASVC a Navádění vlaků vyžaduje co neaktuálnější a nejpřesnější informace o pohybech vlaků. Tyto jsou automaticky generovány elektronickými stavědly, která jsou kvůli dálkové dispečerské centralizaci na uvedené trati propojena do sítě. Již dnes poskytují na sekundu přesné informace GTN (z níž lze čerpat další nezbytně nutné informace o vlacích) a návazným IS. Toto je prospěšné jak pro provedení co nejuvěrnější simulace, tak pro snadnost budoucí implementace zkoumané funkce.

Hranicemi oblasti jsou odjezdová návěstidla staničních kolejí žst. Polom (ve směru Hranice na Moravě), resp. krycí návěstidla odb. Skalka na trati 280 na straně jedné a odjezdová návěstidla žst. Přerov a Dluhonice ve směru na Prosenice na straně druhé. Zahrnuty jsou všechny dopravní staniční a traťové koleje.

Vzhledem k absenci elektronického stavědla v žst. Přerov a Dluhonice v době vytváření simulačního modelu jsou pro účely této práce časy vstupu vlaků kvůli požadavku na sekundovou přesnost dopočítávány z událostí „Minutí vj. náv.“ z žst. Prosenice dle nejkratší vypočtené jízdní doby.

V obou variantách simulace provozu (s Naváděním vlaků i bez něj) je generován matematický model jízdního řádu vlaků, které se v oblasti budou vyskytovat v následujících dvaceti minutách. Do simulace bez Navádění vlaků vstupují jen informace o kalkulovaných jízdních cestách, do simulace s Naváděním vlaků je jízda vlaků navíc omezoována dle informací o fázi jízdy úseku trasy (jízda, výběh, brzdění) a cílové rychlosti na konci úseku.

Zahrnuty jsou **vlaky, které ve středu 21. 4. 2010 vstoupily do oblasti v období 13:00 – 16:45**. Vlaky, které jedou od Polomi přes Hranice na Moravě úvrátí do Odb. Skalka a naopak, popř. v Hranicích na Moravě od Odb. Skalka končí, byly součástí simulace, aby skutečně blokovaly koleje jako ve skutečnosti, ale pro krátkost své trasy nejsou součástí vyhodnocení. Toto období odpovídá odpolední špičce pracovního dne. Celkem tedy bylo zahrnuto 22 vlaků dálkové osobní dopravy, 10 vlaků regionální osobní dopravy a 12 vlaků nákladních a ostatních.

Pro potřeby simulací byly využity záznamy z Protokolu obsluhy Graficko-technologické nadstavby. Vlaky do oblasti vstupují v momentu události „Odjezd“ v některé z hraničních stanic. Poté již jejich jízda není událostmi korigována, neboť jak s Naváděním vlaků, tak bez něj může matematický model přiřadit vlakům jiné koleje, přeložit předjíždění/křížování či zcela jinak vyřešit dopravní situaci než tomu bylo ve skutečnosti. To je jedním z hlavních důvodů, proč bylo rozhodnuto porovnávat nikoli skutečnost se simulací Navádění vlaků, nýbrž simulaci Navádění vlaků se simulací bez Navádění vlaků.

Navádění vlaků z důvodu konfliktu bylo zakázáno u vlaků s přírážkou na rozjezd menší, než činí součet dohlednosti a jízdní doby od předvěsti ke kryjícímu návěstidlu. U takovýchto vlaků je z časového hlediska výhodnější nechat vlak dojet co nejdále a následně rychle rozjet. Ztracená úspora energie lehkého vlaku je malá.

Algoritmy vytvořeného prostředí dokázaly v simulaci s Naváděním vlaků automaticky vyřešit všechny nastalé dopravní situace, a to bez jakkoli ručně předdefinovaných kolejí, pouze na základě topologie oblasti, JŘ a vlastností vlaků. V simulaci bez Navádění vlaků bylo nutno vlivem nedokonalosti algoritmů nutno

navolit dvě vlakové cesty ručně. Při řešení konfliktů nebylo v obou simulacích bráno v potaz dodržení přípojů mezi vlaky.

## 6 Výsledky simulací

Přínos Navádění vlaků v simulovaném období oproti simulaci bez navádění činil především na uspořené trakční energii:

- v osobní dálkové dopravě 213 Kč,
- v osobní regionální dopravě 108 Kč,
- v nákladní dopravě 435 Kč.

Součet přínosů za simulované období činí 756 Kč.

Výsledky ukazují, že přínos Navádění vlaků v oblasti snižování zpoždění je při daném provozu na trati v simulovaném období relativně malý. Důvody jsou následující:

- a) Liniový vlakový zabezpečovač – na rozdíl od např. Švýcarských drah, které na mnoha tratích používají bodový vlakový zabezpečovač, není důsledek minutí návěstidla v poloze výstraha v ČR tak markantní.
- b) Měrný výkon souprav především v osobní dopravě je natolik vysoký a dosahované rychlosti na zkoumané trati natolik nízké (okolo 120 km/h), že časová ztráta způsobená opětovným rozjezdem je v porovnání se součtem doby jízdy v prostorovém oddíle, dohlednosti a potřebných rezerv malá. Přínos lze očekávat pouze v případě, že by Navádění vlaků zamezilo významnému zpomalení či zastavení těžkého vlaku. Tato situace však v simulovaném období bohužel nenastala. K těmto případům by mohlo docházet na styku tratí v Prosenicích a Hranicích na Moravě.
- c) Algoritmy Navádění vlaků nejsou dokonalé, ve stromech řešení není např. prověřována a dle kritéria optimality zkoumána možnost pozdního předjetí s mírným opožděním rychlejšího vlaku, letmé předjíždění, varianty náhradních kolejí při jejich změně, atd.
- d) U některých vlaků nebyl dostatek času řízeně opozdit odsouvaný vlak, neboť první zásahy započaly až po jeho vstupu do oblasti, a to okamžitým brzděním a následným výběhem kvůli nemožnosti přijmout bezkonfliktní scénář bez povolení překrytí oken vyhrazení kritických prvků tras vlaků. Řešením by bylo zvětšení ovládané oblasti s blíže zatím nezkoumaným negativním vlivem na kombinatorickou náročnost výpočtů.

Pozoruhodná je míra zkrácení doby jízdy nákladních vlaků v obou simulacích oproti skutečnosti. Ta není způsobena přímo zásahy Navádění vlaků, nýbrž exaktním automatickým stavěním vlakových cest a jízdou nákladních vlaků definovanou rychlostí. Dle dosavadních poznatků autora se rychlost jízdy nákladních vlaků odvíjí nejen od osobnosti strojvedoucího, ale i např. od blízkosti konce směny. „Odvaha“ dispečera vložit do těsného sledu další nákladní vlak, popř. odložit jeho předjetí do dalších stanic, je snižována silnou preferencí osobní dopravy a růzností jízdnicích dob nákladních vlaků. Snižování směrodatné odchylky jízdnicí doby nákladního vlaku by tak spolu s exaktním ASVC v budoucnu mohlo způsobit výrazné zrychlení a zhospodárnění nákladní dopravy.

## 7 Extrapolace přínosu Navádění vlaků na delší období

Do simulace bylo zahrnuto 44 vlaků odpolední špičky. Celý zkoumaný den obsahuje 298 jízd vlaků. Pomineme-li pokračování odpolední špičky do cca 19 hodin a dopolední špičku od 6 do 10 hodin, zbývá 14 hodin relativně méně hustého provozu s pravděpodobně menší mírou interakcí mezi vlaky. Pokud by v mimošpičkovém období byly přínosy Navádění vlaků na jeden vlak poloviční a stejně jako do vyhodnocení výsledků simulace byly počítány jen vlaky, které v oblasti jedou nejméně 3 mezistaniční úseky, vypadal by výpočet přínosu Navádění vlaků za zkoumaný den dle tabulky 1.

**Tabulka 1** – Extrapolace přínosu Navádění vlaků na celý den

21. 4. 2010		Vlaků za den			Přínos Navádění vlaků na jeden vlak		Přínos Navádění vlaků celkem		
Kategorie	vlaků v simulaci	ve špičce	mimo špičku	celkem	ve špičce	mimo špičku	ve špičce	mimo špičku	celkem
Dálková osobní	22	52	46	98	9,7 Kč	4,8 Kč	503 Kč	223 Kč	726 Kč
Regionální osobní	10	22	18	40	10,8 Kč	5,4 Kč	238 Kč	97 Kč	335 Kč
Nákladní a ostatní	12	43	66	109	36,3 Kč	18,1 Kč	1 559 Kč	1 196 Kč	2 755 Kč
Celkem	44	117	130	247			2 300 Kč	1 516 Kč	<b>3 816 Kč</b>

**Zdroj: Autor**

Zkoumaný den byla dubnová středa. O víkendu, na začátku roku, v létě a v druhé polovině prosince je intenzita dopravy nižší. Pro vyčíslení úspor za celý rok proto lze proto počítat s 250 dny (pro opatrnost podhodnoceno). Roční přínos Navádění vlaků by tak na trati Polom/Odb. Skalka – Přerov/Dluhonice za trakční energii po odečtení nákladů času cestujících mohl činit **954 tis. Kč**.

Tento odhad je silně ovlivněn výběrem simulovaného období a kvalitou a rozsahem modelu. Skutečná částka může být několikanásobně vyšší či nižší.

Do výpočtu není zahrnuto například:

- zvýšení kapacity infrastruktury,
- úspora ze snížení četnosti zastavení nákladních vlaků z dopravních důvodů,
- náklady času nákladních vlaků obecně,
- případné úspory provozních zaměstnanců řídících provoz, včetně souvisejících prostor,
- výrazně vyšší cena trakční energie u nezávislé trakce,
- vyšší energetický přínos Navádění vlaků při výlukových pracích.

## 8 Doba od vzniku významné události do aplikace povelů

Je žádoucí, aby doba od vzniku významné události do počátku uskutečňování na jejím základě vytvořených povelů byla co nejkratší. Tato doba se skládá z:

- doby cesty informace od vzniku v kolejišti do počítače Navádění vlaků – téměř konstanta vlastní danému řešení zabezpečovacího zařízení,
- doby generování JŘ – závisí na složitosti dopravní situace, rozsahu oblasti, počtu vlaků, požadované kvalitě řešení a požadované pravděpodobnosti nalezení vhodného řešení,
- doby nutné pro přenos povelů k dopravním zaměstnancům – závisí na vytiženosti přenosové sítě, přidělené prioritě a pokrytí trati signálem,



- doby reakce dopravních zaměstnanců na povel – v případě strojvedoucích se bude pravděpodobně jednat o zavedenou dohlednost (12 s), autor by se přikláněl k době kratší.

První tři z těchto dob jsou v řádu jednotek sekund, v součtu maximálně 10 s. Spolu s dohledností celková doba činí zhruba 20 sekund. Pokud doba od počátku rozjezdu vlaku do obsazení úseku za odjezdovým návěstidlem činí běžně několik desítek sekund, jsou povely generovány minutu i více po prvotní události. Tomu lze zamezit buď instalací GPS přijímačů do vozidel, nebo zprávou od řídicího systému vlaku či AVV o zavření dveří popř. počátku rozjezdu, nebo v budoucnu využitím „Position report“ ETCS.

Dobu reakce na povel lze výrazně zkrátit provázáním s AVV na straně vlaku a s ASVC na straně stavebního úseku.

Prodlužování celkové doby zvyšuje pravděpodobnost vytváření povelů pro řešení situace, která se již změnila. Zpoždění se dá částečně kompenzovat generováním JŘ a povelů pro situaci, která pravděpodobně nastane až za několik sekund.

V kontextu celkové doby má relativně malý vliv, zda generování JŘ trvá půl nebo dvě sekundy. Výrazné prodlužování doby generování však není žádoucí. Průměrná doba generování JŘ během provedených simulací na notebooku z roku 2006 činila 0,5 sekundy, na notebooku z roku 2008 činila již jen čtvrtinu této doby.

## 9 Spolupráce Navádění vlaků s AVV a ASVC

Absence spolupráce s těmito systémy, tedy předávání informací provoznímu personálu a závislost na jeho vůli optimalizační povely následovat, znamená:

- zvýšení rezerv mezi trasami vlaků, tedy nižší propustnost,
- pomalejší reakci na povely Navádění vlaků,
- kompromis mezi naprostou volností ke změnám pro dosažení aktuálního optima při každém generování JŘ a potřebou dopravních zaměstnanců měnit povely minimálně,
- jiné řešení dopravní situace člověkem než na jaké Navádění vlaků dle svého modelu vlaky navádí – často v případě, kdy je postavena vlaková cesta na jinou kolej, než vypočítalo Navádění vlaků.

Tyto důsledky by mohly snižovat efektivitu Navádění vlaků, resp. v některých případech vůbec ohrozit jeho smysluplnost. Je také otázkou, zdali mají dopravní zaměstnanci v každé situaci dostatek času sledovat povely Navádění vlaků.

Proto je pro zavádění Navádění vlaků důležité napojení na ASVC. Pro vytváření matematického modelu Výhledové dopravy pro Navádění vlaků je nutno každopádně určit vlakům koleje. ASVC naopak musí znát jízdní doby vlaků, které počítá a určuje Navádění vlaků. **Navádění vlaků a ASVC jsou tak předurčeny ke sloučení do jediného celku.**

Propojení s AVV pak urychlí reakci na jakoukoliv změnu, dokáže zpřesnit navádění vlaků a umožnit strojvedoucímu se lépe soustředit na bezpečnostně relevantní podněty.

## Závěr

Navádění vlaků nejlépe ve spojení s ASVC může při správné aplikaci znamenat úspory trakční energie a zvýšení produktivity velmi drahých výrobních faktorů jak u správce infrastruktury (levné zvýšení kapacity trati), tak u dopravců (zrychlení oběhu vlaků především nákladní dopravy). Z úspor energie bude v případě elektrické trakce při současném nastavení drážního systému v ČR těžit správce infrastruktury. U nezávislé trakce ušetří přímo dopravci, zatímco náklady na zavedení funkce budou jak na straně správce infrastruktury (centrální počítač, nákup produktu, kvalitní rádiový systém), tak na straně vlastního hnacího vozidla (zařízení pro předávání povelů, kvalitní rádiový systém). Provedené simulace odhalují na zkoumané trati jen na nákladech na trakční elektřině možnost úspory řádově 1 mil. Kč ročně.

Jako nevýhodné se z časového hlediska jeví používání Navádění vlaků u vlaků s velmi vysokým měrným výkonem (osobní vlaky) či nízkou rychlostí, částečně i u vlaků, které mírně překročily hranici 120 km/h.

Při dostatečně nízké směrodatné odchylce a nedostatečné možnosti přirozené optimalizace situace strojvedoucím (malé jízdní odpory) může být Navádění vlaků z hlediska snížení přeneseného zpoždění přínosné především u vlaků s nižším měrným výkonem. Velmi výrazný pozitivní vliv lze očekávat u nákladních vlaků a těžkých rychlých vlaků dálkové osobní dopravy, pro které každé zbytečné snížení rychlosti znamená několikaminutový rozjezd, především ve stoupání.

Ušetřený čas může znamenat kapacitu pro nejméně část trasy dalšího vlaku a tedy možnou úsporu v podobě nevynaložených investičních prostředků do úprav kolejíště.

Redukce přenosu druhotného zpoždění pomůže především při hrozbě kaskádového nárůstu zpoždění v rámci svazku vlaků.

V rámci tratě lze největší potenciál hledat v místech styku více tratí či změně počtu traťových kolejí, při (letném) křížování a při výlukové činnosti.

V minimalistickém pojetí by zavedení Navádění vlaků mohlo mít podobu dalšího rozpracování asistenčních systémů, v maximalistickém pojetí půjde o vysoce automatizovaný exaktní systém provazující ASVC a Navádění vlaků s AVV propojený s mnoha informačními systémy.

## Zkratky:

ASVC	Automatické stavění vlakových cest
AVV	Automatické vedení vlaku
DB	Deutsche Bahn (Německé dráhy)
EBuLa	Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen (elektronický sešitový jízdní řád a přehled pomalých jízd)
ETCS	European Train Control System (evropský vlakový zabezpečovač)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GPS	Global Positioning System
GTN	Graficko-technologická nadstavba zabezpečovacího zařízení
IS	informační systém

JC	jízdní cesta
JD	jízdní doba
JŘ	jízdní řád
KO	kolejový obvod
KÚ	kolejový úsek
LS	Československý liniový vlakový zabezpečovač
MMVD	Matematický model Výhledové dopravy
PZZ	přejezdové zabezpečovací zařízení
SBB	Schweizerische Bundesbahnen (Švýcarské spolkové dráhy)
SZZ	staniční zabezpečovací zařízení
VZ	vlakový zabezpečovač
ZS	Základní simulace

### Literatura:

- [1] VICHEREK, Tomáš. Dynamické upravování jízdního řádu na základě aktuální provozní situace pro bezkolizní provázení vlaků - provozně ekonomické posouzení aplikace Real-time Reschedulingu na trati Hranice na Moravě - Prosenice. Pardubice, 2010. 72 s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Dostupné z WWW: <<http://hdl.handle.net/10195/36751>>.
- [2] Marco Luethi & Giorgio Medeossi & Andrew Nash: *Structure and Simulation Evaluation of an Integrated Real-Time Rescheduling System for Railway Networks* [online]. Poslední revize 14.11.2008 [cit. 2010-03-27]. Dostupné z <<http://www.springerlink.com/content/u536j9715021n048/fulltext.pdf>>
- [3] Marco Lüthi, Giorgio Medeossi, Andy Nash: *Evaluation of an Integrated Real-Time Rescheduling and Train Control System for Heavily Used Areas* [online]. c2008 [cit. 2010-03-27]. Dostupné z <http://www.andynash.com/nash-publications/Luethi2007-realttime-IAROR07-paper.pdf>
- [4] Polach, V.; Vicherek, T. Návrh řešení automatického stavění vlakových cest. *Doprava*. 2010, 52, 5, s. 23-26. Dostupný také z WWW: <<http://www.revuedoprava.cz/file/doprava-5-2010-navrh-reseni-automatickeho-staveni-vlakovych-cest/>>. ISSN 0012-5520.
- [5] Melichar, Vlastimil: *Analýza faktorů působících na poptávku po přepravních službách dopravního podniku*, studijní podpora k přednášce č. 3 a 4 z předmětu *Ekonomika dopravního podniku* ze dne 18. 2. 2008.
- [6] průběžné konzultace s Dr. Ing. Ivo Myslivcem, AŽD Praha, s.r.o.