

Ivo Hruban¹, Petr Nachtigall², Ondřej Štěpán³

Přínosy zavedení ETCS z pohledu brzdných křivek

Klíčová slova: *ETCS, brzdná křivka, prokluzová vzdálenost*

Úvod

Zavedení systému evropského vlakového zabezpečovače s sebou bezpochyby přinese mnohé přínosy. Vlivy systému na jednotlivé podsystémy železničního provozu jsou popisovány a diskutovány v mnoha odborných textech. Následující pojednání se zaměřuje na přínosy systému z pohledu průběhu brzdění vlaku. Brzdění vlaku, jeho způsob a průběh, je nejdůležitější vlastností vlaku. Bez možnosti vedení vlaku v každém okamžiku vždy přesně stanovenou „bezpečnou“ rychlostí by nebylo možné zaručit bezpečný provoz po železnici. Přístupů k brzdění vlaku, ať teoretických kvantifikujících brzdné účinky, tak praktických v podobě fyzického provedení brzdy na železničním vozidle, je využíváno mnoho. Aby systém evropského vlakového zabezpečovače mohl správně fungovat je zapotřebí porovnat a prozkoumat všechny možnosti určování brzdné síly a samotného provedení brzdy a jejich odlišnosti a možné dopady.

1 Brzdění vlaku pod dohledem ETCS

Základním principem tradiční zabezpečovací techniky je předpoklad, že strojvedoucí zastaví vlak (respektive náležitě sníží jeho rychlost) od předvěsti k návěstidlu. Za tuto skutečnost je strojvedoucí trestně odpovědný, projetí návěstidla je posuzováno jako veřejné ohrožení. Ke splnění tohoto předpokladu je nutné, aby brzdná dráha vlaku nebyla delší, než zábrzdná vzdálenost, resp. definovaná vzdálenost k zastavení (v případě rozložení brzdné dráhy vlaku do dvou prostorových oddílů). K tomu musí být vlak dostatečně brzděn, tedy jeho skutečné brzdící procento (λ) musí být větší než předepsané. Předepsané brzdící procento je tabelárně stanoveno (v ČR v Dopravním řádu drah ve vyhlášce č. 173/1995 Sb. v platném znění) v závislosti na rychlosti jízdy, spádu trati, zábrzdne vzdálenosti, způsobu brzdění, a délce vlaku. Účinek brzd je u jednotlivých vozů typově posuzován podle experimentálně stanoveného brzdícího procenta, které je v podobě brzdící váhy vozu a hmotnosti vozu napsáno na vozidle. Na základě údajů na vozidlech určí osoba odpovědná za

¹ Ivo Hruban, Ing., Ph.D., 1983, Univerzita Pardubice, doktorské (Univerzita Pardubice, Technologie a management v dopravě a telekomunikacích, Pardubice), technologie železniční dopravy, Katedra technologie a řízení dopravy.

² Petr Nachtigall, Ing., Ph.D., 1982, Univerzita Pardubice, doktorské (Univerzita Pardubice, Technologie a management v dopravě a telekomunikacích, Pardubice), technologie železniční a městské dopravy, Katedra technologie a řízení dopravy.

³ Ondřej Štěpán, Ing., 1988, Univerzita Pardubice, magisterské (Univerzita Pardubice, Dopravní inženýrství a spoje, Pardubice), systémový specialista, ČD, GR O 11/2.

sestavení vlaku skutečné brzdicí procento vlaku a prokazatelným způsobem jej sdělí strojvedoucímu formou zprávy o brzdění. Ta rovněž obsahuje informaci o tom, zda je vlak dostatečně brzděn, tedy zda může využívat stanovenou rychlost, nebo zda tato musí být z důvodu nedostatečného účinku brzd snížena.

Moderní vlakové zabezpečovače (ATP) kontinuálně kontrolují, zda vlak (vedený strojvedoucím, nebo systémem automatického vedení vlaku) nejede rychleji, než jak dovoluje jeho aktuální dynamický rychlostní profil, který je vypočten s uvažováním jeho garantovaných brzdných schopností. V ČR byl tento systém zaveden zhruba před 15 lety na lince C pražského metra na vozidlech M1 a to v podobě systému Matra PA 135. Základem převedení statického rychlostního profilu na dynamický je výpočet diferenciální rovnice brzdění – brzdné křivky. Základním vstupem pro jejich stanovení je kromě dalších parametrů vlaku (jízdni odpor, rotující hmoty, ...) poměrná brzdná síla F/m (gama) a to v závislosti na čase (vývin brzdné síly – doba prodlevy a doba náběhu) a na rychlosti.

Obdobný princip používá i evropský vlakový zabezpečovač (dále ETCS). Základním vstupem pro výpočet brzdných křivek je závislost brzdné síly na rychlosti (tabulka funkce brzdné síly v závislosti na rychlosti) a závislost brzdné síly na čase (v době na začátku brzdění). Tímto způsobem lze velmi přesně stanovit brzdné křivky pro vlaky stálé sestavy (například trakční jednotky). Též lze definovat, zda je či není, jejich brzdná síla závislá na aktuální hmotnosti (obsazení) vlaku. Výpočet je validován zkouškou [1]. Tento způsob nazýváme gama přístupem.

U náhodné sestavy vlaku (lokomotiva plus vozy) však nelze metodu gama uplatnit, neboť u jednotlivých vozidel tvořících vlak není k dispozici informace o průběhu brzdné síly v závislosti na rychlosti a čase, ani míra jistoty této informace. K dispozici je jen skutečné brzdicí procento, zjištěné jako podíl součtu na vozech napsaných brzdících vah a (předpokládané) hmotnosti vlaku. Přepočet brzdícího procenta (λ) na průběh poměrné brzdné síly v závislosti na rychlosti a čase (gama) není snadný, neboť z nápisů na vozidlech není k dispozici funkce dvou proměnných ($F = f(v, t)$), ale jen jedno číslo – brzdicí procento. Obecně platí, že různá vozidla s různě působícími brzdami mohou z určité rychlosti dosáhnout stejnou brzdou dráhu, tedy je jim přiděleno stejné brzdicí procento. Zpětně však nelze z brzdícího procenta (zábrzdě dráhy) jednoznačně určit hodnoty jednotlivých parametrů brzdění. Pro umožnění transformace brzdících procent (λ) na brzdny účinek (gama) slouží konverzní modely. Jejich zpracovatelé jsou si vědomi reálného rozptylu vlastností různých systémů brzd železničních vozidel, a proto přidávají další přírážky. Obecně tedy platí, že metoda λ vede k pozvolnějším brzdny křivkám, než metoda gama, neboť navíc obsahuje přírážky na nejistotu konverzního modelu.

O problematice brzdny křivek se na evropském poli diskutuje a píše již několik let [1], [2], [3]. Důsledky jejich implementace do českého prostředí se však mezi odbornou veřejností začínají více diskutovat až nyní [4], [5]. Z provedeného výzkumu vyplývá nekonzistentnost postupu. Každý ze subjektů zajímá jeho část (infrastruktura, vozidlo, ...), ale není dostatečně zkoumán celek a vzájemná interakce.

System ETCS mimo jiné také, ve své mobilní části, kontroluje, aby vlak dodržoval brzděné křivky, resp. převedeno na rychlost, aby v každý okamžik nepřekročil aktuální povolenou rychlost. Tyto brzděné křivky byly v Baseline 2 vytvořeny velmi opatrně, pro pozvolné dojíždění k místu zastavení (k místu snížení rychlosti). To samozřejmě přináší řadu nevýhod. Způsob a zvyklosti brzdění jsou v každé zemi jiné a navíc je v každé zemi jiná vazba na infrastrukturu (např. problematika prokluzových neboli pojistných úseků). Jednotná není ani brzdicí schopnost vozidel. V zemích s PZB jsou výhradně provozována vozidla schopná zastavit z rychlosti 160 km/h na zábrzděné vzdálenosti 1 000 m na sklonu 12,5 promile (208 ‰), v ČR je postačující zastavit z rychlosti 120 km/h na 1 000 m a z rychlosti 160 km/h na 2 000 m a ani to některé vlaky (lokomotiva plus málo osobních vozů) nesplňují. Mnohá vozidla, v minulosti vyráběná a dodnes používaná v ČR (lokomotivy, trakční vozy, trakční jednotky, osobní vozy, ...), jsou výrazně méně brzděna, než například vozidla v Rakousku a Německu. Je proto zřejmé, že brzděné křivky vlaků sestavených z těchto vozidel budou velmi ploché, neboť jejich brzdy jsou málo účinné.

Určitým posunem v oblasti brzděných křivek ETCS je přechod k Baseline 3. Prakticky to znamená přechod od národních zvyklostí, tedy od měkkého popisu, k tvrdému popisu pomocí matematických vzorců. Tento matematický aparát je uveden v literatuře [6]. Jedná se především o výpočet brzděného zpomalení vlaku, který je veden pod dohledem ETCS. K určité simulaci nebo spíše vizualizaci tohoto postupu vznikl také nástroj, který je popsán v literatuře [7], [8]. Zde je možné po zadání základních charakteristik vlaku (brzdicí procento, režim brzdy, ...) vypočítat brzděnou dráhu a zpomalení v každém okamžiku brzdění. Pro výpočet je třeba zadat určité údaje o dopravní infrastruktuře (sklonové poměry, prokluz, místa bez trakce, snížená adheze, ...). Dále je možné zadat polohy balíz ETCS kvůli přesnosti odometrie. Výsledkem je pak brzděná křivka, kterou musí vlak pod dohledem ETCS dodržovat. V následující části článku jsou popsána kritická místa, která tento matematický model obsahuje.

1.1 Náběh brzdy

V textu literatury [6] je uveden přesný výpočet náběhu obou druhů brzdy (provozní i nouzová) pro různé druhy a délky vlaků. Zajímavostí, která z těchto vzorců vyplývá, je, že existuje poměrně široká skupina vlaků ($L \leq 124$ metrů), u které by náběh nouzové brzdy trval déle než náběh provozní brzdy. Matematické vyjádření náběhu nouzové brzdy je vyjádřeno ve vztahu 2.1 a 2.2.

$$t_e = 2,3 + 0,17 \cdot \left(\frac{400}{100}\right)^2 ; \forall L(0; 400) \quad (2.1)$$

$$t_e = 2,3 + 0,17 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 ; \forall L(400; 1000) \quad (2.2)$$

Pro náběh provozní brzdy už ale neplatí omezení minimální délkou vlaku 400 m a proto se její náběh vypočítá podle vztahu 2.3.

$$t_e = 3 + 1,5 \cdot \left(\frac{L}{100}\right) + 0,1 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad (2.3)$$

Uvedená délka odpovídá např. jednotkám Regio Panter, City Elefant či rychlíku se čtyřmi vozy.

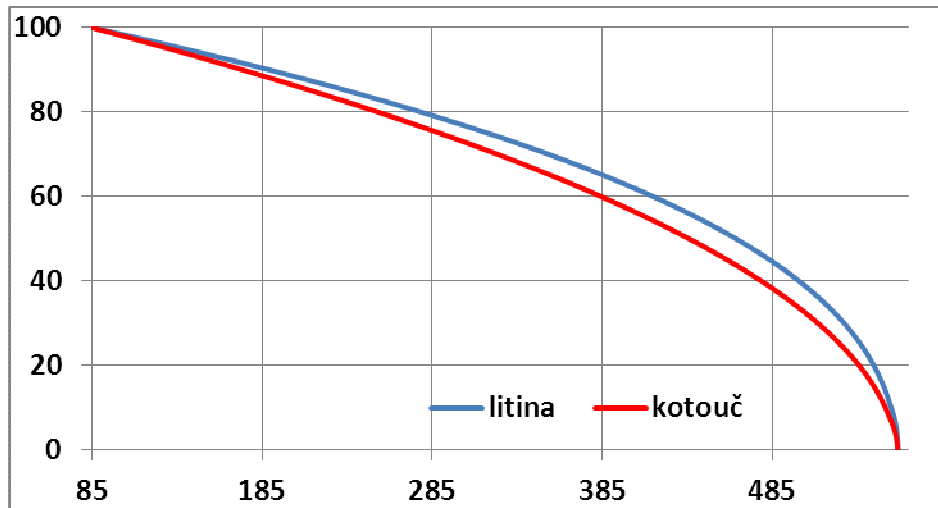
1.2 Špalíkové brzdy

Dalším problematickým místem [6] brzdných křivek ETCS je jejich nutná modifikace pro vozidla se špalíkovou brzdou, která jsou brzděna v režimu P, tedy bez možnosti zvýšení přítlaku brzdových špalíků na kola. Těchto vozidel na síti SŽDC není mnoho a není přepokládán ani jejich masivní provoz na osobních vlacích pod dohledem ETCS, ale ze systémového pohledu je to kritické místo. Navíc pro nákladní dopravu je špalíková brzda stále běžně používaným typem brzdy. Průběh brzdného zpomalení je totiž u tohoto typu brzdy jiný než u brzdy kotoučové. Neliší se ani tak brzdná dráha, jako průběh brzdného účinku. Uvedené závěry jsou zřejmé z obrázku 1, kde je zobrazen průběh závislosti rychlosti na dráze. Tyto poznatky byly zjištěny z literatury [1], [9], [10]. Nejdůležitější je zde pochopení významu a průběhu součinitele tření. Ten je závislý na přítlaku na zdrž N a také na rychlosti vlaku V . Tento součinitel byl kdysi vyjádřen empiricky na základě výzkumu (viz vztah 2.4, který znázorňuje výpočet součinitele tření pro součinitel tření mezi zdrží ze šedé litiny a ocelovým kolem). Ovšem je zřejmé, že jde jen o přibližné vyjádření, ve kterém chybí vliv materiálu a vliv teploty (doby brzdění).

$$f = 0,6 \cdot \frac{16 \cdot N + 100}{80 \cdot N + 100} \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100} \quad (2.4)$$

Více k této problematice uvádí literatura [9] na straně 15 až 17 a také literatura [10]. Výsledkem jsou velmi rozdílné hodnoty součinitele tření při vyšších a nižších rychlostech. Toto má zásadní vliv na průběh brzdného zpomalení vlaků brzděných špalíkovou brzdou. Řešením celého problému je použití kotoučových brzd, které vykazují pro všechny rychlosti v podstatě konstantní součinitel tření, podobně jako i nekovové špalíky zaváděné nyní na železnici zejména na nákladních vozech z akustických důvodů. Společnost AŽD Praha, s.r.o. právě s takovým vozidlem testuje funkčnost radioblokové centrály, proto je vhodné tuto skutečnost brát na zřetel. Současný konverzní model umožňuje řešit tento problém nastavením koeficientů brzdného zpomalení pro různé rychlosti, ale v reálu není způsob jak tyto koeficienty zadat do mobilní části ETCS.

Konečným a ideálním řešením je pak používání γ (gama) brzdných charakteristik, tak jak uvádí Ing. Pohl ze společnosti SIEMENS [1]. Tento způsob výpočtu má oproti λ (lambda) výpočtu výhodu v tom, že se nezadávají do palubní jednotky pouze brzdící procenta, ale kompletní závislost brzdného zpomalení na okamžité rychlosti vozidla. Tento výpočet je tak mnohem přesnější.



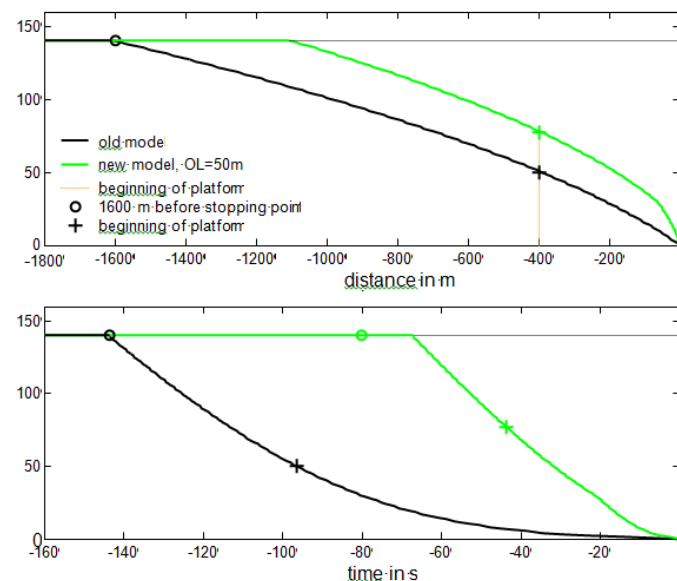
Obrázek 1 - Srovnání průběhu závislosti okamžité rychlosti na dráze pro litinový špalík a kotouč

Zdroj: Autoři

1.3 Srovnání Baseline 2 a Baseline 3

Tato otázka vyvolává ještě mnoho neznámých. Zejména z toho důvodu, že není ověřen praktický provoz hnacího vozidla vybaveného mobilní částí ETCS ve verzi Baseline 3. O složitosti problematiky přechodu jednotlivých verzí mobilní a traťové části hovoří literatura [11].

O srovnání brzdných křivek mezi oběma Baseline hovoří literatura [3], kde je uvedeno předpokládané srovnání brzdění vlaků v obou verzích. Toto srovnání je na obrázku 2. V této oblasti podnikají autoři vlastní výzkum ve spolupráci se společností AŽD Praha, s.r.o. Zatím však nejsou k dispozici srovnatelné výsledky.

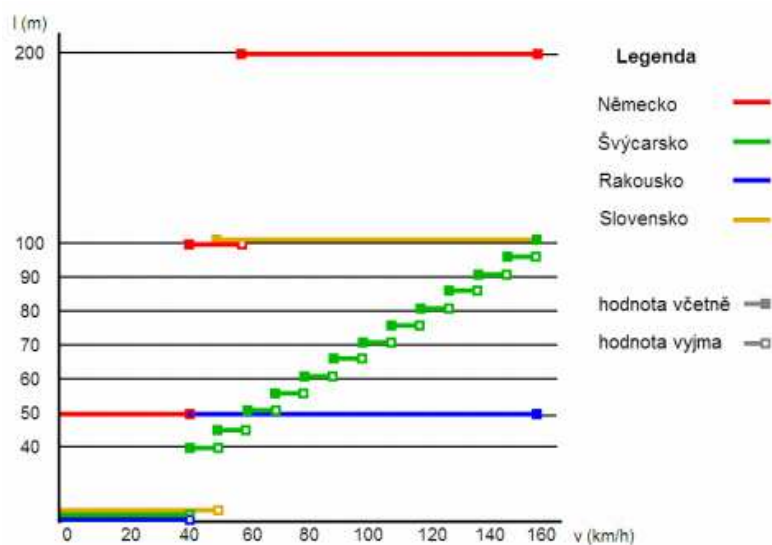


Obrázek 2 - Srovnání průběhu závislosti okamžité rychlosti na čase pro Baseline 2 (old model) a Baseline 3 (new model)

Zdroj: [3]

1.4 Prokluzové vzdálenosti

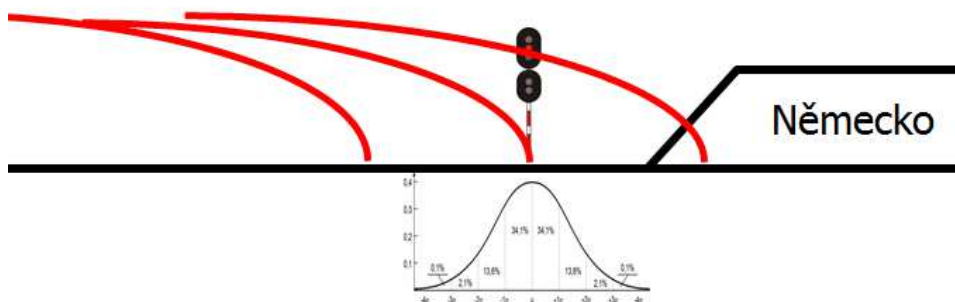
Pojem prokluzová vzdálenost je znám z železničních sítí v zemích jako je Německo, Švýcarsko, Rakousko či Slovensko. Použití této vzdálenosti je chápáno jako součást zabezpečení jízdy vlaku, kdy návěst „Stůj“ je vizuálním místem zastavení vlaku. Prokluzová vzdálenost tak vytváří prostor pro možnou situaci, kdy vozidlo před návěstí „Stůj“ nezastaví, ale projede ji. Je tak potřeba za návěstidlem vytvořit prostor (prokluzovou vzdálenost), kde bude ještě zajištěn bezpečný pohyb tohoto vozidla. Velikost této prokluzové vzdálenosti je pak dána bezpečnostními výpočty statistického rozptylu brzdění a uvádějí ji předpisy dané železniční správou. Z matematicko-fyzikálních příčin závisí na rychlosti vlaku před návěstidlem. Přehled těchto prokluzových vzdáleností byl přejat z literatury [12] a je na obrázku 3.



Obrázek 3 - Délky prokluzových vzdáleností u vybraných železnic

Zdroj: [12]

V obrázku 3 je vidět, že v Německu je tato vzdálenost při nižších rychlostech 50 metrů. V podmínkách ČR by však tato vzdálenost musela být mnohem kratší, neboť vzdálenost mezi návěstidlem a první pojížděnou výhybkou zpravidla nebývá 50 metrů. Každopádně tato vlastnost německé dopravní cesty poskytuje také výhodu při sestavování brzdných křivek ETCS. Podrobněji je tato problematika popsána pod obrázkem 4.



Obrázek 4 - Vedení vlaku s pojistným úsekem (Německo)

Zdroj: Autoři

Vlaku přijíždějícímu ke konci vlakové cesty je vygenerována brzdicí křivka k tomuto konci. Vzhledem k přesnosti odometrie a také k průběhu normálního rozdělení pravděpodobnosti se dá jeho přesné zastavení vyjádřit intervalem (mezi červenými křivkami). Interval spolehlivosti u systému ETCS je běžně volen na hodnotě 99,9999 %. Proto je také rozdíl mezi maximem a minimem poměrně značný. V případě Německa lze při použití prokluzové vzdálenosti, která rezervuje další část kolejiště pro jízdu tohoto vlaku (výhybky jsou pod závěrem, zakázané současné jízdny cesty, apod.), konstruovat tyto křivky tak, jak je naznačeno na obrázku.

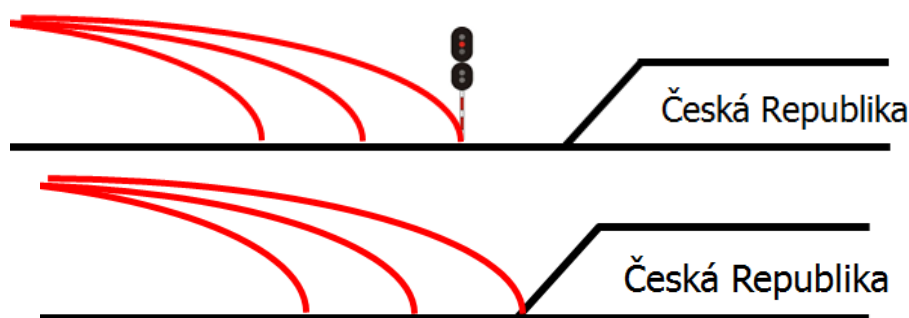
Naproti tomu v případě České republiky je nutné počítat brzděné křivky k hlavnímu návěstidlu, resp. 10 metrů před něj, což je hodnota dle předpisu SŽDC D1 (obrázek 4 nahoře). To má negativní dopad na brzdění vozidla, protože střední hodnota místa zastavení se posune směrem proti jízdě vlaku. Důsledkem toho je, že vlak bude muset zastavit o několik metrů dříve.

Tato skutečnost má hned několik negativních důsledků:

- zkrácení užitečné délky koleje,
- zastavení vlaku před koncem nástupiště, pokud toto končí u návěstidla,
- zastavení vlaku před koncem kusé koleje,
- pomalé dojíždění vlaku ke konci nástupiště (viz také obrázek 2).

K velkému posunu dojde až po konci migračního období a spuštění režimu ETCS L2 „only“, kdy už nebude možné na takové železniční dopravní cestě provozovat vozidla bez ETCS (fyzické odstranění návěstidel). V tu chvíli bude možné počítat brzděné křivky až k bodu ohrožení (Danger point; viz obrázek 5 dole). To bude mít pozitivní vliv nejen na kapacitu, ale také např. na prodloužení užitečných délek kolejí.

K eliminaci tohoto problému se jako nejvhodnější prostředek jeví vložení dodatečné balízy, která zmenší chybu odometrie a tím i zmenší interval pro místo zastavení.



Obrázek 5 - Vedení vlaku k návěstidlu (ČR)

Zdroj: Autoři

Je vidět, že řešením celé situace je opuštění stávajícího systému návěstidel a předání jejich funkce pod dohled ETCS – minimalizace migračního období. Tuto možnost nabízí ETCS L2 a L3 [4]. Další možností je změna stavební politiky naší železniční dopravní infrastruktury [5].

2 Brzdicí procenta

Pro potřeby bezpečného vedení vlaku, ať pomocí systémů automatického vedení vlaku nebo vlakového zabezpečovacího zařízení, je zapotřebí určit okamžik, kdy nejpozději je nutné začít vyvíjet brzdou sílu, aby měl vlak ve stanoveném bodě odpovídající nejvyšší dovolenou rychlost, eventuálně zastavil. Různé systémy přistupují k určování délky brzděné dráhy rozdílně a podle různých metodik. Bohužel se tyto metodiky od sebe významně liší a tím dochází i k disproporcii brzděných drah. Dále popisované metodiky vycházejí z hodnoty skutečných brzdicích procent vlaku. Ty se získávají v podmínkách české železnice ze Zprávy o brzdění vlaku. Pro Zprávy o brzdění vlaku a tím k výpočtu skutečných brzdicích procent vlaku jsou využity údaje z centrální databáze vozidel dopravce nebo z údajů uvedených na jednotlivých vozech. Výpočet skutečných brzdicích procent je proveden podle vztahu 3.1.

$$\lambda = \kappa \cdot \frac{B \cdot 100}{G} \quad [\%] \quad (3.1)$$

kde λ jsou skutečná brzdicí procenta [%],
 B je brzdicí váha vlaku [t] a
 G je hmotnost vlaku [t].

Zdroj: [2]

Výpočet dynamického rychlostního profilu mobilní části ETCS probíhá na základě statického rychlostního profilu získávaného ze stacionární části ETCS a z údajů vložených zaměstnancem obsluhujícím mobilní část, tedy strojvedoucím. Před zahájením jízdy vlaku strojvedoucí zadává do mobilní části ETCS údaje o maximální rychlosti vlaku, skutečných brzdicích procentech, délce vlaku, režimu brzdění a kategorii vlaku.

Pro výpočet dynamického rychlostního profilu ETCS jsou důležitými údaji maximální rychlost vlaku a skutečná brzdicí procenta vlaku, na jejichž základě je určována křivka profilu při snižování rychlosti. Křivka se počítá podle metodiky Evropské železniční agentury (dále jen „ERA“) a pro její určování a určování velikosti zpoždění byl ERA sestaven konverzní model [7], ve kterém je daná metodika zapracována. Na základě dat získaných z konverzního modelu lze následně určit potřebnou brzděnou dráhu vlaku.

Při současných metodách výpočtu brzdění je ovšem uvažováno s metodikou odlišnou. Výpočet brzdicí křivky vlaku se řídí Vyhláškou UIC 544-1 [13]. Vyhláška [13] k určení brzděné dráhy vychází z hodnoty skutečných brzdicích procent a odvozených koeficientů závislých na maximální rychlosti vlaku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze A této vyhlášky a brzděná dráha se určí podle vztahu 3-2. Pro potřebu ETCS (Baseline 3) byla do [13] doplněna příloha G, která řeší brzděné křivky vlaku. Autoři však bohužel nemají tuto aktuální verzi k dispozici.

$$s = \frac{C}{\lambda + D} [m] \quad (3.2)$$

kde s je brzdná dráha vlaku [m],
 C, D jsou koeficienty dle Vyhlášky UIC 544-1 přílohy A [-] a
 λ jsou skutečná brzdicí procenta vlaku [%].

Zdroj:[3]

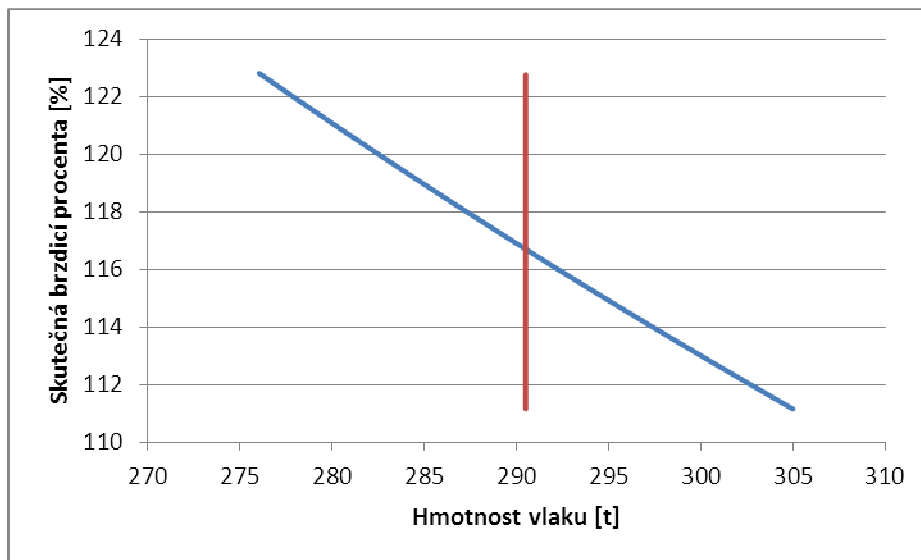
U všech vlaků osobní dopravy, vyjma vlaků kategorie soupravový vlak, je pro výpočet skutečných brzdicích procent uvažována hmotnost plně obsazeného vozu. Nelze zaručit, že vlak bude vždy plně obsazen a že nebude docházet k situaci, že ve vlaku bude více nebo méně cestujících, reálná brzdicí procenta jsou tedy odlišná od těch, která jsou uvedena ve Zprávě o brzdění. Z tohoto důvodu neodpovídá mobilní částí ETCS vypočtená křivka dynamického rychlostního profilu (dle metodiky ERA) vždy skutečným možnostem vlaku a zároveň ani brzdná křivka a brzdná dráha metodice dle UIC. Naopak u soupravových vlaků je hmotnost vlaku určena z hmotností prázdných vozů.

Lze předpokládat, že vytížení vlakových souprav vlaků osobní dopravy cestujícími je náhodnou veličinou s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Na základě této skutečnosti lze konstatovat, že větší část vlaků je obsazena přibližně z poloviny. Při zkoumání vlivu hmotnosti na brzdnou dráhu bylo tedy uvažováno s vlakem plně obsazeným, středně obsazeným a prázdným. Zároveň byla posuzována rozdílnost obou zmiňovaných metodik.

Pro srovnání metodik a vlivu hmotnosti na brzdnou dráhu byl vybrán vlak R 872 a jeho brzdná dráha do stanice Přelouč. Parametry vlaku byly následující:

- maximální rychlost $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,
- hnací vozidlo řady 362,
- složení soupravy $B^{249} + 2\cdot Bd^{264} + BDs^{450} + A^{150}$.

Průběh hmotnosti vlaku a skutečných brzdicích procent v závislosti na hmotnosti vlaku je znázorněn v grafu na obrázku 6. Modrou křivkou v grafu je znázorněn průběh hmotnosti vlaku ohraničený hodnotami plně obsazeného a prázdného vlaku a červenou křivkou hodnota středního obsazení vlaku.



Obrázek 6 - Závislost skutečných brzdicích procent vlaku na jeho hmotnosti

Zdroj: Autoři s využitím [14] a [15]

Za pomoci simulačního nástroje Open Track [16] byly na přímé trati bez oblouku vypočteny hodnoty brzdných křivek vlaku dle výše uvedených parametrů pro zastavení ve stanici Přelouč. Jednotlivým simulačním krokům byly nastaveny parametry uvedené v tabulce 1. Průběhy brzdných křivek a hodnoty brzdné dráhy jsou znázorněny v grafu na obrázku 11.

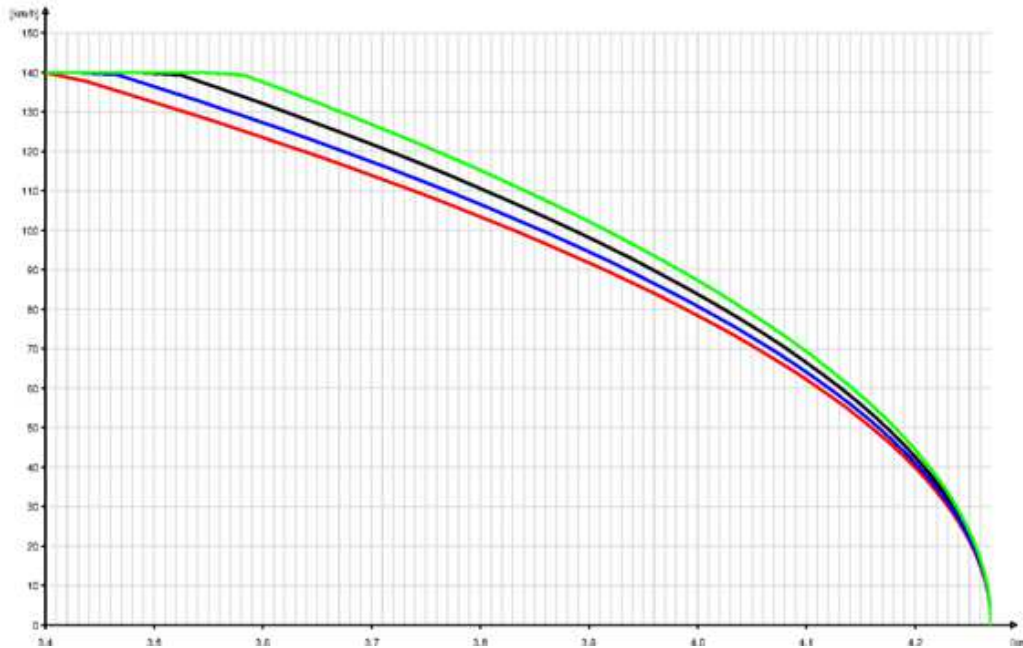
Tabulka 1 - Parametry modelu pro jednotlivé simulační kroky

Simulační krok	Hmotnost vlaku [t]	Metodika	Skutečná brzdicí procenta [%]
1	304	UIC	111
2	289	UIC	117
3	275	UIC	123
4	304	ERA	111

Zdroj: Autoři s využitím [15]

Validace a verifikace modelu sestaveného v softwaru Open Track a výsledků simulačních kroků následně proběhla jejich analytickým ověřením podle zkoumaných metodik a byla nalezena shoda výsledků. Výsledky ze simulačních kroků prezentované v grafu na obrázku 7 lze považovat za korektní. V grafu na obrázku 7 je:

- červeně znázorněna křivka vlaku pro simulační krok 1,
- modře křivka vlaku pro simulační krok 2,
- černě křivka vlaku pro simulační krok 3 a
- zeleně křivka vlaku pro simulační krok 4, tedy křivka dynamického rychlostního profilu ETCS.



Obrázek 7 - Brzdné křivky R 872 pro různé vstupní parametry

Zdroj: Autoři s využitím softwaru Open Track

Z grafu na obrázku 7 vyplývá, že brzdné dráhy zkoumaného vlaku se pohybují v intervalu 870 m (simulační krok 1) až 695 m (simulační krok 4). Při stejných vstupních hodnotách je tedy rozdíl brzdných drah při využití metodiky UIC a metodiky ERA 175 m. Pokud se provede porovnání brzdných drah počítaných metodikou UIC při různých hmotnostech vlaku, pak je rozdíl v brzdné dráze plně obsazeného a prázdného vlaku 125 m v neprospěch plně obsazeného vlaku.

Strojvedoucí při zastavování vlaku i při plynulém brzdění mění tlak v brzdovém potrubí podle aktuální jízdy. Na rozdíl od zkoumaných případů, kdy se uvažuje se skokovým poklesem tlaku a tím k rychlému nástupu brzdícího účinku a s tím, že po celou dobu brzdění je brzdící účinek konstantní.

To je dáno skutečností, že na rozdíl od výpočtu, který řeší diferenciální rovnici brzdění vlaku pozpátku od bodu k zastavení k jízdě plnou rychlostí, strojvedoucí tuto možnost nemá a brzdí pro jistotu mnohem dříve a pozvolněji, aby zvládnul správně zastavit v místě zastavení. Toto tvrzení dokumentují i zkoumané záznamy z tachogramů vlaku [13] v různých dnech, které byly poskytnuty Českými drahami, a.s. Jak matematické modely obou metodik, tak i simulační model počítají s velmi intenzivním brzděním na základě zadaných parametrů, ve skutečnosti ale strojvedoucí brzdí s výrazným předstihem s přihlédnutím k aktuální provozní situaci. Brzdné dráhy vlaku podle tachogramů se pohybují v rozmezí 1 100 – 1 400 m. Navíc lze z průběhů brzdných křivek odvodit předpoklad, zda v daný den vlak jel včas, s náskokem nebo zpožděný. Nicméně i při nejstrmější zkoumané brzdné křivce není dosahováno brzdných křivek, které byly namodelovány podle obou metodik. To znamená, že ETCS ve spojení s funkcí systému automatického vedení vlaku, dokáže vlak rychleji zastavit, než obvykle strojvedoucí praktikují. To je další významný zdroj úspor jízdních dob, respektive energie (bude-li úspora času využita k výběhu, nebo k pozvolnému brzdění elektrodynamickou rekuperační brzdou).

Závěr

Problematika brzdných křivek je velmi živá a stále se vyvíjí. V rámci UIC existuje pracovní skupina, která se zabývá jejich dalším vývojem. Bylo by vhodné se této aktivitě více věnovat tak, aby byly výsledné brzdné křivky, které se budou implementovat do mobilní části ETCS co nejlíže realitě a aby nesnižovaly kapacitu dráhy. Problematikou kapacity dráhy a vlivem ETCS na časové prvky jízdního řádu se zabývá článek Přínosy ETCS z pohledu kapacity dráhy.

Metodiky UIC i ERA používané pro výpočet brzdné dráhy vlaku, uvažují vždy s intenzivním brzděním vycházejícím z maximálního možného brzdného účinku daného vlaku. K tomuto stavu ovšem v praxi nedochází a lze jej přirovnat k užití nouzové brzdy. Jelikož se zavedení systému ETCS předpokládá především na vybraných tratích spadajících do drah celostátních, je vliv hmotnosti vlaku osobní dopravy (plně obsazený nebo prázdný) v porovnání s dosahovanou rychlostí vlaků a možnou prodlevou v počátku brzdění zanedbatelný, ač vlak může za onu dobu urazit na první pohled nemalou vzdálenost.

V tomto příspěvku je uvedeno několik míst, kterým je nutné se věnovat při dalším vývoji brzdných křivek ETCS, aby nedocházelo ke zbytečnému snižování kapacity dráhy. Řada z těchto problémů bude také vyžadovat simulaci či spíše provozní testy, aby byla ověřena správná funkčnost mobilní části systému ETCS. Je dobré, že se tomuto tématu věnuje několik odborníků z různých subjektů i zaměření (VÚŽ, SIEMENS, AŽD, či Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice).

Použitá literatura

- [1] POHL, J.: *Problematika brzdění vozidel*. 10. 4 2015.
- [2] PRESCIANI, P., MALVEZZI, M., BONACCI, G., L., BALLI, M.: *Development of a Braking Model for Speed Supervision Systems*. Railway Research. [Online] [Citace: 22. 6 2015.] <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/172.pdf>.
- [3] GRÖPLER, O.: *Braking curves and models for ETCS*. Minden, 2010.
- [4] KLEGA, M.: *Technické požadavky pro implementaci ERTMS/ETCS L2 na české části Koridoru E*. Správa železniční dopravní cesty, s.o. [Online] [Citace: 22. 6 2015.] www.szdc.cz/soubory/ertms/technicke-pozadavky.doc.
- [5] *Zavádění systému ETCS na tratích v ČR*. Správa železniční dopravní cesty, s.o. [Online] 2012. [Citace: 22. 6 2015.] <http://www.szdc.cz/soubory/konference-a-seminare/zdc-2012/a06-klega-szdc.pdf>.
- [6] *ETCS baseline 3 specifications Subset 026*. European Railway Agency. [Online] [Citace: 22. 6 2015.] <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.
- [7] *Braking curves Simulation tool*. European Railway Agency. [Online] [Citace: 22. 6 2015.] <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Braking-Curves-Simulation-Tool.aspx>.

- [8] *Introduction to ETCS braking curves*. European Railway Agency. [Online] 20. 6 2012. [Citace: 26. 5 2014.] <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Braking-curves---Introduction.aspx>.
- [9] HRUŠOVSKÝ, J.: *Brzdy hnacích vozidel ČSD I.díl - lokomotivy*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1972. 31-065-72.
- [10] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOUHOUT, M. *Mechanika dopravy*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. 978-80-7395-739-1.
- [11] MAREK, J.: Informace z UNISIG, aktuální stav specifikací a další rozvoj ETCS. ACRI. [Online] 2. 6 2015. [Citace: 23. 6 2015.] http://www.acri.cz/uploads/acri-akademie/15-06%20ETCS/2015_ETCS_Marek.pdf.
- [12] FIALA, L.: *Provozní dopady aplikace ochranných vzdáleností podle TNŽ 34 2620*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. diplomová práce.
- [13] *Bremse - Bremsleitung*. Bruxelles: UIC, 2004. 2-7461-0773-2.
- [14] *SŽDC D1. Dopravní a návěsní předpis*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, s. o., 2013. Ve znění změny č. 2.
- [15] *Interní materiály. Pomůcky jízdního řádu 2014/2015*. Praha: Správa železniční dopravní cesty, s. o., 2014.
- [16] HÜRLIMANN, D.: *Open Track: Betriebssimulation von Eisenbahnnetzen*. Zürich: ETH, 2003.
- [17] *Interní materiály. Výpisy z tachogramů hnacích vozidel*. Praha: ČD, a.s., 2014.
- [18] *ETCS baseline 3 specifications Subset 023*. European Railway Agency. [Online] [Citace: 22. 6 2015.] <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.

Praha, říjen 2015

Lektorovali: Ing. Rudolf Mrzena, Ph.D.
SŽDC, s.o.

Ing. Bohumil Drápal
VUZ, a.s.