

Jakub Marek<sup>1</sup>

## Brzdňý model ERTMS/ETCS a možnosti jeho optimalizace na úrovni aplikace

**Klíčová slova:** železniční zabezpečovací technika, VZZ, kontrola rychlosti, brzdňý model, brzdňé křivky, brzdící procenta, dohledové limity, korekční faktory, ERTMS, ETCS, jednotňý evropský železniční prostor (SERA)

### Úvod

Aktuálně probíhá rozsáhlá implementace systému ERTMS, resp. jeho subsystému vlakového zabezpečovače ETCS na tratích v ČR. Více o této implementaci lze nalézt například v předminulém vydání Vědeckotechnického sborníku ČD (č. 45/2018) v příspěvku s názvem „ERTMS jakožto nedílná součást řízení a zabezpečení moderní železnice v České republice“. Systém ERTMS/ETCS (dále jen ETCS) je vlakový zabezpečovací systém s kontrolou rychlosti, což je velký přínos pro ČR, jakož i pro ostatní státy, které nedisponují VZZ s kontrolou rychlosti. Nadto má být dle politiky EU (viz kupř. technický pilř 4. železničního balíčku, 4<sup>th</sup> Railway Package) v budoucnu jediným vlakovým zabezpečovacím systémem, který se bude nadále používat. Tímto má systém ETCS přispět k propojitelnosti železniční sítě v rámci jednotného evropského železničního prostoru SERA (z angl. *Single European Railway Area*).

Z pohledu tohoto článku je ovšem podstatné, že jde o systém, který v základním stavu bezpečně a úplně dohlíží, že skutečná rychlost jízdy vlaku nepřekročí v žádném místě trati povolené limity (rychlost v dané poloze). „Úplně dohlíží“ znamená, že systém ETCS dohlíží nejen na nepřekračování dovolené rychlosti (v případě dohlížení konstantní rychlosti), ale také na průběh snižování rychlosti při brzdění k cíli. Pro tento druhý účel si systém ETCS vytváří na základě dynamických vlastností vlaku brzdňý model, což je vlastně představa tohoto systému o tom, jak se bude vlak chovat poté, co vydá povel k brzdění. Cílem je definovat zásahové polohy (místa) tak, aby vlak v každém místě trati dodržel povolenou rychlost jízdy. Je zřejmé, že se tato představa musí (ideálně) jen s malou rezervou shodovat se skutečným chováním vlaku, aby dohled nad jízdou vlaku byl bezpečný a současně aby příliš neomezoval železniční provoz jako takový.

Vzhledem k tomu, že systém ETCS je vlakový zabezpečovací systém, není divu, že brzdňý model, který používá, je v základním (defaultním) stavu konstruovaný/

---

<sup>1</sup> Ing. Jakub Marek, Ph.D. (\*1984), odborné zaměření: železniční zabezpečovací technika, ERTMS, ETCS; pracoviště: AŽD Praha s.r.o., Žirovnická 3146/2, Záběhllice, 106 00 Praha 10, závod Technika, Výzkum a vývoj, pracoviště VP13 (VZ ETCS); zástupce AŽD Praha s.r.o. v pracovní skupině UNISIG SG, která tvoří technické specifikace ERTMS/ETCS, e-mail: [marek.jakub@azd.cz](mailto:marek.jakub@azd.cz); vzdělání: Dopravní prostředky a infrastruktura – Elektrotechnická zařízení v dopravě (2006 Bc., 2008 Ing., 2014 Ph.D.); Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Studentská 95, 532 10 Pardubice.

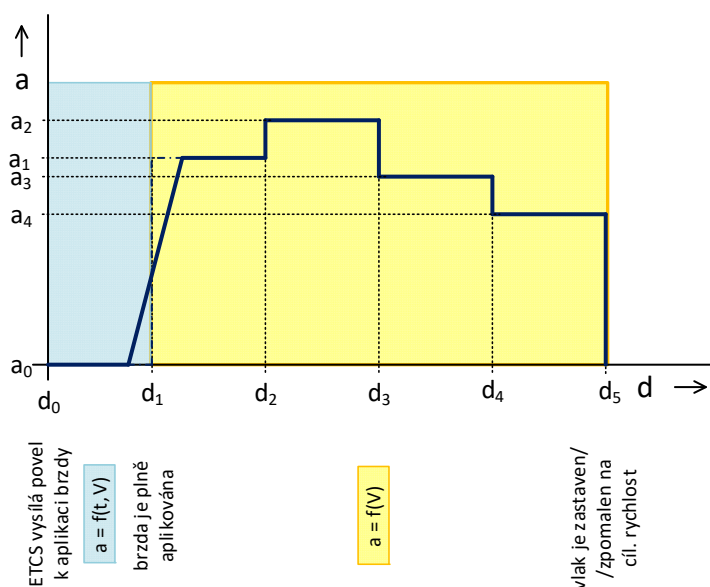
nastavený v souladu s principy zabezpečovací techniky, tedy více restriktivně, aby vyhověl konkrétním nastavením v různých státech EU, což – jak se ukazuje – má v konečném důsledku již zmíněný negativní dopad na propustnou výkonnost železničních tratí. Cílem tohoto článku je nastínit možnosti, jak si může správce infrastruktury přizpůsobit brzdňý model ETCS, tak aby jej stále bylo možno (z hlediska platné legislativy) považovat za bezpečný a současně aby příliš neomezoval jízdu vlaků pod dohledem ETCS.

Zde je třeba zdůraznit skutečnost, že tento článek se zabývá pouze vlaky s mobilní částí ETCS mající harmonizovaný brzdňý model (tedy odpovídající specifikacím Baseline 3, resp. Baseline 2, ale implementující brzdňý model dle Baseline 3)<sup>2</sup>.

## 1 Brzdňý model ETCS

Jak již bylo uvedeno, brzdňý model vytváří představu systému ETCS o tom, jak by se vlak byl býval choval, kdyby tento systém vydal povel k brzdění, a to v kterémkoli místě trati. Tato představa se používá v rámci dohledu rychlosti jízdy vlaku.

Při prvním přiblížení můžeme říci, že tato představa je v základním stavu popsána průběhem odrychlení (daným dosažitelným brzdícím účinkem brzdy, resp. působící brzdňé síly) v závislosti na dráze, a to počínaje od místa, ve kterém by byl vydán povel k brzdění, až do okamžiku dosažení cílové rychlosti, resp. zastavení. Graficky toto znázorňuje obrázek 1. Z tohoto obrázku je vidět, že úplné odrychlení není u pneumatické brzdy nepřímocínné (samočínné), což je základní brzda železničňých vozidel (dále jen brzda UIC), dostupné ihned po vydání povelu, nýbrž s určitým časovým zpožděním. Model se proto skládá ze dvou částí. První z nich vyjadřuje závislost brzdňého odrychlení na čase, druhá pak na okamžitě rychlosti vlaku.



Obrázek 1: Obecný brzdňý model; Zdroj: Autor

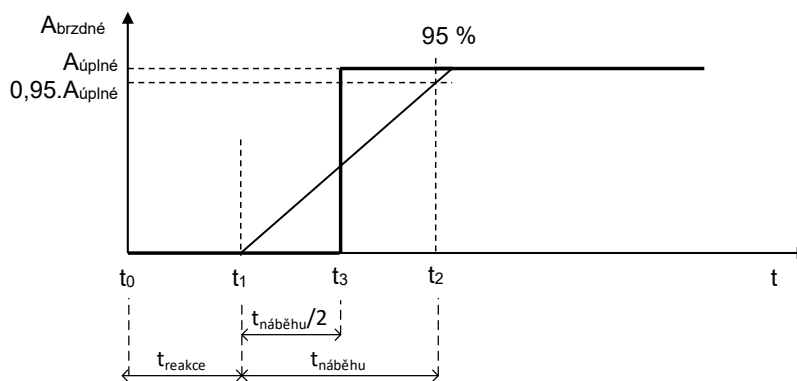
<sup>2</sup> Baseline 3 = TSI CCS, příloha A, sada specifikací #3, resp. #2; Baseline 2 = sada specifikací #1.

První část modelu popisuje proces postupného vývinu brzdné síly, označovaného také jako náběh brzdy, je závislá primárně na čase. Jedná se o čas potřebný k vyvinutí úplného brzdícího účinku vlaku (na obr. 1 je vyznačená světle modrou barvou). Druhá část pak zachycuje průběh odrychlení v závislosti na okamžité rychlosti vlaku při brzdění s již úplně vyvinutým brzdícím účinkem (na obr. 1 je vyznačená žlutou barvou). Blíže se těmito dvěma částmi zabývají následující podkapitoly (viz kap. 1.1 a 1.2). Obě tyto části modelu je pak v ETCS možno traťovou částí ETCS, resp. správcem infrastruktury ovlivňovat prostřednictvím integrovaných korekčních faktorů (o nich blíže pojednává kapitola 2).

### 1.1 Model náběhu brzdy

Jedná se o první část brzdného modelu ETCS zohledňující skutečnost, že po vydání povelu k brzdění není úplné odrychlení dostupné ihned, nýbrž trvá určitou dobu, než dojde k vývinu úplné brzdné síly, a tedy i souvisejícího odrychlení. Toto zpoždění je dáno součtem doby reakce (průtahu) brzdy a poloviny doby vývinu (náběhu) úplné (95%) brzdné síly (viz obr. 2).

Výše popsané zpoždění je způsobeno vlastnostmi a činnostmi brzdy UIC, která pracuje na principu ovládání mechanických třecích brzd na jednotlivých vozech změnou tlaku v hlavním průběžném potrubí. Tato se navíc šíří tímto potrubím konečnou, tzv. průraznou rychlostí (obvykle mezi 250 až 280 m.s<sup>-1</sup>), pročež nárůst účinku jednotlivých brzd se uměle snižuje, aby nedocházelo k nadměrným dynamickým rázům způsobeným tím, že začátek vlaku již brzdí (např. u dlouhého vlaku i úplnou brzdou silou), zatímco konec vlaku ještě nemusí brzdit vůbec.



Obrázek 2: Časový průběh náběhu brzdy; Zdroj: [1] + autor

Na obrázku 2 je naznačeno, že po vydání povelu k brzdění (okamžik  $t_0$ ) se začne zvyšovat brzdná síla (zde vyjádřená brzdným odrychlením) až v čase  $t_1$  (kdy  $F_b > 0$ ). V čase  $t_2$  pak dosáhne 95 % úplného brzdného odrychlení (tedy  $0,95 \cdot F_{b,max}$ ) [1]. Pro účely výpočtu brzdných křivek se v ETCS používá aproximace, která říká, že se tento (ve skutečnosti nelineární) průběh nahradí skokovou funkcí, která předpokládá, že až do okamžiku  $t_3$  vlak nebrzdí vůbec (zatímco ve skutečnosti již brzdí), a od okamžiku  $t_3$  vlak již brzdí (pro danou rychlost) úplným (95%) brzdným odrychlením<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Aproximace (bezpečnějším směrem) uvažuje, že vlak delší dobu nebrzdí, a tedy ujede delší dráhu.

Tuto funkci je možno, položíme-li referenční 0 do okamžiku  $t_0$ , popsat následovně:

$$t_3 = t_1 + (t_2 - t_1)/2, \text{ resp. } t_{\text{reakce}} + t_{\text{náběhu}}/2 \text{ [s; s]} \quad (1)$$

kde  $t_{\text{reakce}}$  = doba reakce brzdy [s]  
 $t_{\text{náběhu}}$  = doba náběhu brzdy, tj. vyvinutí 95 % úplné brzdě síly  $F_b$  [s]

Doba  $t_3$  se obecně označuje jako ekvivalentní doba náběhu brzdy (dále jen doba náběhu brzdy) a je závislá na druhu vlaku (osobní/nákladní), jeho délce [m] a režimu brzdění (resp. poloze přestavovače: R + Mg, R, P; G).

Není-li známa doba  $t_3$  z konfigurace mobilní části ETCS, použije se pro její výpočet v ETCS tzv. „konverzní model“ (viz též kap. 1.4), který využívá následující kvadratické funkce:

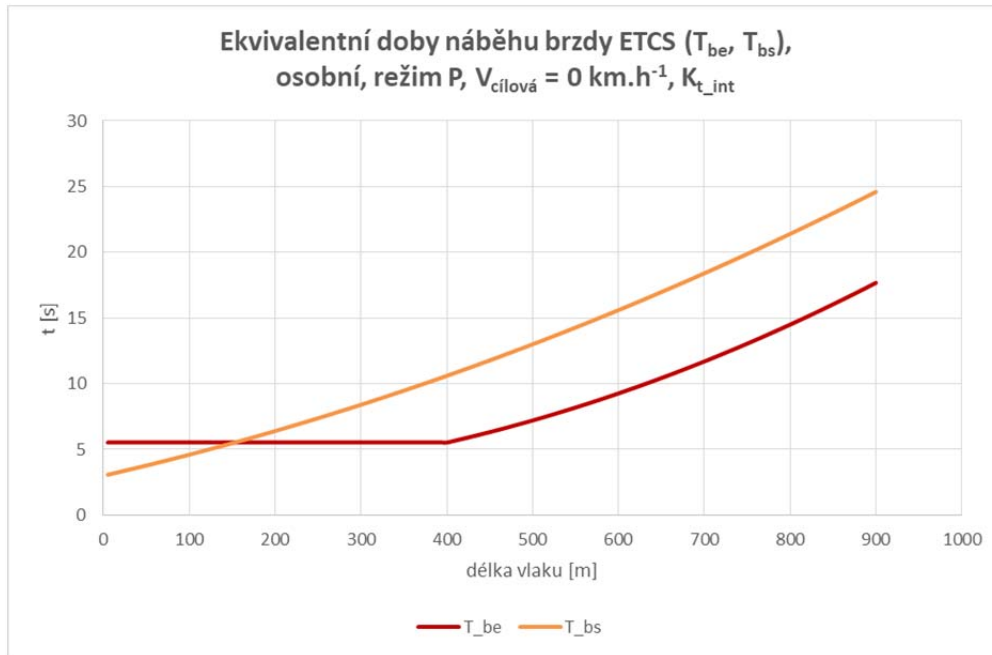
$$t_3 = a.(L/100)^0 + b.(L/100)^1 + c.(L/100)^2 \text{ [s; m]} \quad (2)$$

kde  $L$  ... délka vlaku [m] – pozn. pro některé vlaky se použije maximum z konstanty a skutečné délky vlaku,  
 $a, b, c$  ... koeficienty závislé na druhu, popř. i délce vlaku a poloze přestavovače režimu brzdění.

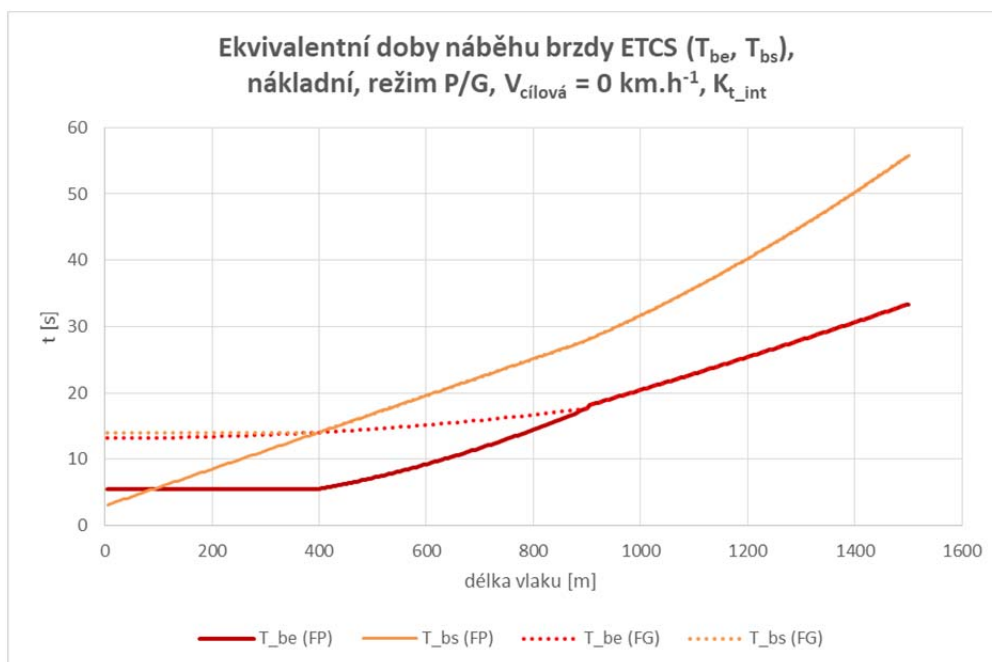
V ETCS se rozlišuje doba náběhu brzdy  $t_3$  pro:

- úplné provozní brzdění, kdy dojde k řízenému snížení tlaku hlavního potrubí z hodnoty odpovídající úplnému odbrzdění na hodnotu odpovídající úplnému provoznímu zabrzdění – tato doba se označuje jako  $T_{bs}$  (brake service),
- nouzové (rychločinné) brzdění, kdy dojde k náhlému úplnému odvětrání hlavního potrubí, a tedy i k rychlejšímu nástupu brzdícího účinku – tato doba se označuje jako  $T_{be}$  (brake emergency).

Obě tyto doby jsou navíc funkcí cílové rychlosti. Obrázky 3 a 4 dávají představu takto vypočítaných dob. Výsledná doba  $T_{be}$  je dále ovlivňována korekčním faktorem  $K_{t\_int}$ . Na obrázcích jsou použity defaultní hodnoty tohoto faktoru (více viz kap. 2.2).



Obrázek 3: Závislosti dob  $T_{be}$  a  $T_{bs}$  pro osobní vlaky v režimu P (PP) na délce vlaku (defaultní model); Zdroj: Autor

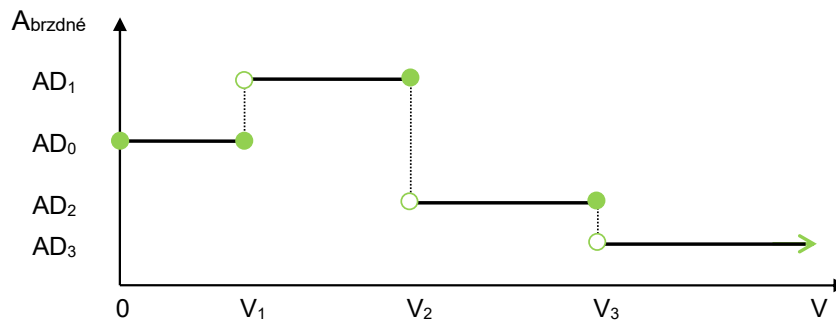


Obrázek 4: Závislosti dob  $T_{be}$  a  $T_{bs}$  pro nákladní vlaky v režimu P (FP) a G (FG) na délce vlaku (defaultní model); Zdroj: Autor

Jinými slovy doby zobrazené na obr. 3 a 4 představují s ohledem na brzdňý model ETCS časy, po které ETCS počítá s tím, že příslušné brzdňé odrychlení je nulové. Následně v tomto zjednodušeném přiblížení začne vlak po uplynutí této doby snižovat rychlost dle brzdňého odrychlení, které je dáno modelem odrychlení v závislosti na okamžité rychlosti vlaku, který je popsán v následující podkapitole (viz kap. 1.2).

### 1.2 Model brzdného odrychlení v závislosti na rychlosti

Okamžitá brzdná síla  $F_b$  je obecně při brzdění funkcí okamžité rychlosti jízdy vlaku. Tuto skutečnost reflektuje druhá část brzdného modelu ETCS (viz např. obr. 5). Tento je realizován funkcí, která zachycuje/popisuje průběh brzdné síly (zde opět vyjádřené brzdným odrychlením  $A_{brzdné}$ , tentokrátě však již úplně naběhlé brzdy) v závislosti na okamžité rychlosti jízdy vlaku.



Obrázek 5: Model brzdného odrychlení v závislosti na rychlosti; Zdroj: [1] + autor

Jedná se o skokovou funkci, kdy pro daný rozsah rychlostí je brzdné odrychlení považováno za konstantní. Dle specifikací ETCS může mít až 7 kroků. Způsob, jak určit rozsahy rychlostí, stanovuje norma [2], která mimo jiné předepisuje, že skutečná změna brzdného odrychlení nemá v rámci daného rozsahu rychlostí přesáhnout hodnotu  $0,15 \text{ m.s}^{-2}$ . Přesáhne-li ji, je třeba vytvořit další rozsah rychlostí a změnit hodnotu brzdného odrychlení.

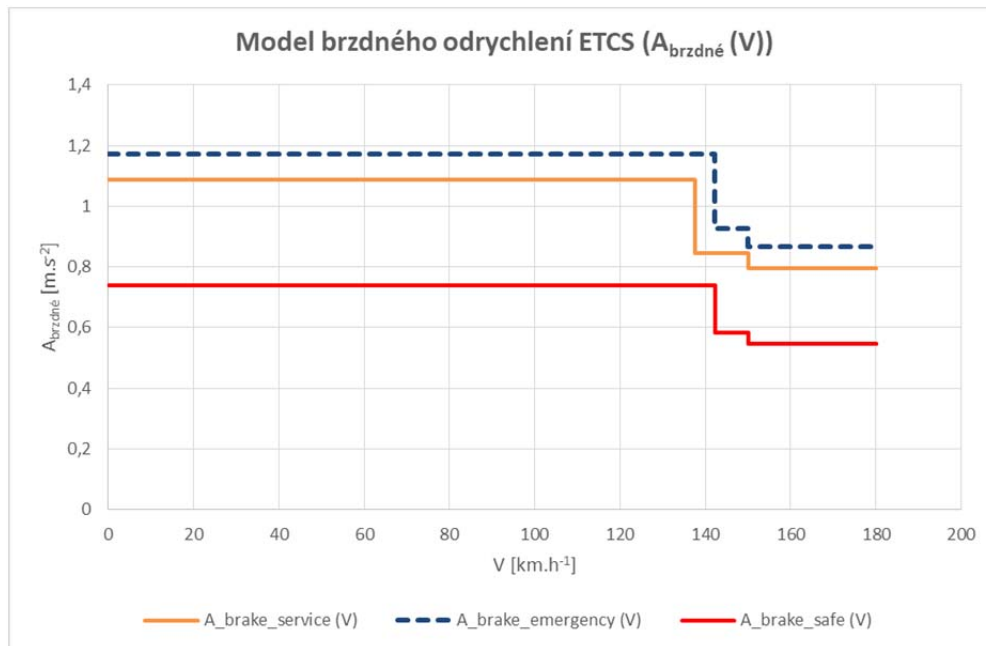
Není-li tato funkce známá z konfigurace mobilní části ETCS, je třeba použít tzv. „konverzní model“ (viz též kap. 1.4), a tuto funkci odvodit ze zadaných brzdících procent vlaku  $\lambda$ . Zde pak ETCS nabízí 6 kroků odrychlení, jejichž počet může být zredukován v závislosti na prahové hodnotě rychlosti  $V_{lim}$ . Tato hodnota určuje první rychlostní rozsah s konstantním odrychlením (tj.  $0 \text{ km.h}^{-1}$  až  $V_{lim}$ ). Až po prahovou hodnotu  $V_{lim}$  je výsledné odrychlení přímo úměrné brzdícím procentům  $\lambda$  a roste jen s velmi malou strmostí. Pro vyšší hodnoty okamžité rychlosti je jejich kubickou funkcí:

$$A_{brzdné} = a_3 \cdot \lambda_0^3 + a_2 \cdot \lambda_0^2 + a_1 \cdot \lambda_0^1 + a_0 \cdot \lambda_0^0 \text{ [m.s}^{-2}\text{; br. \%]} \quad (3)$$

kde  $\lambda$ , resp.  $\lambda_0 \dots$  brzdící procenta  $\lambda$  [%], resp. brzdící procenta  $\lambda_0$ , která jsou pro provozní brzdu omezena na maximální hodnotu 135 %,  
 $a_3, a_2, a_1, a_0 \dots$  koeficienty závisející na hodnotě okamžité rychlosti (platí vždy pro určitý rychlostní rozsah).

V ETCS se rozlišuje brzdné odrychlení  $A_{brzdné}$  pro:

- úplné provozní brzdění – označuje se jako  $A_{brake-service}$ ,
- nouzové (rychločinné) brzdění – označuje se jako  $A_{brake-emergency}$ .



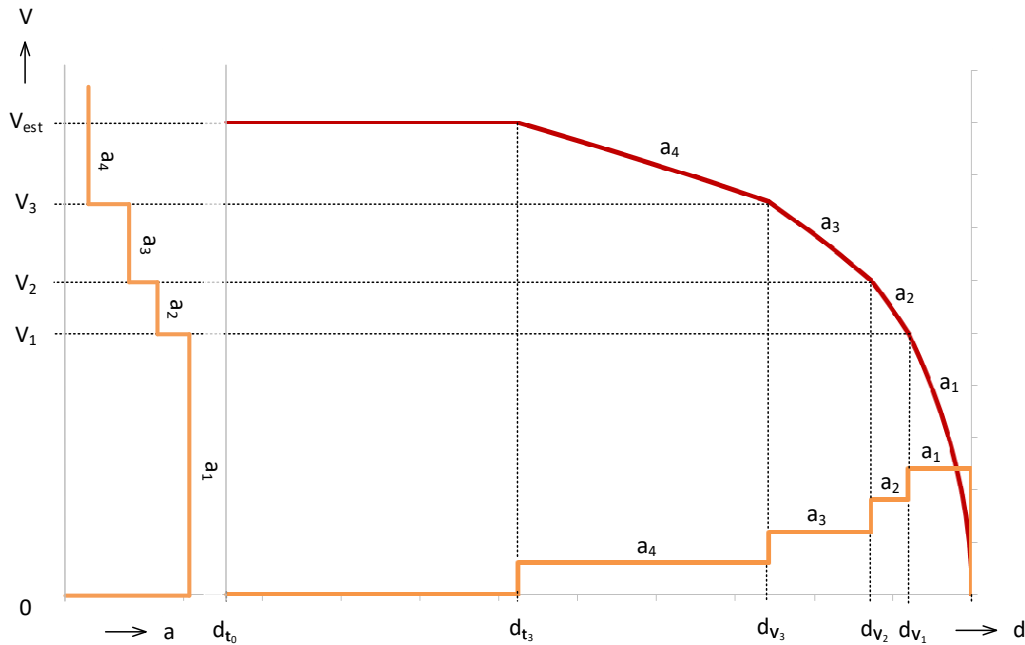
Obrázek 6: Ukázka modelu brzdného odrychlení v závislosti na rychlosti; Zdroj: Autor

Na obrázku 6 je zachycen model brzdného odrychlení platný například pro elektrickou motorovou jednotku řady 471/971, resp. pro vlak/soupravu mající  $\lambda = 146$  %. Konkrétně zachycuje odrychlení dané úplným provozním brzděním ( $A_{\text{brake-service}}$ ), tak i nouzovým brzděním. Nouzové brzdění je zde reprezentované jak nominální hodnotou brzdného odrychlení ( $A_{\text{brake-emergency}}$ ), tak i jeho defaultní hodnotou ( $A_{\text{brake-safe}}$ ). Dále je z obrázku 6 vidět, že brzdné odrychlení úplné provozní brzdy ( $A_{\text{brake-service}}$ ) je nižší než brzdné odrychlení nouzové brzdy ( $A_{\text{brake-emergency}}$ ), což – doplníme – dle konverzního modelu ETCS platí pro vlaky mající  $\lambda > 135$  %. Pro vlaky s nižšími brzdícími procenty je (nominální) brzdné odrychlení nouzové brzdy  $A_{\text{brake-emergency}}$  považováno za shodné s odrychlením úplné provozní brzdy  $A_{\text{brake-service}}$ .

### 1.3 Brzdny model obecný v závislosti na dráze

Při znalosti okamžité rychlosti a okamžitého zrychlení vlaku lze aplikací zákonitostí platných pro rovnoměrný, resp. rovnoměrně zrychlený/zpomalený pohyb oba dva modely uvedené výše (kap. 1.1 a 1.2) vynést do stejného grafu, a získat tak závislost brzdného odrychlení na dráze (viz obr. 8, osu x pravého grafu), popř. na čase. Stejně tak to může dělat mobilní část ETCS, stejně tak to dělá nástroj, který si autor tohoto článku vytvořil pro modelování brzdných křivek a výpočet dohledových limitů ETCS.





Obrázek 7: Brzdný model obecný, ETCS (vč. znázornění předpokládaného průběhu rychlosti v závislosti na ujeté dráze); Zdroj: Autor

Zde je třeba zdůraznit skutečnost, že obrázek 7 zobrazuje pouze první přiblížení brzdného modelu ETCS, které je výhradně založené na vlastnostech soupravy železničních vozidel s brzdou UIC. Průběh výsledného odrychlení vlaku může dále ovlivňovat použití speciálních brzd, jako je např. magnetická kolejnicová brzda, vířivoproudá brzda, anebo elektrodynamická rekuperační brzda, což je dovoleno u určité skupiny vlaků. Dále je třeba zohlednit změny odrychlení vyvolané vnějšími podmínkami. Těmi může být – a velmi často také je – odrychlení dané sklonem trati, případně oznámenou oblastí se sníženými adhezními podmínkami (mezi kolem a kolejnicí), anebo úsekem trati, který smí být pojížděn pouze pod podmínkou vypnutí vyjmenovaných speciálních brzd (pouze pokud byly jejich účinky zohledněny v hodnotě brzdného odrychlení). Všechny tyto aspekty dále fragmentují průběh výsledného odrychlení v závislosti na dráze, resp. čase, a činí tak výsledný brzdný model ještě komplexnější.

#### 1.4 Způsoby získání brzdného modelu

Pro realizaci dohledu rychlosti vlaku potřebuje mít mobilní část ETCS k dispozici výše popsany brzdný model (viz obr. 1, tedy model složený jak z modelu náběhu brzdy, tak z modelu odrychlení v závislosti na rychlosti). Tento si může vypočítat s použitím tzv. „konverzního modelu“, a to na základě strojvedoucím zadaných brzdících procent, délky a typu vlaku (který je v tomto případě dán druhem vlaku (osobní/nákladní) a polohou přestavovače režimu brzdění (P/G)), anebo jej může přímo získat z vlakových dat. Existují tedy tyto dva způsoby:

1. obdrží jej *přímo z vlakových dat* – pokud mobilní část ETCS získává brzdný model výhradně tímto způsobem, lze hovořit o tzv. *gamma vlaku*.



2. vypočítá si jej s použitím konverzního modelu – pokud mobilní část ETCS získává brzdňý model výhradně tímto způsobem, lze hovořit o tzv. *lambda vlaku*.

*Poznámka 1: Označení gama a lambda vlak může být zavádějící. Důvodem je to, že mobilní část ETCS může umožňovat kombinaci obou způsobů získání brzdňého modelu. V tomto případě pak nelze hovořit o gama, resp. lambda vlaku (potažmo o gama nebo lambda přístupu hodnocení brzdňých schopností vlaku), když v závislosti na složení daného vlaku (resp. na volbě strojvedoucího) se z gama vlaku může stát lambda vlak a opačně.*

*Poznámka 2: Oba způsoby jsou možné pouze v doméně, v níž je platný konverzní model, což je do rychlosti  $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (vč.), pro brzdicí procenta mezi 30 a 250 %, pro vlak o maximální délce 900 m (osobní vlak) anebo 1 500 m (nákladní vlak) [1] a do sklonu trati maximálně 40 ‰ [2].*

Vzhledem k tomu, že se dá předpokládat, že brzdňý model ETCS, který je obdržen přímo z vlakových dat (a tedy takovýto model byl získán jako výsledek měření provedeného za definovaných podmínek s vlakem odpovídajícího složení), se bude blížit realitě, nebude se dále tento článek těmito vlaky zabývat. Zaměří se výhradně na vlaky, u nichž byl brzdňý model vypočítán systémem ETCS na základě znalosti brzdících procent, délky a typu vlaku s použitím konverzního modelu, kde má správce infrastruktury více možností, jak brzdňý model ovlivnit<sup>4</sup>.

## 2 Korekční faktory pro brzdňý model ETCS

Korekční faktory pro brzdňý model ETCS umožňují správci infrastruktury ovlivňovat (nominální) brzdňý model počítaný na vozidlech mobilní částí ETCS. Tyto faktory se na mobilní část ETCS předávají z traťové části systému ETCS. Jsou definovány jako tzv. národní hodnoty. Každý správce infrastruktury si tedy může definovat hodnoty vlastní. V případě, že mobilní část ETCS nemá tyto k dispozici, použije hodnoty defaultní, které jsou definovány přímo specifikacemi ETCS (viz [1]).

V tomto článku budou popsány jen ty korekční faktory, které se uplatňují pro lambda vlaky, tedy vlaky, u nichž se nominální hodnoty parametrů pro konstrukci brzdňého modelu získávají ze zadaných brzdících procent a dalších parametrů vlaku prostřednictvím konverzního modelu. U gama vlaků se tyto hodnoty získávají experimentálním měřením s konkrétní soupravou vozů.

### 2.1 Korekční faktor ovlivňující model náběhu brzdy ( $K_{t\_int}$ )

Součinitel  $K_{t\_int}$  umožňuje ovlivňovat dobu náběhu nouzové brzdy, kterou mobilní část ETCS používá pro výpočet dohledových limitů, následujícím způsobem:

$$T_{be} = K_{t\_int} \cdot T_{brake\_emergency} \text{ [s]} \quad (4)$$

kde  $K_{t\_int}$  ... korekční faktor, jde o konstantu definovanou proměnnou  $M\_NVKTINT$ , která může nabývat hodnot z intervalu  $\{0; \dots; 1,55 \text{ s krokem } 0,05\}$ , defaultní

<sup>4</sup> U prvního z přístupů [gama] si správce infrastruktury může zvolit pravděpodobnost, se kterou vlak zastaví na suché koleji lépe (myšleno dříve), než kdyby brzdil dle brzdňých křivek, (dle ní si mobilní část ETCS vybere odpovídající brzdňý model) a může si stanovit míru vlivu vozidlového korekčního faktoru pro mokrou kolej (od 0 do 100 %).

$T_{\text{brake-emergency}}$  ... hodnota:  $K_{t\_int} = 1,1$   
 nominální doba náběhu nouzové brzdy [s].

## 2.2 Korekční faktory ovlivňující model odrychlení ( $K_{v\_int}$ , $K_{r\_int}$ )

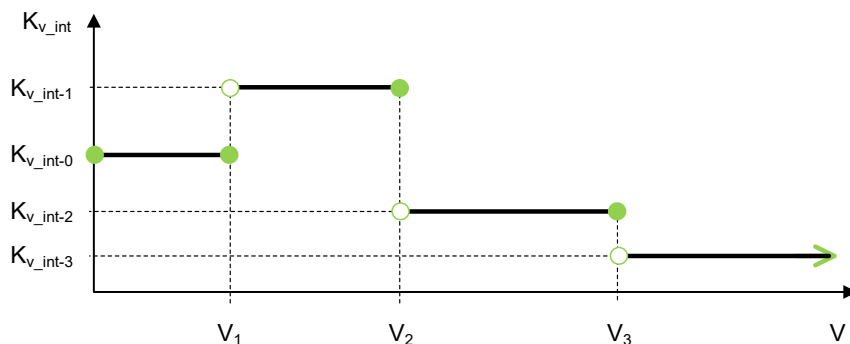
Tyto dva součinitele umožňují ovlivňovat uvažované odrychlení nouzové brzdy, které mobilní část ETCS používá pro výpočet dohledových limitů, následujícím způsobem:

$$A_{\text{brake\_safe}}(V) = K_{v\_int}(V) \cdot K_{r\_int}(L\_TRAIN) \cdot A_{\text{brake\_emergency}}(V) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (5)$$

kde  $K_{v\_int}$  ... korekční faktor (M\_NVKVINT), defaultní konstantní hodnota:  $K_{v\_int} = 0,7$ , blíže viz kap. 2.2.1,  
 $K_{r\_int}$  ... korekční faktor (M\_NVKRINT), defaultní konstantní hodnota:  $K_{r\_int} = 0,9$ , blíže viz kap. 2.2.2,  
 $A_{\text{brake-emergency}}$  ... nominální odrychlení nouzové brzdy [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

### 2.2.1 Faktor závislý na rychlosti ( $K_{v\_int}$ )

Součinitel  $K_{v\_int}$ , definovaný hodnotou proměnné M\_NVKVINT  $\in \{0; \dots; 2,54 \text{ s krokem } 0,02\}$ , je závislý na rychlosti vlaku a umožňuje pro různé rychlostní rozsahy ovlivňovat brzděné odrychlení konstantou danou jeho hodnotou.



Obrázek 8: Závislost korekčního faktoru  $K_{v\_int}$  na rychlosti vlaku; Zdroj: Autor

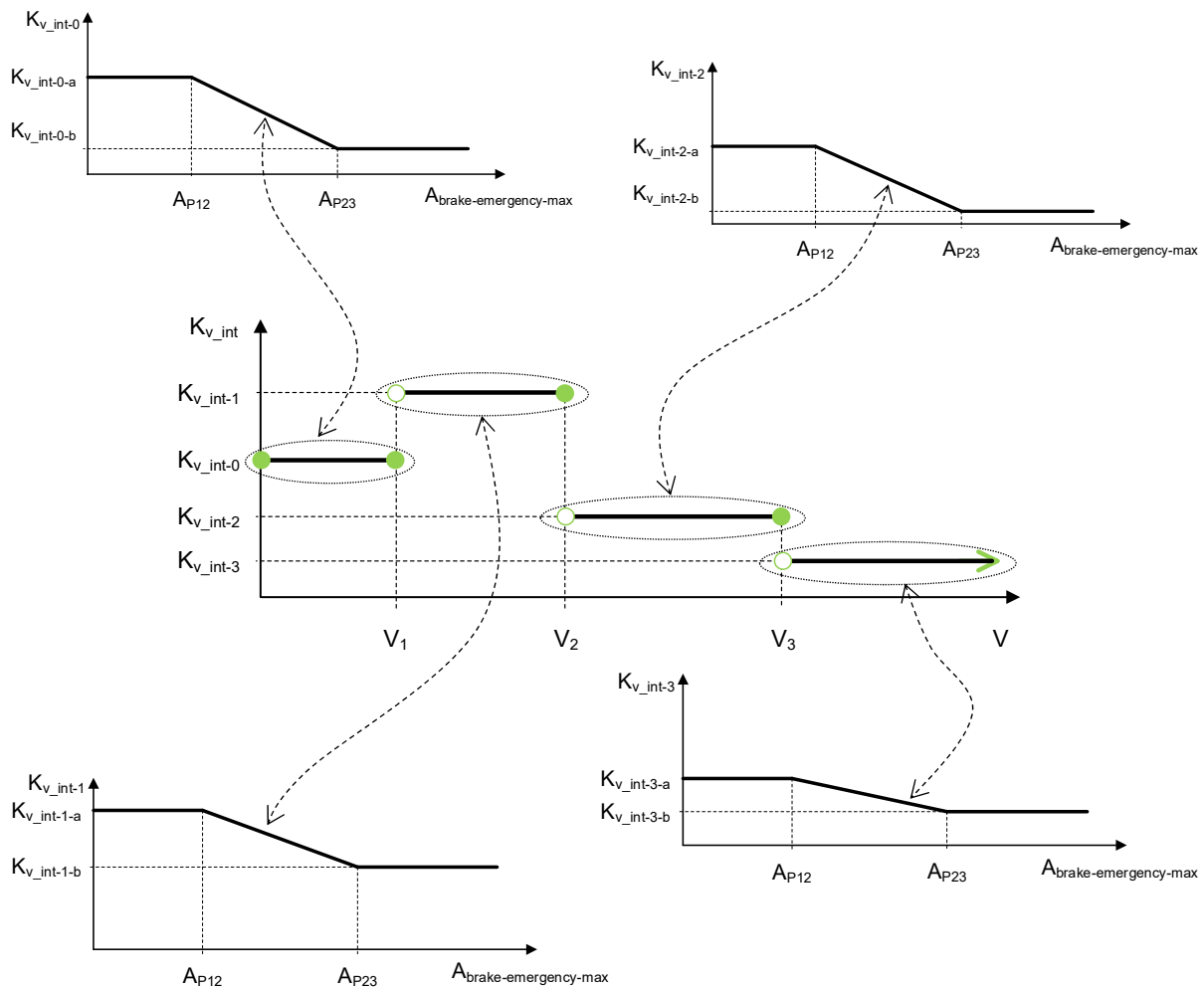
V ETCS je možno v závislosti na rychlosti a druhu vlaku (osobní/nákladní) definovat až 5 hodnot tohoto součinitele. Platnost jeho poslední hodnoty není omezena (viz obrázek 8).

Pro vlaky osobní dopravy je navíc možno sjednat závislost hodnoty tohoto korekčního faktoru na brzdných schopnostech vlaku, resp. na jeho maximálním nominálním odrychlení nouzové brzdy  $A_{\text{brake-emergency-max}}$ , pro nějž platí:

$$A_{\text{brake-emergency-max}} = \text{MAX}(AD_i) \text{ pro } \forall i \in \mathbb{Z}^+ = \{0; 1; \dots; 6\} \quad (6)$$

kde  $AD_i$  ... jednotlivá nominální odrychlení nouzové brzdy z modelu odrychlení v závislosti na rychlosti (viz obr. 5).

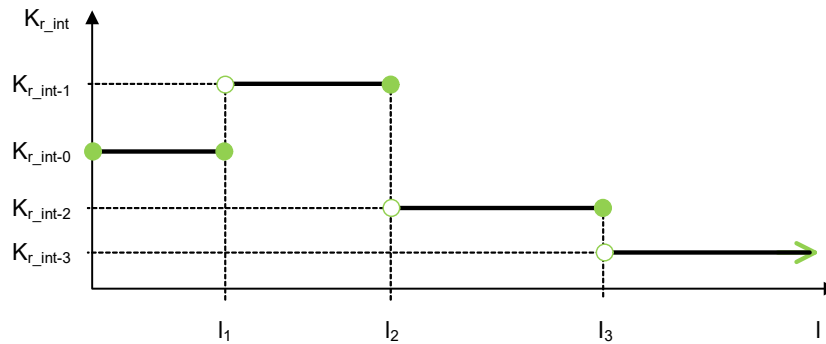
Dle výše uvedené maximální hodnoty nominálního odrychlení nouzové brzdy si mobilní část ETCS pro jednotlivé rychlostní rozsahy vybere hodnotu součinitele  $K_{v\_int}$ , tak jak je to naznačeno na obrázku 9 níže.



Obrázek 9: Závislost korekčního faktoru  $K_{v\_int}$  na rychlosti vlaku a maximálním nominálním odrychléní  $A_{brake-emergency-max}$  pro osobní vlak; Zdroj: Autor

### 2.2.2 Faktor závislý na délce vlaku ( $K_{r\_int}$ )

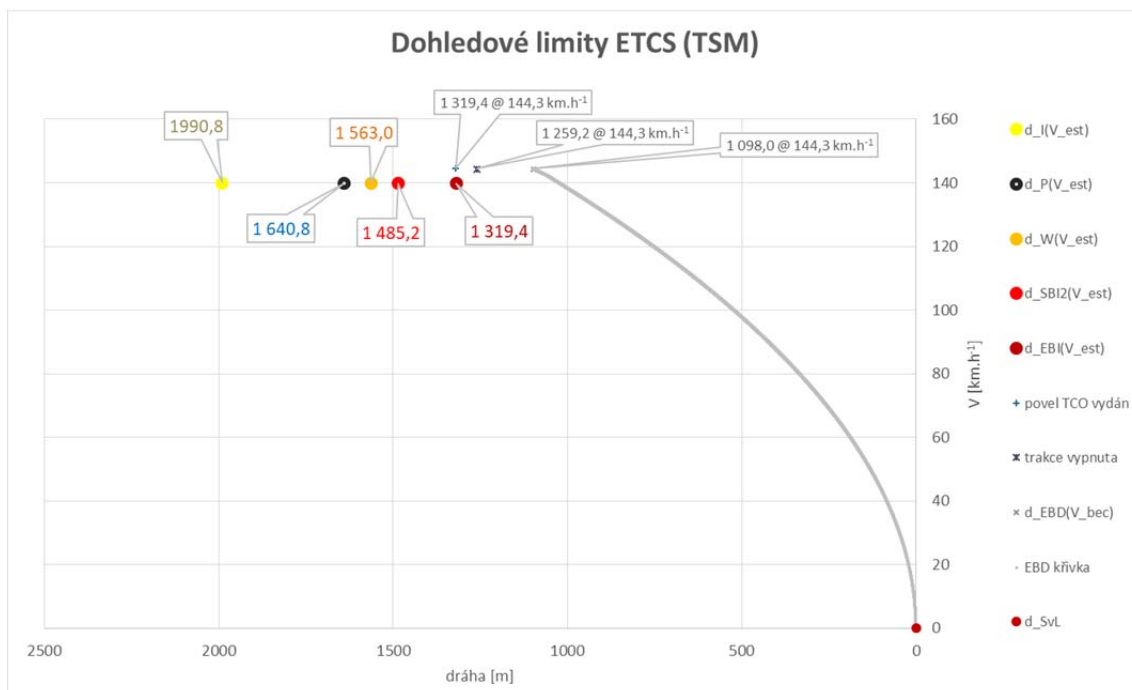
Součinitel  $K_{r\_int}$ , definovaný hodnotou proměnné  $M\_NVKRINT \in \{0; \dots; 1,55 \text{ s krokem } 0,05\}$ , umožňuje vnést do brzdného modelu ETCS závislost brzdného odrychléní na skutečné délce vlaku. Pro konkrétní vlak představuje tento součinitel konstantu, jelikož nabývá pro danou délku, resp. daný délkový interval konstantní hodnoty. V ETCS je možné definovat až 5 hodnot tohoto součinitele, přičemž platnost jeho poslední hodnoty není omezena (viz obrázek 10).



Obrázek 10: Závislost korekčního faktoru  $K_{r\_int}$  na délce vlaku; Zdroj: Autor

Závěrem této kapitoly je tedy možno konstatovat, že korekční faktor  $K_{t\_int}$  ovlivňuje první část brzdného modelu ETCS, kde  $A_{brzdné}$  je primárně funkcí času (viz modrou část obr. 1), zatímco dvojice korekčních faktorů  $K_{v\_int}$  a  $K_{r\_int}$  ovlivňuje druhou část tohoto modelu, kde  $A_{brzdné}$  závisí primárně na rychlosti vlaku (viz žlutou část obr. 1).

### 3 Související dohledové limity ETCS



Obrázek 11: Ukázka dohledových limitů ETCS odvozených od křivky nouzového brzdění (EBD); Zdroj: Autor

Z brzdného modelu ETCS (viz kap. 1), ať už upraveného či neupraveného integrovanými korekčními faktory (viz kap. 2), vytváří systém ETCS brzdné křivky, reprezentující předpokládaný pokles rychlosti v závislosti na dráze. Od brzdných křivek jsou dále pro konkrétní (skutečné) rychlosti odvozovány různé dohledové limity, resp. jejich polohy (viz obr. 11). Minutí polohy určitého dohledového limitu čelem vlaku spouští definovanou akci mobilní části ETCS: indikaci pro strojvedoucího (optickou, zvukovou), či přímo intervenci do jízdy (spuštění brzdy). Je tedy patrné, že

ETCS nejen dohlíží na nepřekračování dovolené rychlosti vlakem, nýbrž také včas radí strojvedoucímu, jak má vlak vést, aby k tomuto jevu nedošlo. Výše zmíněné definované akce mohou být:

o Intervence:

- EBI = rychločinné (nouzové) brzdění (*Emergency Brake Intervention*).
- SBI = úplné provozní brzdění (*Service Brake Intervention*).

o Indikace:

- **P** (*Permitted speed*, viz modrý bod na obr. 11) = dovolená rychlost je rychlost, kterou má strojvedoucí dodržovat, je mu zobrazována na displeji DMI. Pokud dojde k jejímu překročení, je na to strojvedoucí upozorněn (opticky – oranžovou barvou, i akusticky – je přehrán zvuk S1\_toofast), aby ještě mohl odvrátit případný zásah systému ETCS do řízení jízdy vlaku. Dohledový limit P je vypočítán tak, že při překročení (zobrazované) dovolené rychlosti je jeho poloha překročena též. Jeho význam je tedy upozornit strojvedoucího na to, že došlo k překročení dovolené rychlosti => stav překračování rychlosti.
- **W** (*Warning*, viz oranžový bod na obr. 11) = varovný dohledový limit, jehož účelem je podruhé akusticky upozornit strojvedoucího na to, že překračuje dovolenou rychlost => varovný stav (pobyt v tomto stavu je doprovázen trvalou akustickou signalizací typu S2\_warning, která ustane až po snížení rychlosti tak, že se čelo vlaku opět dostane před dohledový limit dovolené rychlosti P, popř. až po zásahu systému ETCS).
- **SBI** (*Service Brake Intervention*, viz světle červený bod na obr. 11) = intervenční limit úplného provozního brzdění, jehož účelem je iniciovat zásah ETCS do řízení, a docílit tak zpomalení úplným provozním brzděním, je-li toto povolené/dostupné, aby nedošlo k zásahu rychločinného (nouzového) brzdění => intervenční stav, strojvedoucímu je toto indikováno (červenou barvou).
- **EBI** (*Emergency Brake Intervention*, viz tmavě červený bod na obr. 11) = intervenční limit rychločinného brzdění, jehož účelem je iniciovat zásah ETCS do řízení a zastavení/zpomalení rychločinným (nouzovým) brzděním, aby nedošlo k překročení povolených limitů (rychlost/vzdálenost) v případě, že by nezaúčinkovalo provozní brzdění (pro poruchu nebo zákaz jeho použití) => intervenční stav, strojvedoucímu je toto indikováno (červenou barvou).
- **I** (*Indication*, viz žlutý bod na obr. 11) = indikační dohledový limit, který se zřizuje, aby měl strojvedoucí dostatek času pro zahájení brzdění, a to zejména v situaci, kdy se blíží (např. konstantní dovolenou rychlostí) k místu, kde má již brzdít k cíli (snížení rychlosti, EOA). Toto je nutné zejména při přechodu mezi dohledem konstantní dovolené rychlosti (CSM) a dohledem cílové rychlosti (TSM), kdy ETCS začíná dohlížet, že vlak skutečně snižuje svou rychlost, a tedy se mu také začíná adekvátně snižovat jeho dovolená rychlost. Účelem tohoto dohledového limitu je tedy poskytnout strojvedoucímu včasnou informaci (upozornit jej opticky – žlutou barvou, i akusticky – zazní zvuk

S\_info), že se mu brzo začne snižovat dovolená rychlost, aby mohl zahájit brzdění, aby nedošlo k překročení této rychlosti => indikační stav.

Z výše uvedeného je zřejmé, že účelem dohledu ETCS je zamezení překročení dovolené rychlosti/vzdálenosti. K tomuto primárnímu účelu slouží dohledový limit intervence nouzové brzdy (EBI), všechny ostatní dohledové limity (tj. SBI, W, P, příp. I) pomáhají strojvedoucímu (poskytováním informací, či aplikací provozní brzdy), aby se předešlo zásahu nouzové brzdy v důsledku překročení limitu EBI. Polohu tohoto intervenčního limitu je možno s použitím integrovaných korekčních faktorů, popsanych v předchozí kapitole (viz kap. 2), ovlivňovat. O tom, jak by ji bylo možno přizpůsobit, aby příliš nebyl omezen železniční provoz a aby ji stále bylo možno považovat za bezpečnou, pojednává následující kapitola (viz kap. 4).

## 4 Návrh optimalizace brzdného modelu ETCS s vazbou na současnou legislativu ČR

### 4.1 Teoretická úvaha

Vyjdeme-li z vrcholového právního předpisu týkajícího se brzdících účinků drážních vozidel, kterým je v České republice vyhláška Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, v platném znění, lze dojít k níže uvedenému kritériu pro nastavení brzdného modelu ETCS (8).

Předtím ovšem citujme pro tento účel několik klíčových ustanovení tohoto právního předpisu (Dopravního řádu drah):

- § 37 odst. 2: „*Vlak musí být brzděn tak, aby jeho brzdící účinek zajistil bezpečné zastavení vlaku na zábrzdnou vzdálenost.*“
- § 37 odst. 3: „*Brzdící účinek vlaku je určen brzdícími procenty. Tabulky brzdících procent pro dráhu celostátní a dráhu regionální stanoví požadovaný brzdící účinek vlaku, vyjádřený brzdícím procentem vlaku, v závislosti na dovolené rychlosti vlaku, jeho druhu a délce, na rozhodném spádu trati a zábrzdné vzdálenosti na této trati. Tabulky brzdících procent jsou uvedeny v příloze č. 2 [...] a pro konkrétní traťové úseky a pro konkrétní vlaky se uvádějí v jízdním řádu.*“
- § 37 odst. 4 uvádí, jak se pro konkrétní vlak vypočítají skutečná brzdící procenta, a odst. 5 tamtéž uvádí, že: „*skutečná brzdící procenta vlaku musí být vyšší nebo alespoň rovna požadovaným brzdícím procentům, která vycházejí z tabulek přílohy č. 2.*“

Je vidět, že se v této souvislosti opírá o skutečnost, že vlak s brzdícím účinkem, který odpovídá alespoň požadovaným brzdícím procentům (dle tabulek brzdících procent, resp. jízdního řádu), je za daných podmínek schopen spolehlivě (myšleno s určitou rezervou) zastavit na dané zábrzdné vzdálenosti. Jinými slovy, že zábrzdná dráha takového vlaku je (o výše zmíněnou rezervu) menší než pro danou rychlost a sklon stanovená zábrzdná vzdálenost. Pokud toto platí a je to považováno za bezpečné (viz § 37 odst. 2 citovaný výše), mělo by být možno také považovat za bezpečné, pokud by představa ETCS byla pro daný vlak (daný sklon a danou rychlost) taková, že vlak s danými brzdícími procenty zastaví na stejné dráze.



Uvažujeme-li dále s předpokladem, že výše zmíněná rezerva představuje 10 % ze stanovené zábrzdě vzdálenosti [8], pak by mělo být také bezpečné, když by představa ETCS byla taková, že vlak zastaví na vzdálenosti, pro kterou platí:

$$d_{\text{zábrzdě}} = ZV - \frac{ZV}{10} \quad (7)$$

kde  $d_{\text{zábrzdě}}$  ... zábrzdě dráha vlaku, kterou je možno za stanovených podmínek považovat dle legislativy za bezpečnou [m]  
 $ZV$  ... zábrzdě vzdálenost dle předpisu SŽDC D1 [m]

Toto znamená, že poloha intervenčního dohledového limitu EBI se musí za daných podmínek nacházet nejméně na tuto vzdálenost před místem, kde končí oprávnění k jízdě (EOA/SvL), které je obvykle v úrovni hlavního návěstidla (za nímž již nejsou splněny podmínky pro bezpečné pokračování v další jízdě vlaku). Musí tedy platit následující nerovnost:

$$d_{\text{EBI}} \geq d_{\text{zábrzdě}} \quad (8)$$

kde  $d_{\text{EBI}}$  ... poloha dohledového limitu EBI měřená od polohy EOA/SvL [m]  
 $d_{\text{zábrzdě}}$  ... zábrzdě dráha vypočítaná dle (7) [m].

Dále platí, že čím blíže je poloha dohledového limitu EBI ( $d_{\text{EBI}}$ ) k poloze odpovídající poloze  $d_{\text{zábrzdě}}$  získané dle vzorce (7), tím více se blíží představa ETCS představě získané dle tabulek brzdících procent. Pokud se rovnají, obě představy se shodují, což by měl být kýžený stav z hlediska přílišného neomezování železničního provozu a současně zachování jeho bezpečnosti. V následující kapitole se tohoto stavu pokusíme docílit pomocí integrovaných korekčních faktorů (viz kap. 4.2). Plnění nerovnice (8) pak bude třeba prokázat pro všechny kombinace z tabulek brzdících procent (viz přílohy č. 1 a 2).

#### 4.2 Vlastní provedení optimalizace

Vzhledem k tomu, že v defaultním stavu ovlivňuje nominální brzdě model ETCS nejvíce korekční faktor  $K_{v\_int}$ , který se navíc dá velice dobře škálovat (lze jej předávat jak pro osobní, tak pro nákladní vlaky samostatně, nadto u osobních vlaků je možno jej měnit v závislosti na skutečných brzdě schopnostech vlaku – viz kap. 2), jeví se jako nejvhodnější k optimalizaci brzdě modelu použít právě tento korekční faktor.

Použijeme-li tedy k přizpůsobení brzdě modelu ETCS v prvním přiblížení korekční faktor  $K_{v\_int}$ , a to jen s jednou konstantní hodnotou pro vlaky osobní a jednou konstantní hodnotou pro vlaky nákladní, pak lze prostřednictvím vhodného nástroje dojít v několika iteracích k tomu, že by bylo vhodné nastavit tento součinitel na hodnoty 1,22 (pro vlaky osobní dopravy) a 1,32 (pro vlaky nákladní dopravy). Tyto hodnoty totiž ještě vyhoví v nerovnici (8) pro všechny kombinace z tabulek brzdících procent (viz přílohu č. 1). Hodnoty jen o 0,02 vyšší, tedy nejbližší vyšší dané rozlišením jazyka ETCS, již nevyhoví (viz přílohu č. 2).

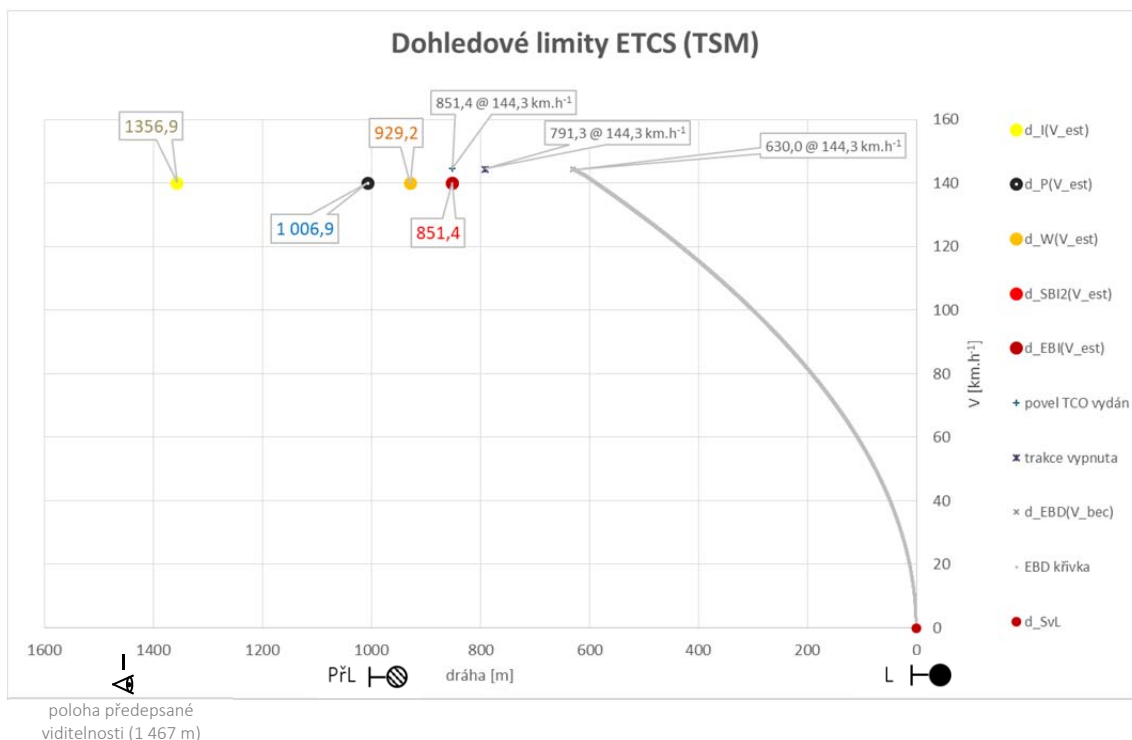


Z přílohy č. 1 je totiž vidět, že představa ETCS (viz řádky „br. dráha dle ETCS“) je – při daném nastavení korekčních faktorů  $K_{v\_int}$  – taková, že vlak zastaví z rozhodné rychlosti na rozhodném spádu (0 ‰), když je spuštěna nouzová (rychločinná) brzda, na dráze, která se rovná údaji uvedeném v tomto řádku, tj. maximálně s odchylkou do 10 % z pro danou kombinaci (rychlosti, délky vlaku, druhu vlaku, režimu jeho brzdění, jeho brzdících procent a sklonu trati) dle předpisu SŽDC (ČD) V15/I stanovené zábrzdě vzdálenosti (ZV) (viz řádky „rezerva do ZV [%]“). Z přílohy č. 2 je vidět, že toto nastavení (hodnoty vyšší) již nevyhoví pro  $\lambda = 65, 73$  a  $82$  % v tabulce I.10b. Pro úplnost obsahuje příloha č. 3 představu ETCS, která odpovídá defaultnímu nastavení integrovaných korekčních faktorů ( $K_{t\_int}$ ,  $K_{v\_int}$ ,  $K_{r\_int}$ ).

Doporučení této analýzy by tedy bylo nastavit korekční faktor  $K_{v\_int}$  na hodnotu 1,22 (pro vlaky osobní), resp. 1,32 (pro vlaky nákladní), což jsou hodnoty minimalizující dopad dohledu ETCS na železniční provoz při současném respektování tabulek brzdících procent, které jsou dle současné legislativy považovány za bezpečné.

#### 4.3 Ilustrace dosažených výsledků

Chceme-li předvést aplikaci výše navržené optimalizace na příkladu reálného vlaku, můžeme vzít kupříkladu Sp 1904 dle GVD 2018/19 (vlak:  $V_{max} = 140 \text{ km.h}^{-1}$ ,  $\lambda = 146$  %, délka 80 m (jednotka řady 471/971); trať: sklon 0 ‰,  $K_{v\_int} = 1,22$ ), získáme pro jeho maximální rychlost následující polohy dohledových limitů ETCS (viz obr. 12).



Obrázek 12: Ukázka dohledových limitů pro Sp 1904 (elektrickou jednotku 471/971) s brzdícím modelem upraveným korekčním faktorem  $K_{v\_int} = 1,22$ ; Zdroj: Autor

Z obrázku 12 je patrný následující průběh jízdy daného vlaku: Mobilní část ETCS na vlaku osobní dopravy blížícím se konstantní rychlostí  $140 \text{ km.h}^{-1}$  s výše popsaným upraveným brzdícím modelem ( $K_{v\_int} = 1,22$ ) ke konci oprávnění k jízdě začne stroj-

vedoucímu indikovat, že se blíží okamžik, kdy se začne snižovat dovolená rychlost – na konvenční trati by se tak stalo zhruba 357 m před předvěstí s návěstí Výstraha, resp. 1 357 m před místem, kde končí oprávnění k jízdě. Přibližně 7 m před stanovištěm předvěsti se dovolená rychlost dostává pod hodnotu  $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pokud rychlost strojvedoucí nesnižuje, začne mu ETCS v této poloze indikovat překračování dovolené rychlosti. Druhé (zvukové) varování při nesnižování rychlosti se dostaví cca 70 m po minutí předvěsti a zásah ETCS do jízdy vlaku (spuštění nouzové brzdy) nastane zhruba 851 m před místem, kde pro daný vlak končí oprávnění k jízdě. Nezhoršení současného stavu z hlediska bezpečnosti je vidět ve vyplněných tabulkách brzdících procent v přílohách, v nichž jde o mezní případy, které jsou dle vyhlášky Ministerstva dopravy ČR č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, považovány za bezpečné (resp. zajišťující za daných podmínek bezpečné zastavení vlaku).

Zde je třeba poznamenat, že v tomto příspěvku nebylo uvažováno s nejistotou měření ujeté dráhy ETCS, a že se tedy zmiňované dohledové polohy ETCS (viz obr. 11 i 12) mohou posunout proti směru jízdy vlaku v závislosti na této nejistotě, a tedy i na umístění pro daný vlak poslední platné balízové skupiny. Nicméně zlepšení z hlediska provozního je patrné v porovnání s obrázkem 11 (viz polohy pro zásah nouzové brzdy (EBI) – 851 m vs. 1 319 m před EOA/SvL), který zachycuje defaultní model pro tentýž vlak. Pro porovnávání poloh ostatních limitů ETCS je třeba mít na paměti, že v obrázku 12 má mobilní část ETCS zakázáno použití provozní brzdy, zatímco v obrázku 11 má toto povoleno – obrázek 11 reprezentuje základní (defaultní) stav. I tak se ale všechny limity v případě výše uvedeného vlaku posunou o zmíněných více než 450 m ve prospěch pozdějšího zahajování indikací/intervencí.

## Závěr

Příspěvek seznamuje s brzdícím modelem ETCS, navrhuje způsob, jak by jej bylo možno správcem infrastruktury prostřednictvím integrovaných korekčních faktorů nastavit, aby jej bylo možno považovat (dle současné legislativy) stále za bezpečný a současně aby byl provozně méně omezující než ten, který používá ETCS dle specifikací základní verze 3 (Baseline 3). Stanovuje konkrétní hodnoty korekčních faktorů, které byly získány porovnáním dvou představ o brzdění vlaků, jejichž brzděné schopnosti jsou hodnoceny přístupem lambda, tedy přístupem založeným na brzdících procentech vlaku. Jednu takovou představu si vytváří systém ETCS, resp. jeho mobilní část přímo na vozidle, druhá představa je převzata z tabulek brzdících procent, které jsou součástí vyhlášky Ministerstva dopravy ČR č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, resp. předpisu SŽDC (ČD) V15/I „Předpis pro provoz a obsluhu brzdových zařízení železničních kolejových vozidel“. Výsledky demonstruje na příkladu průběhu jízdy konkrétního vlaku k místu, kde končí oprávnění k jízdě. K následnému dořešení dané problematiky bude nezbytné účinné součinnosti dotčených odvětví železničního systému, a to včetně případné novely vnitrostátní legislativy a podnikových předpisů SŽDC.

## Literatura:

- [1] ERA – UNISIG – EEIG ERTMS USERS GROUP. *ERTMS/ETCS – System Requirements Specification*. SUBSET-026, Issue 3.6.0 (Baseline 3 Re-lease 2). Brussels: European Commission (EC), 2016. 701 p.
- [2] UIC (Union Internationale des Chemins de Fer). *UIC CODE 544-1. Brakes – Braking Performance*. 6<sup>th</sup> ed. Paris: UIC, 2014. 140 p. ISBN 978-2-7461-2299-4.
- [3] HOUGARDY, Alain (ERA – ERTMS Unit). *Introduction to ETCS Braking Curves*. Version 1.4. Valenciennes: ERA, 2016. 28 p.
- [4] PRESCIANI, Paolo – MALVEZZI, Monica – BONACCI Luigi, Giuseppe – BALLI, Monica. *Development of a braking model for speed supervision systems*. Florence: University of Florence & FS, 2001. 18 p.
- [5] POHL, Jiří. *Brzdění nákladních vlaků samočinnou pneumatickou brzdou*. Setkání na Generálním ředitelství SŽDC, 11/2018. 49 s.
- [6] Vyhláška Ministerstva dopravy ČR č. 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah, v platném znění. 119 s.
- [7] SŽDC (ČD) V15/l. *Předpis pro provoz a obsluhu brzdových zařízení železničních kolejových vozidel*. Změna č. 3. Praha, ČD, a.s., 2002. 172 s.
- [8] Odborná konzultace s panem Ing. Bohumilem Drápalem, VÚŽ Praha, a. s. 2018.
- [9] ZÍTKO, Martin. *Pneumatická část brzdy kolejových vozidel*. Nové Město nad Metují, 2018. Dostupné z WWW: <<http://www.vagony.cz/pojezdy/brzda/pneumatik.html>>.

## Seznam zkratk:

B3	Baseline 3	základní verze 3 (verze specifikací požadavků na ETCS)
CSM	Ceiling Speed Monitoring	druh dohledu mobilní části ETCS (konstantní rychlost)
DMI	Driver-Machine Interface	Rozhraní ke strojvedoucímu (součást mobilní části ETCS)
DP	Danger Point	místo ohrožení (poloha za EOA, jejíž nepřekročení je dohlíženo systémem ETCS)
EBD	Emergency Brake Deceleration curve	křivka nouzového (rychločinného) brzdění
EBI	Emergency Brake Intervention	poloha zásahu nouzové brzdy
EOA	End of Authority	konec oprávnění k jízdě
ERTMS	European Rail Traffic Management System	Evropský systém řízení železničního provozu
ETCS	European Train Control System	Evropský vlakový zabezpečovací systém
FG	Freight train with brake in G position	nákladní vlak s režimem brzdy G (pomalý vývin brzdícího účinku)
FP	Freight train with brake in P position	nákladní vlak s režimem brzdy P (rychlý vývin brzdícího účinku)
GUI	Guidance curve	pomocná křivka
GVD	-	grafikon vlakové dopravy

OVL	Overlap	prokluz (úsek za EOA, jehož konec je systémem ETCS dohlížen, aby nedošlo k jeho projetí)
PP	Passenger train (with brake in P position)	osobní vlak (s režimem brzdy P)
SBI	Service Brake Intervention	poloha zásahu provozní brzdy
SvL	Supervised Location	dohlížené místo (konec prokluzové dráhy, kritické místo, anebo EOA)
TCO	Traction Cut-Off	vypnutí trakce (funkce mobilní části ETCS)
TSI CCS	Technical Specification for Interoperability related to Control-Command and Signalling (Com. Regulation (EU) 2016/919)	Technické specifikace interoperability pro subsystém řízení a zabezpečení (Nařízení Komise (EU) 2016/919)
TSM	Target Speed Monitoring	druh dohledu mobilní části ETCS (brzděné křivky)
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer ( <i>Fr.</i> )	Mezinárodní unie železnic
VZ/VZZ	-	vlakový zabezpečovač/vlakové zabezpečovací zařízení

Černošice, duben 2019

Lektorovali:

Ing. Tomáš Konopáč

Správa železniční dopravní cesty, s.o.

Ing. Bohumil Drápal

Výzkumný Ústav Železniční, a.s.





