

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Brzdění nákladních vlaků v podmínkách plného dohledu ETCS

Karel Schejbal

Diplomová práce

2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Karel Schejbal
Osobní číslo:	D20514
Studijní program:	N1041A040008 Technologie a management v dopravě
Specializace:	Technologie a řízení dopravy
Téma práce:	Brzdění nákladních vlaků v podmínkách plného dohledu ETCS
Zadávací katedra:	Katedra technologie a řízení dopravy

Zásady pro vypracování

Dosavadní zkušenosti z provozu vlaků pod dohledem zabezpečovače ETCS L2 v podmínkách české železniční sítě ukazují, že zejména v případech, kdy je nutné přiblížit se čelem vlaku ke konci oprávnění k jízdě (typicky v případě dlouhých nákladních vlaků či dojíždění k návěstidlu zakazujícímu další jízdu), vyžaduje ETCS včasné a velmi pozvolné snižování rychlosti jízdy, což může mít nezanedbatelný negativní dopad na kapacitu dopravní cesty. Zaměřte proto práci na rozbor této problematiky a vyšetření (ne)souladu mezi skutečným průběhem rychlosti jízdy vlaku při brzdění v kontextu restrikcí ETCS.

Vypracujte:

1. rešerši v oblasti dohledu ETCS na snižování rychlosti jízdy vlaku blížícího se ke konci oprávnění k jízdě (princip funkce ETCS, brzdné křivky a dohledové limity);
2. rozbor brzdících schopností vlaku brzděného samočinnou pneumatickou brzdou UIC (princip funkce brzdy, režimy brzdění, hodnocení brzděného účinku);
3. vhodný model pro numerickou simulaci brzdění vlaku se zohledněním základních charakteristik brzdového systému UIC;
4. výpočty vybraných provozních scénářů brzdění vlaku v kontextu dohledu ETCS;
5. zhodnocení získaných výsledků.

Rozsah pracovní zprávy: **50-60**
Rozsah grafických prací: **5-6**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. MICHÁLEK, T. *Technické aspekty interoperability kolejových vozidel*. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2017. ISBN 978-80-7560-048-6.
2. MICHÁLEK, T., ZELENKA, J. *Trakční mechanika*. 1. vydání, 104 s. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2018. ISBN 978-80-7560-175-9.
3. ERTMS/ETCS SUBSET-026-3, ISS. 3.6.0. *System Requirements Specification –Chapter 3 – Principles*. ERA, 2016.
4. MAREK, J., MYSLIVEC, I., BUBENÍK, M. Návrhy úprav funkčního chování ERTMS/ETCS při dohledu cíle na generické úrovni. *Vědeckotechnický sborník Správy železnic*. 2020 (2), s. 83–107. ISSN 2694-9172.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

L.S.

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

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

Prohlašuji:

Práci s názvem „Brzdění nákladních vlaků v podmínkách plného dohledu ETCS“ jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13.5.2022

Karel Schejbal

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Michálkovi, Ph.D. za jeho čas a úsilí, které mi věnoval při zpracování této práce.

ANOTACE

Tato práce je zaměřena na řešení v oblasti dohledu ETCS na snižování rychlosti jízdy vlaku. Jsou také rozebrány brzdicí schopnosti vlaku brzděného samočinnou pneumatickou brzdou UIC. V rámci této práce je také sestaven vhodný model pro numerickou simulaci brzdění vlaku se zohledněním základních charakteristik brzdového systému UIC. Pomocí matematického modelu jsou nasimulovány různé provozní scénáře brzdění vlaku v kontextu dohledu ETCS.

KLÍČOVÁ SLOVA

Evropský vlakový zabezpečovač; brzdění; brzděné křivky; dohledové limity.

TITLE

Braking of freight trains in conditions of full ETCS supervision.

ANNOTATION

This task is focused on research in the field of ETCS supervision to reduce of train speed. The braking capabilities of a train braked by an automatic pneumatic brake UIC are also discussed. Within this work, a suitable model for numerical simulation of train braking is also compiled, taking into account the basic characteristics of the UIC braking system. Using a mathematical model, different train braking scenarios are simulated in the context of ETCS supervision.

KEYWORDS

European train control system; braking; braking curves; supervision limits.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 JÍZDA VLAKU POD DOHLEDEM ETCS	10
1.1 Zabezpečení jízdy kolejových vozidel	10
1.2 Vlakové zabezpečovače	11
1.3 European Train Control System (ETCS)	12
1.3.1 Obecný princip funkce ETCS	13
1.3.2 Aplikační úrovně ETCS	18
1.3.3 Režimy ETCS	21
1.4 Technologie GSM-R	23
2 BRZDĚNÍ VLAKU POD DOHLEDEM ETCS	24
2.1 Stanovení cílů	24
2.2 Stanovení brzdných křivek	25
2.2.1 Křivka nouzového brzdění (EBD)	25
2.3 Stanovení dohledových limitů	28
2.3.1 Výpočet dohledového limitu EBI	29
2.3.2 Výpočet dohledového limitu W	31
2.3.3 Výpočet dohledového limitu P	31
2.3.4 Výpočet dohledového limitu I	31
3 BRZDOVÝ SYSTÉM KOLEJOVÝCH VOZIDEL	32
3.1 Mechanická část brzdy	32
3.2 Pneumatická část brzdy	33
3.3 Hodnocení brzdícího účinku železničních vozidel	37
4 VÝPOČTOVÝ MODEL BRZDĚNÍ NÁKLADNÍHO VLAKU	40
4.1 Princip numerického řešení pohybové rovnice vlaku	40
4.2 Výpočtový model pro brzdění nákladního vlaku a jeho parametry	41
5 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ VYBRANÝCH PROVOZNÍCH SCÉNÁŘŮ BRZDĚNÍ VLAKU	46
6 MOŽNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY PŘIBLIŽOVÁNÍ VLAKU K EoA	56
ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62

SEZNAM ZKRATEK

ETCS	European Train Control System	Evropský vlakový zabezpečovač
UIC	International Union of Railways	Mezinárodní železniční unie
ERRI	European Rail Research Institute	Evropský vlakový zabezpečovač
ERTMS	European Rail Traffic Management System	Evropský železniční výzkumný ústav
EIRENE	European Integrated Railway Radio Enhanced Network	Evropská integrovaná železniční rádiová síť
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway	Globální systém pro mobilní komunikace – železnice
HABD	Hot Axle Bearing Detection	Detekce horkoběžnosti nápravy
TSI	Technical Specifications Interoperability	Technické Specifikace Interoperability
CCS	Control Command and Signalling	Subsystém Řízení a Zabezpečení
FRS	Functional Requirements Specification	Specifikace funkčních požadavků
SRS	System Requirements Specification	Specifikace systémových požadavků
ERA	European Union Agency for Railways	Agentura Evropské Unie pro železnice
MA	Movement Authority	Oprávnění k jízdě
EoA	End of Authority	Konec oprávnění k jízdě
MRSP	Most Restrictive Speed Profile	Nejvíce omezující aktuální rychlostní profil
CSM	Ceiling Speed Monitoring	Kontrola nejvyšší dovolené rychlosti
TSM	Target Speed Monitoring	Kontrola cílové rychlosti
RSM	Release Speed Monitoring	Kontrola uvolňovací rychlosti
BG	Balise Group	Balízová skupina
LEU	Lineside Electronic Unit	Traťová jednotka
RBC	Radio Block Centre	Radiobloková centrála
KMC	Key Management Centre	Centra správy klíčů
BTS	Base Transceiver Station	Základnová stanice
OBU	On-Board Unit	Mobilní část ETCS
EVC	European Vital Computer	Řídicí počítač
BTM	Balise Transmission Module	Přenosový modul balízy
DMI	Driver-Machine Interface	Zobrazovací jednotka
JRU	Juridical Recording Unit	Záznamová jednotka
RIU	Radio Infill Unit	Doplňkové radiové obvody
LRBG	Last Relevant Balise Group	Poslední přečtená balízová skupina
FS	Full Supervision	Základní režim plného dohledu
LS	Limited Supervision	Režim omezeného dohledu
OS	On Sight	Režim jízdy podle dohledu
SR	Staff Responsible	Režim plné odpovědnosti strojvedoucího za jízdu vlaku
SH	Shunting	Režim posunu
PS	Passive Shunting	Posun ve vícenásobné trakci
SL	Sleeping	Režim, kdy je vozidlo řízeno dálkově
SB	Stand By	Základní režim
TR	Trip	Stav signalizující zásah nouzové brzdy
SF	System Failure	Stav detekující chybu
IS	Isolation	Izolace nouzové brzdy od systému
NP	No Power	Stav, kdy vozidlová část není napájena
NL	Non Leading	Režim vícenásobné trakce, když je vozidlo řízeno dálkově
RV	Reversing	Režim změny směru jízdy
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System	Budoucí železniční mobilní komunikační systém
SvL	Supervised Location	Dohlížené místo
LoA	Limit of Authority	Omezené oprávnění k jízdě
EBD	Emergency Brake Deceleration	Křivka nouzového brzdění
EBI	Emergency Brake Intervention	Zásah nouzové brzdy
SBI	Service Brake Intervention	Zásah provozní brzdy
W	Warning	Upozornění
P	Permitted	Povolená rychlost
I	Indication	Indikace
TCO	Traction Cut Off	Příkaz k odpojení trakce
MRDT	Most Relevant Displayed Target	Nejvíce omezující zobrazený cíl

ÚVOD

V důsledku historického vývoje železničního systému v evropských státech postupně vznikala i jednotlivá národní zabezpečovací zařízení, včetně různých vlakových zabezpečovačů. To následně znamenalo nekompatibilitu železničních hnacích vozidel při přepravě mezi různými státy Evropské unie. Nevýhodou např. českého vlakového zabezpečovače je jeho neschopnost zabránit projetí návěstí „stůj“ a kontrolovat maximální dovolenou rychlost vlaku. Za bezpečnou jízdu vlaku tedy plně zodpovídá strojvedoucí. Z těchto důvodů vznikla iniciativa pro vznik jednotného evropského systému řízení vlakové dopravy ERTMS (European Rail Traffic Management System), jehož součástí je jednotný evropský vlakový zabezpečovač (ETCS). Jednotné řízení železniční dopravy v rámci Evropské unie značně přispívá k tzv. interoperabilitě, což znamená postupné vytváření jednotného evropského železničního prostoru. To mj. vytváří nutnost sjednocovat provozní a technická pravidla a požadavky. Interoperabilita se týká mnoho oblastí železniční dopravy, které se označují jako tzv. subsystémy. ETCS je součástí subsystému „Řízení a zabezpečení“ (Control Command and Signalling – CCS).

Cílem této diplomové práce je v první řadě popsat obecný princip fungování ETCS, především pak způsob dohledu ETCS na snižování rychlosti vlaku, blížícího se ke konci oprávnění k jízdě. S tímto souvisí stanovování brzdných křivek a dohledových limitů, jejichž charakteristice, významu a způsobu výpočtu bude taktéž věnována pozornost. V další části této práce bude popsána funkce brzdového systému železničních vozidel. Zásadní je pak hodnocení brzdného účinku železničních vozidel a znalost chování pneumatické brzdy, jelikož tyto záležitosti jsou následně využity pro výpočetní část této práce. Tyto znalosti jsou dále využity pro tvorbu matematického modelu, umožňujícího nasimulovat reálný průběh brzdění vlaku. Tento matematický výpočetní model je založen na numerickém řešení pohybové rovnice vlaku. Poslední kapitola zhodnocuje a porovnává dosažené výsledky.

1 JÍZDA VLAKU POD DOHLEDEM ETCS

Tato kapitola se zabývá nejprve obecným principem zabezpečení jízdy kolejových vozidel, a následně bude popsáno fungování vlakového zabezpečovače ETCS (European Train Control System). Informace v této kapitole jsou převzaty ze zdroje [1].

1.1 Zabezpečení jízdy kolejových vozidel

Oproti jiným druhům dopravy má kolejová doprava několik principiálních výhod, mezi které patří zejména pevně definovaná jízdná dráha, kdy jsou vozidla vedena kolejí. Díky tomuto je možno bezpečně dosahovat vysokých rychlostí. Další výhodou je malá deformace ocelových kol a kolejnic při jejich vzájemném kontaktu a s ní související nízký odpor z valení, a tedy nižší energetická náročnost kolejové dopravy. Toto však s sebou nese i určité nevýhody. Vedení kolejových vozidel kolejí má za následek, že se jednotlivá vozidla či vlaky nemohou vzájemně vyhnout, dostanou-li se na stejnou kolej. Dále kontakt ocelové kolo–kolejnice vykazuje kromě nízkého odporu z valení také nízký součinitel adheze. V důsledku toho je adhezními brzdami dosažitelná jen relativně nízká hodnota zpomalení, což v kombinaci s vysokými rychlostmi vede i k velmi dlouhým zábrzdným drahám. V důsledku tohoto je potřeba kvalitativně vyššího způsobu zabezpečení jízdy kolejových vozidel.

K zabezpečení jízdy vlaků se tedy používají zabezpečovací zařízení. Železničním zabezpečovacím zařízením se rozumí soubor technických prostředků a vazeb mezi nimi, které přispívají ke zvýšení bezpečnosti železničního provozu. Na železniční zabezpečovací zařízení se pohlíží jako na systém bezpečnostně-kritický. Tento systém tedy přejde do bezpečného stavu v případě poruchy (fail-safe). Železniční zabezpečovací zařízení se obecně dělí na:

- staniční zabezpečovací zařízení;
- traťová zabezpečovací zařízení;
- přejezdová zabezpečovací zařízení;
- zařízení pro automatizaci a mechanizaci spádovišť;
- vlakové zabezpečovače.

Tato práce je zaměřena na vlakový zabezpečovač ETCS, proto bude dále věnována pozornost vlakovým zabezpečovačům.

1.2 Vlakové zabezpečovače

Traťová a staniční zabezpečovací zařízení přispívají ke zvýšení bezpečnosti železničního provozu, ale to pouze za podmínky, že se jimi vlak řídí (jsou-li respektována strojvedoucím). Tato zásadní podmínka byla podnětem pro vývoj kontrolních systémů, jejichž účelem je zajistit samočinné zastavení vlaku v případě nebezpečí. Jedná se o tato zařízení:

- zařízení pro kontrolu bdělosti strojvedoucího, která jsou schopna zasáhnout, pokud strojvedoucí ztrácí kontrolu nad vozidlem;
- zařízení pro kontrolu činnosti strojvedoucího (vlakové zabezpečovače):
 - vlakové zabezpečovače bez souvislé kontroly rychlosti;
 - vlakové zabezpečovače se souvislou kontrolou rychlost.

Zařízení pro kontrolu bdělosti strojvedoucího není vlakovým zabezpečovačem v pravém slova smyslu, jelikož toto zařízení nedokáže zareagovat na nerespektování návěstí.

Každý vlakový zabezpečovač sestává z traťové (stacionární) části a z vozidlové (mobilní) části. Důvodem je potřeba přenášet informace (hlavně návěstní znaky) z trati na vozidlo. Podle způsobu přenosu informací lze vlakové zabezpečovače rozdělit na:

- bodové vlakové zabezpečovače (k přenosu informací dochází jen v definovaných místech);
- liniové vlakové zabezpečovače (přenos informací z trati na vozidlo je průběžný).

Výhodou bodového zabezpečovače je obvykle znalost přesné vzdálenosti k místu požadovaného zastavení, protože traťové informační body bývají umístěny v úrovni návěstidel. Díky tomu lze v principu kontrolovat, zda vlak při přijetí omezujícího návěstního znaku požadovaným způsobem snižuje rychlost, a v případě potřeby samočinně zastavit. Nevýhodou bodového systému je necitlivost na změnu návěstního znaku, která by mohla nastat po přijetí informace z trati na vozidlo.

U liniového vlakového zabezpečovače je díky spojitému přenosu dat z traťové části na vozidlo informace o změně návěstního znaku k dispozici ihned, ale většinou není přesně známa aktuální vzdálenost k požadovanému místu zastavení, což značně komplikuje kontrolu procesu brzdění.

V současné době existuje v jednotlivých státech Evropy více než 20 různých, vzájemně nekompatibilních vlakových zabezpečovačů, což je jedna z nejvýznamnějších překážek interoperability. Vybavení vozidla všemi různými vlakovými zabezpečovači, které jsou používány v Evropě, je neproveditelné.

Příkladem liniového vlakového zabezpečovače je československý LS/MIREL. Ten umožňuje přenos čtyř základních návěštních znaků (stůj, výstraha, snížení rychlosti, volno) na stanoviště strojvedoucího. Traťovou část tvoří vysílač, obvykle umístěný v úrovni návěštidla, a který prostřednictvím kolejových obvodů vysílá kód směrem k vozidlu. Na vozidle je před prvním dvojkolím umístěný snímač. Tento kód je vyhodnocován a zobrazován strojvedoucímu ve formě návěštních znaků na tzv. návěštním opakovači. Specifikem zabezpečovače LS je jeho sloučení s funkcí kontroly bdělosti strojvedoucího. Systém LS prakticky nekontroluje dovolenou rychlost jízdy, a tedy ani její snižování k návěštidlu zakazujícímu další jízdu. MIREL je vývojově novější vozidlová část zabezpečovače, a která již pracuje s brzdými křivkami.

1.3 European Train Control System (ETCS)

Východiskem ze situace, kdy interoperabilitu hnacích kolejových vozidel významně komplikuje různorodost vlakových zabezpečovačů používaných v Evropě, je snaha o zavedení jednotného evropského vlakového zabezpečovacího zařízení. Počátek těchto snah se datuje na přelom 80. a 90. let 20. století, kdy Evropská komise nejprve iniciovala analýzu stávajícího stavu a následně vznikla na popud Mezinárodní železniční unie (UIC) v rámci *European Rail Research Institute (ERRI)* pracovní skupina, která měla za úkol specifikovat požadavky na jednotný evropský vlakový zabezpečovač. Výsledkem byla definice evropského systému řízení vlakové dopravy ERTMS (European Rail Traffic Management System), který se skládá z následujících součástí:

- ETCS (European Train Control System), tedy jednotný evropský vlakový zabezpečovací systém;
- EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network), tedy jednotný evropský systém hlasového a datového rádiového spojení založený na bázi GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway);
- HABD (Hot Axle Bearing Detection), tedy systém detekce horkoběžnosti nápravových ložisek;
- systém detekce vlaků.

Základními součástmi systému ERTMS jsou ETCS a GSM-R, tedy tzv. subsystém řízení a zabezpečení (CCS). Požadavky na celý subsystém jsou definovány v příslušných *technických specifikacích interoperability* (TSI CCS), které jsou od roku 2012 jednotné pro

vysokorychlostní i konvenční železniční systém, přičemž aktuální vydání TSI CCS pochází z roku 2016. TSI CCS dělí zabezpečovací zařízení do dvou tříd:

- systémy třídy A, definující cílový stav evropských železnic, tudíž do této kategorie patří pouze ETCS a GSM-R;
- systémy třídy B, což je seznam původních národních vlakových zabezpečovačů.

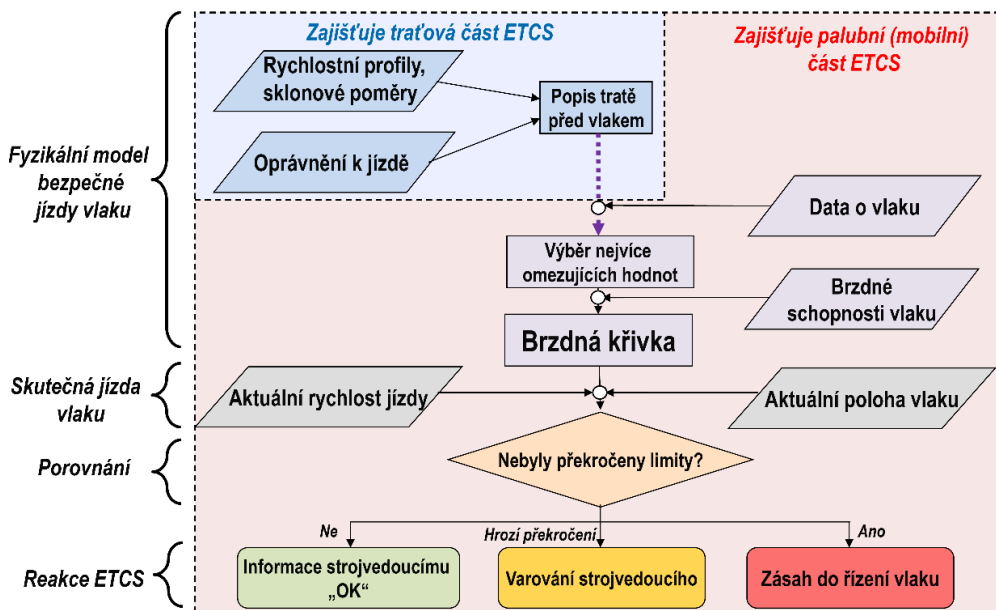
Protože se ETCS na základě požadavků provozovatelů drah a provozních zkušeností postupně vyvíjí, vznikají různé verze tohoto systému. Vlastnosti ETCS a jeho součásti jsou proto v jednotlivých verzích definovány příslušnými specifikacemi. Ty zahrnují:

- specifikace funkčních požadavků (FRS – Functional Requirements Specification), které se zabývají provozními záležitostmi;
- specifikace systémových požadavků (SRS – System Requirements Specification), jejichž cílem je zajištění technické kompatibility.

Tyto specifikace jsou seskupovány do tzv. *SUBSETů*, které jsou zveřejňovány na stránkách Agentury Evropské Unie pro železnice (European Union Agency for Railways – ERA). Tyto *SUBSETy* jsou v současné době jsou dostupné ve dvou základních skupinách, označovaných jako Baseline – Baseline 2 a Baseline 3. Z hlediska specifikace systémových požadavků pro ETCS je základním dokumentem *SUBSET-026*.

1.3.1 Obecný princip funkce ETCS

Obecný princip systému ETCS je zachycen na obrázku 1.

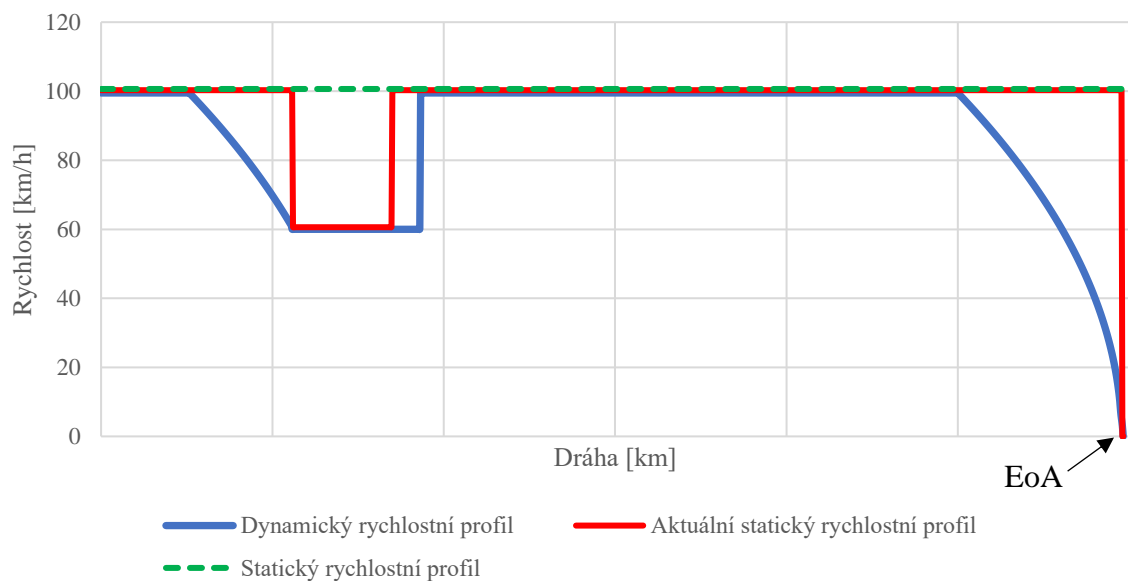


Obrázek 1 - obecné schéma fungování ETCS

Z obrázku 1 je patrné, že ETCS (skládající se z traťové a palubní části) příslušně reaguje na porovnání skutečné jízdy vlaku s fyzikálním modelem bezpečné jízdy vlaku (daným údaji o trati a vlaku). Základní princip funkce ETCS spočívá v tom, že traťová část předává vozidlové části tzv. oprávnění k jízdě (MA – Movement Authority) a vozidlová část nepřetržitě kontroluje rychlost vlaku. K tomu slouží rychlostní profily, které definují nejvyšší dovolenou rychlost vlaku v každém místě na trati. Je třeba rozlišovat:

- statický rychlostní profil, který je dán trvalými rychlostními omezeními (rychlostníky) a dočasnými rychlostními omezeními (pomalé jízdy). Mohou také existovat statické rychlostní profily pro různé kategorie vozidel, omezené např. dovolenou hodnotou nedostatku převýšení při průjezdu obloukem;
- aktuální statický rychlostní profil, který vychází ze statického rychlostního profilu a zohledňuje aktuální podmínky provozu, např. jízda odbočnou větví výhybky nebo zastavení v místě konce oprávnění k jízdě (EoA – End of Authority). Pro daný vlak je tak vždy ze všech kategorií rychlostních omezení vybrán nejvíce omezující aktuální rychlostní profil (MRSP – Most Restrictive Speed Profile);
- dynamický rychlostní profil, který vychází z aktuálního statického rychlostního profilu a zohledňuje parametry vlaku, především jeho délku a aktuální brzdný účinek s ohledem na traťové poměry (podélný sklon trati).

Vzájemný vztah rychlostních profilů je uveden na obrázku 2.



Obrázek 2 - rychlostní profily ETCS a konec oprávnění k jízdě (EoA)

Zdroj: autor

Činnost systému ETCS je pak založena na tom, že aktuální statický rychlostní profil je společně s MA a s dalšími informacemi o trati předáván vozidlové části, která na základě údajů o aktuálních brzdících schopnostech vlaku (brzdící procenta, resp. brzdná charakteristika) a o aktuálních sklonových poměrech trati vypočte dynamický rychlostní profil a v každém místě na trati kontroluje, zda skutečná rychlost vlaku nepřesahuje rychlost danou dynamickým rychlostním profilem. V případě, že by došlo k překročení maximální dovolené rychlosti, pak je iniciován zásah vlakového zabezpečovače (rychločinné, případně provozní brzdění). Jedná se o dohled ETCS na jízdu vlaku, který může probíhat ve dvou režimech – CSM (Ceiling Speed Monitoring) a TSM (Target Speed Monitoring). CSM je kontrola dovolené rychlosti v oblasti, kde může vlak jet bez nutnosti brzdit k cíli. Při překročení dovolené rychlosti o příslušnou toleranci (4 až 5 km/h) je strojvedoucí na překročení rychlosti upozorněn a při větším překročení dovolené rychlosti pak následuje zásah provozní, případně nouzové brzdy. TSM je kontrola dovolené rychlosti v oblasti, kde se strojvedoucímu zobrazují specifické informace týkající se cíle, a ve které vlak brzdí k cíli. Kontrole rychlosti při brzdění k cíli bude věnována bližší pozornost dále. Ještě existuje režim dohledu RSM (Release Speed Monitoring), což je kontrola rychlosti v oblasti blízko EoA, kde je vlaku povoleno jet uvolňovací rychlostí (Release Speed), aby se mohl snáze přiblížit k EoA [3].

Uvedená koncepce činnosti ETCS tak zajišťuje velmi vysokou úroveň bezpečnosti, protože kromě kontroly respektování návěstidel umožňuje také nepřetržitou kontrolu rychlosti (na rozdíl od některých starších národních vlakových zabezpečovačů, včetně v ČR používaného systému LS). Údaje, se kterými ETCS pracuje, mohou být také využity systémem pro automatizaci jízdy vlaku. Kromě toho lze na vozidlo přenášet i další informace, např. údaje o změnách napěťových systémů, nefunkčních přejezdech atd. V závislosti na tom, jakým způsobem se přenášejí informace mezi traťovou a vozidlovou částí (na zapojení ETCS do stávajícího zabezpečovacího zařízení, a na možnostech zjišťování volnosti koleje) existují různé aplikační úrovně ETCS, označované jako *levely* (L), blíže viz oddíl 1.3.2. Jednotlivým aplikačním úrovním musí odpovídat vybavení traťové a vozidlové části ETCS.

Stacionární (traťová) část je vybavena v závislosti na konkrétní aplikační úrovni alespoň některými z následujících prvků:

- **eurobalízy**, které mohou být buď proměnné (používané pouze v L1), nebo neproměnné. Tyto balízy slouží jako informační body pro předávání informací v podobě telegramů z traťové části na část vozidlovou, tedy k lokalizaci vlaku na trati. Pro možnost rozlišit

i směr jízdy se umísťují balízy ve formě balízových skupin (BG – Balise Group), většinou po dvojicích. Dvojice neproměnných balíz je vidět na obrázku 3;

- **traťové jednotky** (LEU – Lineside Electronic Unit), které v L1 slouží jako rozhraní mezi ETCS a stávajícím zabezpečovacím zařízením na dané trati, a které generují telegramy předávané vozidlu proměnnými balízami. LEU zprostředkovávají vazbu na návěstidla a mohou být buď centralizované (LEU je vázána na stavědlo), a decentralizované (LEU je vázána na každé jednotlivé návěstidlo);
- **radioblokové centrály** (RBC – Radio Block Centre), které zprostředkovávají rozhraní mezi ETCS a stávajícím zabezpečovacím zařízením dané trati v L2 a L3;
- **centra správy klíčů** (KMC – Key Management Centre), jejichž funkcí je zajištění správy šifrovacích klíčů, používaných pro zabezpečení komunikace traťové a vozidlové části přes GSM-R;
- **základnové stanice** (BTS – Base Transceiver Station), které slouží jako vysílače a přijímače signálu GSM-R;
- **doplňkové prvky** (eurosmyčky a doplňkové radiové obvody), které v L1 slouží pro dodatečný přenos informací, tam kde je to účelné, a to mimo proměnné balízy.



Obrázek 3 - dvojice neproměnných balíz

Zdroj: [2]

Mobilní část (OBU – On-Board Unit) ETCS je složena z těchto součástí:

- **řídící počítač** (EVC – European Vital Computer), tedy řídicí počítač, který zabezpečuje funkce OBU ETCS a zprostředkovává vazbu na řídicí systém vozidla;
- **přenosový modul balízy** (BTM – Balise Transmission Module), jehož součástí je balízová anténa umístěná na spodku vozidla, která nepřetržitě vysílá signál o frekvenci

27 MHz pro indukční napájení balíz, z nichž přijímá telegramy. Přenosový modul balízy (BTM) je možné vidět na obrázku 4;

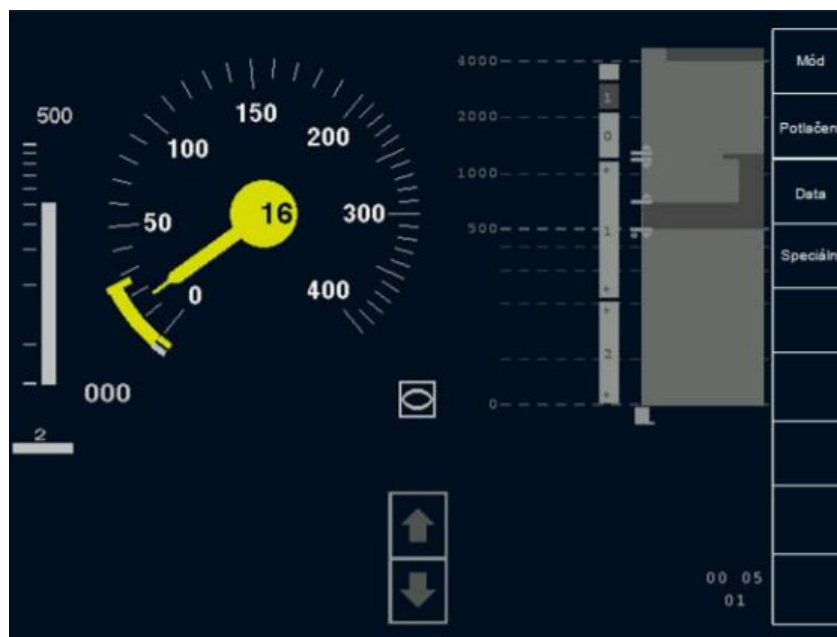
- **zobrazovací jednotka** (DMI – Driver-Machine Interface), což je displej na stanovišti strojvedoucího a slouží ke komunikaci vozidlové části se strojvedoucím;
- **záznamová jednotka** (JRU – Juridical Recording Unit), která slouží k ukládání provozních dat a plní funkci „černé skříňky“ v případě mimořádných událostí;
- **system odometrie**, který měří rychlost a ujetou vzdálenost (jedná se o dva nezávislé systémy – snímač otáček dvojkolí a Dopplerův radar);
- **vozidlová část (radiostanice) GSM-R**, která sice není přímo součástí ETCS jakožto vlakového zabezpečovače (podobně jako stacionární část GSM-R), nicméně tvoří jednotný prostředek pro komunikaci s vlakem v L2 a L3.



Obrázek 4 - přenosový modul balízy na spodku vozidla

Zdroj: [4]

Zobrazovací jednotka ETCS strojvedoucímu zobrazuje především aktuální rychlost s rozlišením, zda je dohlížena konstantní rychlost (CSM), nebo je kontrolováno brzdění vlaku k cíli (TSM), případně je dohlíženo nepřekročení uvolňovací rychlost (RSM). V případě kontroly brzdění k cíli je vyznačena cílová rychlost. Dále je strojvedoucímu zobrazována platnost MA, aktuální aplikační úroveň ETCS, sklonové poměry trati atd. Zobrazovací jednotku (DMI) při dohledu v oblasti brzděné křivky (TSM) s cílovou rychlostí 0 km/h je možné vidět na obrázku 5.



Obrázek 5 - DMI při dohledu v oblasti brzdné křivky s cílovou rychlostí 0 km/h

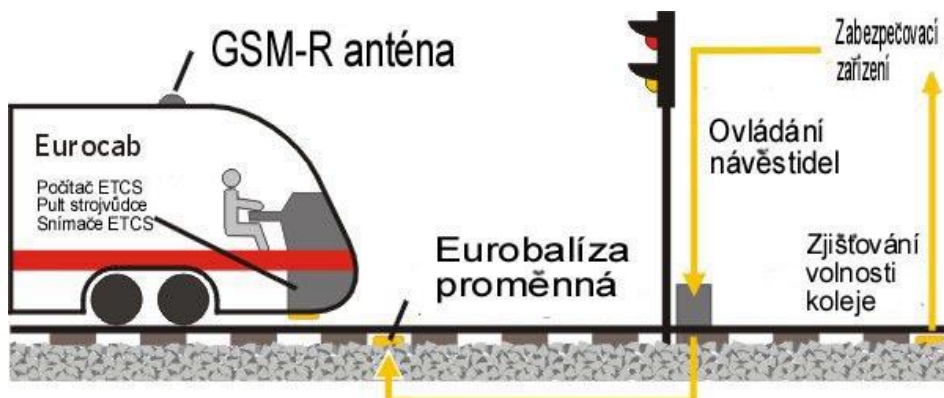
Zdroj: [5]

1.3.2 Aplikační úroveň ETCS

ETCS L1

V principu se jedná o bodový vlakový zabezpečovač s pevnou polohou prostorových oddílů, který využívá konvenční prostředky pro zjišťování volnosti koleje a klasická návěstidla. Konvenčními prostředky pro zjišťování volnosti koleje se rozumí kolejové obvody a počítače náprav. Jako rozhraní ke stávajícímu traťovému a staničnímu zabezpečovacímu zařízení zde slouží LEU, které ke komunikaci s vozidlovou částí využívají proměnné balízy. Proměnnými balízami se předávají vozidlu zejména informace týkající se aktuálního statického profilu a MA. Neproměnné balízy pak slouží k lokalizaci vlaku na trati a k předávání neproměnných informací. Pro informování strojvedoucího o změně návěstního znaku po jeho přijetí z poslední přečtené proměnné balízy se využívají klasická návěstidla. Jedná se např. o situaci, kdy vlak zastaví v místě pravidelného zastavení ve stanici, a poslední přečtená proměnná balíza informovala o tom, že na konci koleje je konec MA (návěst stůj na odjezdovém návěstidle). Když se pak na tomto odjezdovém návěstidle rozsvítí návěst volno, tak ETCS stále signalizuje, že vlak jede proti návěsti stůj. Vlak to tedy musí respektovat a sníženou rychlostí se přiblížit k další proměnné balíze (u zmíněného odjezdového návěstidla), aby obdržel aktualizovanou informaci o prodloužení MA. Kvůli eliminaci tohoto nedostatku bodových zabezpečovačů (necitlivost na změnu návěstního znaku po jeho přijetí) mohou být v některých místech využity

i eurosmyčky (Euroloop) nebo doplňkové rádiové obvody (RIU – Radio Infill Unit), případně tzv. „infill balízy“. Obecné schéma ETCS L1 je možné vidět na obrázku 6.

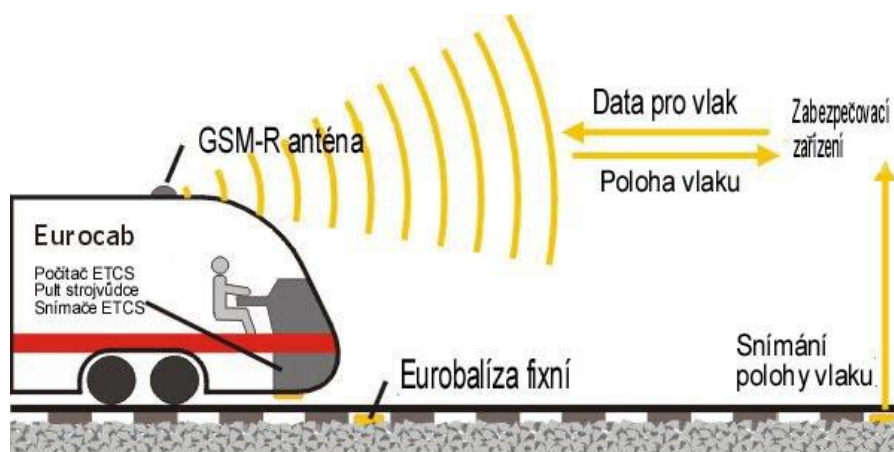


Obrázek 6 - obecné schéma ETCS L1

Zdroj: [6]

ETCS L2

V principu se jedná o liniový vlakový zabezpečovač s pevnou polohou prostorových oddílů, který využívá konvenční prostředky pro zjišťování volnosti koleje. ETCS L2 již nepotřebuje pro svoji činnost návěstidla (za podmínky, že všechna vozidla na trati jsou vybavena mobilní částí ETCS, tedy pro tzv. výhradní provoz). Také způsob komunikace vozidlové a traťové části je odlišný od ETCS L1. Rozhraní ke stávajícímu staničnímu a traťovému zabezpečovacímu zařízení zde tvoří RBC, které informace o aktuálním statickém rychlostním profilu spolu s MA předávají vozidlové části každého vlaku adresně pomocí technologie GSM-R, a to v podstatě nepřetržitě. Obecné schéma ETCS L2 je možné vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 - obecné schéma ETCS L2

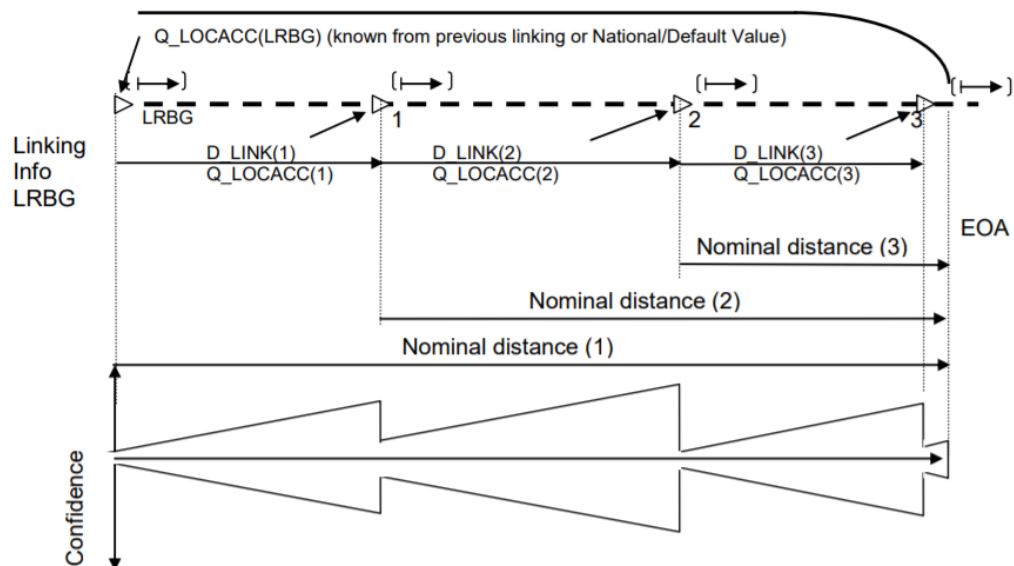
Zdroj: [6]

K lokalizaci vlaku na trati zde slouží neproměnné balízy. K měření ujeté vzdálenosti od poslední přečtené balízy slouží (stejně jako v aplikačních úrovních L1 a L3) impulsní snimače

otáček na nápravách a Dopplerův radar. Vlak potom poskytuje traťové části informaci o své poloze (tzv. Position Report), jehož součástí je informace o poslední přečtené balizové skupině (LRBG – Last Relevant Balise Group). Všechny informace související s polohou, přenášené z traťové části na vozidlo musí být používány palubním zařízením s přihlédnutím k tzv. intervalu spolehlivosti (Confidence Interval) vůči poloze vlaku, pokud je to nezbytné pro bezpečný provoz. Interval spolehlivosti vůči poloze vlaku se vztahuje ke vzdálenosti od LRBG, přičemž musí být zohledněna:

- palubní podhodnocená a nadhodnocená přečtená hodnota (přesnost systému odometrie plus chyba v detekci BG);
- přesnost umístění LRBG.

Informace o vzdálenosti obdržené z trati se vyhodnotí na palubě jako nominální informace (bez zohlednění jakýchkoli tolerancí). Interval spolehlivosti se zvětšuje s rostoucí vzdáleností ujeté od LRBG v závislosti na přesnosti systému odometrie, dokud není vynulován (tedy v momentě, kdy se jiná BG stane LRBG). Typickým příkladem využití intervalu spolehlivosti je stanovení bezpečné polohy čela vlaku (tzv. Max Safe Front End), která je důležitá při kontrole brzdění vlaku k cíli, tedy zejména při dohledu na respektování konce oprávnění k jízdě. Průběh intervalu spolehlivosti v závislosti na ujeté dráze od LRBG je možné vidět na obrázku 8.

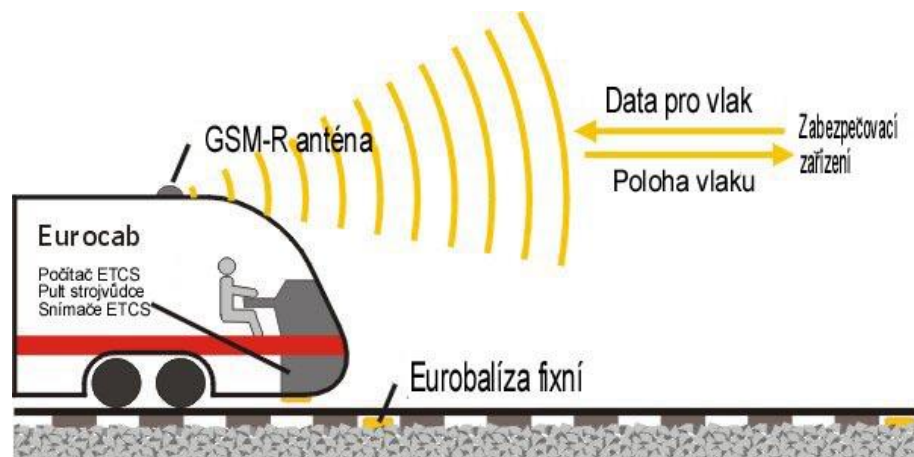


Obrázek 8 - vývoj intervalu spolehlivosti v závislosti na ujeté dráze od LRBG

Zdroj: [3]

ETCS L3

Jedná se o liniový vlakový zabezpečovač s pohyblivými prostorovými oddíly proměnné délky bez návěstidel. Princip funkce ETCS L3 je podobný jako v L2. K předávání aktuálního statického rychlostního profilu a MA se využívá GSM-R. Rozhraní k stávajícímu staničnímu a traťovému zabezpečovacímu zařízení také tvoří RBC a k lokalizaci vlaku na trati se rovněž používají neproměnné balízy. Odlišnost je v tom, že zde nejsou použity konvenční prostředky pro kontrolu volnosti koleje, ale vlak sám kontroluje svoji celistvost. Informaci o své poloze, délce a celistvosti hlásí RBC. Toto umožňuje nahrazení pevných prostorových oddílů tzv. pohyblivým oddílem (Moving Block), což přispívá ke zvýšení propustnosti a kapacity trati. Také to zlevňuje její výstavbu, protože není potřeba zřizovat návěstidla a kolejové obvody nebo počítače náprav. Obecné schéma ETCS L3 je možné vidět na obrázku 9.



Obrázek 9 - obecné schéma ETCS L3

Zdroj: [6]

1.3.3 Režimy ETCS

Součástí specifikace systémových požadavků uvedené v *SUBSETu-026* [3] je definice režimů, ve kterých může ETCS fungovat:

- **Full Supervision (FS)**, tedy základní režim plného dohledu mobilní části ETCS nad jízdou vlaku. Tento mód nemůže být vybrán strojvedoucím, ale vozidlová část ETCS do něj přejde automaticky, pokud jsou k dispozici všechna potřebná data o vlaku i o trati, které umožňují dohled nad jízdou vlaku vzhledem k dynamickému rychlostnímu profilu;
- **Limited Supervision (LS)**, tedy režim omezeného dohledu, který umožňuje vozidlu vybavenému pouze mobilní částí ETCS provoz i v oblastech, kde traťová část neposkytuje kompletní informace pro provoz v režimu FS. Mobilní část ETCS tak

dohlíží na jízdu vlaku jen v takovém rozsahu, v jakém to umožňuje traťová část, a zodpovědnost za jízdu vlaku náleží strojvedoucímu, který je povinen řídit se návěstidly, rychlostníky a národními předpisy;

- **On Sight (OS)** je označení režimu jízdy podle rozhledu, který umožňuje např. vjezd vlaku na obsazenou kolej. Vozidlová část ETCS kontroluje v tomto režimu nepřekročení maximální dovolené rychlosti, která je dána národní hodnotou, ale strojvedoucí je zodpovědný za zastavení vlaku před případnou překážkou;
- **Staff Responsible (SR)** je režim, kde strojvedoucí přebírá plnou zodpovědnost za jízdu vlaku. Tento mód může být využit v případech, kdy systém není zorientován (např. ihned po oživení vozidla, při poruše traťové části ETCS atd.). V tomto režimu je také kontrolována maximální rychlost (národní hodnota), podobně jako v režimu OS.
- **Shunting (SH)**, tedy režim posunu. V tomto režimu není nutné zadávat všechna data o vlaku (např. délka, hmotnost, brzdící schopnosti), jelikož se tyto údaje velmi často mění, a to z důvodu odvěšování a přivěšování vozů. Dohled ETCS nad vozidlem je v režimu SH silně omezen (např. mu dovolí projet návěstidlo). Omezena je pouze oblast, ve které může posun probíhat (Shunting Area). Pokud to např. bude celá stanice, systém ETCS by posunující díl zastavil až přibližně v úrovni vjezdového návěstidla. Souvisí to s tím, že pokud nejsou známy brzdící schopnosti (často se mění), tak není možné vypočítat příslušné brzděné křivky. Kromě toho lokomotiva může vozy i sunout, tudíž odhadovat maximální bezpečnou polohu čela vlaku (Max Safe Front End) je téměř nemožné.
- **Passive Shunting (PS)**, který umožňuje, aby s daným vozidlem bylo posunováno ve vícenásobné trakci, přičemž toto vozidlo není řízeno dálkově;
- **Sleeping (SL)**, je režim, kdy je dané vozidlo řízeno dálkově z jiného vozidla;
- **Standy By (SB)**, je základní mód, který nemůže být vybrán strojvedoucím a který např. po oživení vozidla signalizuje, že mobilní část ETCS je funkční. V tomto režimu je mobilní část ETCS zodpovědná za udržení vlaku v klidu;
- **Trip (TR)**, je stav, který signalizuje zásah mobilní části ETCS do nouzové brzdy. Mobilní část ETCS je v tomto režimu zodpovědná za zastavení vlaku a jeho udržení v klidu, přičemž je strojvedoucímu indikována příčina zásahu zabezpečovače;
- **Post Trip (PT)**, je režim, který je vyvolán v případě, že strojvedoucí potvrdí režim TR, a je podmínkou k uvolnění nouzové brzdy. V režimu PT mobilní část ETCS kontroluje

dovolený pohyb vlaku zpět až do maximální (národně specificky definované) vzdálenosti;

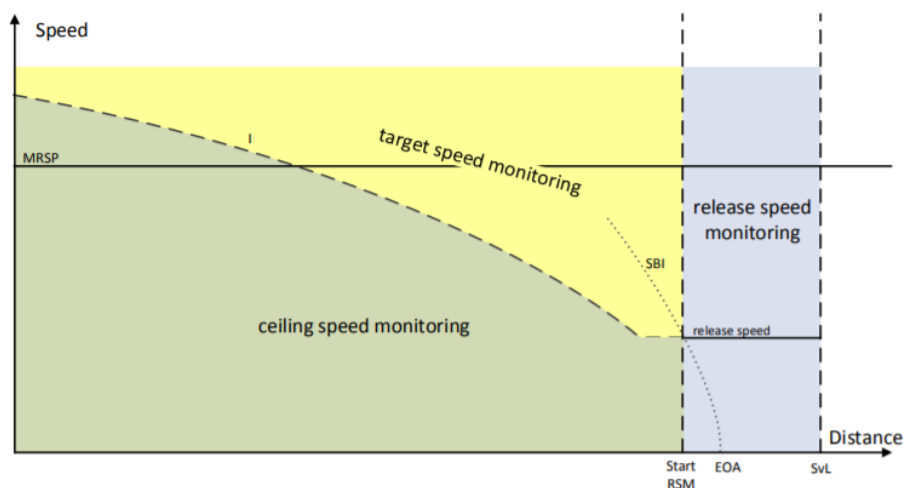
- **System Failure (SF)**, je stav, kdy systém detekuje chybu, která má vliv na bezpečnost;
- **Isolation (IS)** je stav, kdy mobilní část ETCS nemůže zasahovat do jízdy vlaku, protože je (vlivem zásahu strojvedoucího) fyzicky izolována od brzdového systému;
- **No Power (NP)**, je stav, kdy vozidlová část ETCS není napájena;
- **Non Leading (NL)**, je režim, který se využívá v případě vícenásobné trakce, ale na rozdíl od režimu SL jen tehdy, když dané vozidlo není ovládáno dálkově;
- **Reversing (RV)** je označení režimu, který strojvedoucímu umožňuje změnit směr jízdy a zároveň ovládat jízdu vlaku ze stejného stanoviště. Použití tohoto režimu je možné pouze ve vybraných oblastech na trati.

1.4 Technologie GSM-R

Jak již bylo zmíněno, pro komunikaci vozidlové a traťové části ETCS v L2 a L3 se využívá technologie GSM-R, která současně plní funkci evropsky jednotné „vysílačky“. Technologie GSM-R je proto současným mezinárodním standardem bezdrátové komunikace, určeným pro drážní aplikace, založeným na specifikacích GSM a EIRENE a určeným pro rychlosti až do 500 km/h. V rámci zavedeného systému ERTMS se tak GSM-R využívá pro hlasovou i datovou komunikaci, k čemuž z důvodu požadované spolehlivosti využívá vlastní síť základnových stanic (BTS). Výhledově (patrně kolem roku 2030) by měla být technologie GSM-R nahrazena systémem, který je dnes označován jako FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), protože pro zamýšlené objemy dat, související např. s automatizací provozu, přestane GSM-R postačovat. Proto by FRMCS mělo být založeno na 5G sítích.

2 BRZDĚNÍ VLAKU POD DOHLEDEM ETCS

Zatímco v předchozí kapitole byly popsány základní principy fungování ETCS a byly také zmíněny dva základní režimy dohledu ETCS nad jízdou vlaku (CSM a TSM), předmětem této kapitoly je problematika brzdění vlaku, blížícího se pod plným dohledem ETCS (L2) ke konci oprávnění k jízdě (EoA). Jedná se tedy o režim dohledu TSM (Target Speed Monitoring), kterému zde bude věnována bližší pozornost. Jednotlivé režimy dohledu ETCS jsou znázorněny na obrázku 10. Zatímco v režimu CSM (Ceiling Speed Monitoring) je v zásadě kontrolováno pouze to, zda není překračována dovolená rychlost více, než kolik činí dovolená tolerance, v režimu TSM musí palubní část ETCS kontrolovat, zda vlak snižuje rychlost takovým způsobem, aby v definovaném místě (cíl) byla bezpečně dosažena definovaná cílová rychlost. Informace v této kapitole jsou převzaty ze zdroje [3].



Obrázek 10 - režimy dohledu ETCS na jízdu vlaku

Zdroj: [3]

2.1 Stanovení cílů

Cíl je definován polohou cíle a cílovou rychlostí, na kterou musí vlak před dosažením této polohy zpomalit. Mobilní část přitom dohlíží na seznam cílů, který může zahrnovat následující typy cílů:

- místa odpovídající snížení rychlosti MRSP (v kontextu obecného principu funkce ETCS jde o aktuální statický rychlostní profil pro daný vlak), která se nacházejí před maximální bezpečnou polohou čela vlaku;
- konec oprávnění k jízdě (EoA), resp. dohlížené místo (SvL – Supervised Location), což je místo, kam se až vlak může svým čelem dostat, pokud by projel EoA (aniž by ohrozil

jízdu jiných vlaků). Toto se týká situací, kdy na infrastruktuře existují prokluzové vzdálenosti;

- omezení oprávnění k jízdě (LoA – Limit of Authority), tedy cíl s nenulovou cílovou rychlostí;
- případně místa odpovídající maximální dovolené vzdálenosti ujeté v režimu SR (s nulovou cílovou rychlostí).

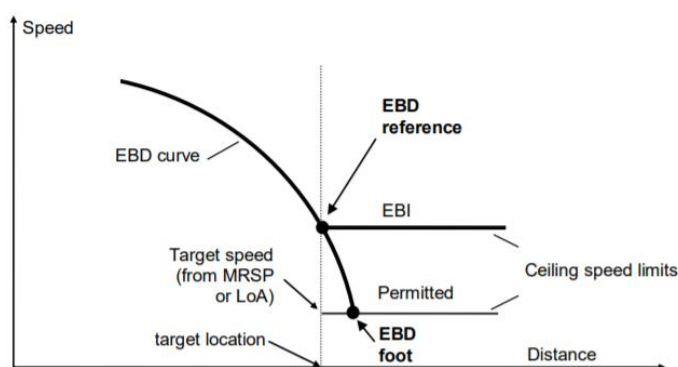
Seznam dohlížených cílů je v průběhu jízdy vlaku průběžně aktualizován (na základě aktualizace MA, ujeté dráhy ve vztahu k MRSP apod.).

2.2 Stanovení brzdných křivek

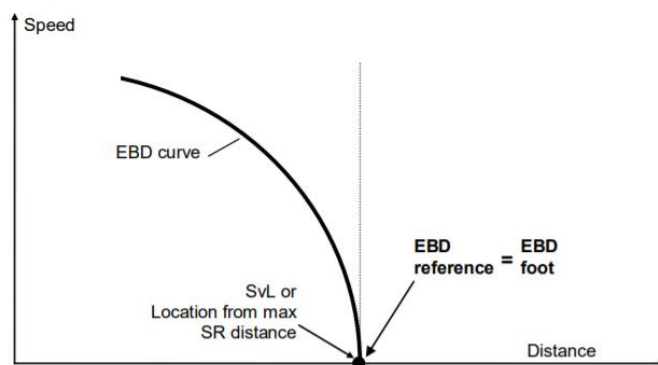
Za účelem kontroly procesu brzdění k cíli musí palubní část ETCS používat brzdné křivky vztahující se ke sledovaným cílům (v kontextu obecného principu ETCS jde o stanovení dynamického rychlostního profilu). Tvar těchto brzdných křivek je závislý na rychlosti (zpomalení vlaku je obecně definováno jako funkce rychlosti) a vzdálenosti k cíli (pro každou polohu je dána hodnota podélného sklonu, která ovlivňuje dosažitelné zpomalení). Brzdná křivka se vypočítá po částech, tj. bude složena z propojených oblouků paraboly, z nichž každý je založen na jedné z hodnot brzdného zpomalení závislých na rychlosti/vzdálenosti.

2.2.1 Křivka nouzového brzdění (EBD)

Jedná se o základní brzdnu křivku, kterou mobilní část ETCS používá. Tato brzdná křivka EBD (Emergency Brake Deceleration) představuje předpokládaný dráhový průběh rychlosti vlaku při nouzovém brzdění k cíli. V závislosti na tom, jestli je cílová rychlost nulová (EoA) nebo nenulová (LoA), existují dva typy EBD křivek. Jejich schémata jsou znázorněna na obrázcích 11 a 12.



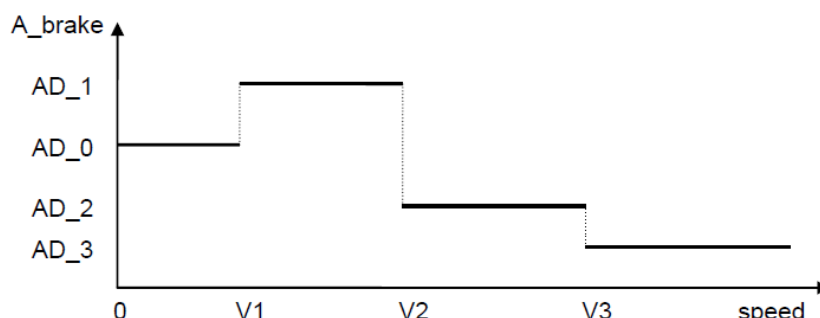
Obrázek 11 - křivka EBD s cílem LoA



Obrázek 12 - křivka EBD s cílem SvL (EoA)

Zdroj: [3]

S ohledem na specifika české infrastruktury (nejsou zde prokluzové vzdálenosti) je SvL shodné s EoA. S tímto případem je také počítáno v této práci. Výpočet EBD křivky vychází z brzdného zpomalení v závislosti na rychlosti, kterým je popsán brzdný účinek každého vlaku. Brzdící schopnosti vlaku jsou popsány buď brzdícími procenty, a pak se použije tzv. konverzní model (lambda způsob), nebo jsou brzdící schopnosti vlaku popsány přímo touto závislostí, získanou na základě zkoušek (gamma způsob). Obecný tvar takové závislosti je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13 – popis brzdného účinku vlaku pomocí závislosti brzdného zpomalení na rychlosti

Zdroj: [3]

Výpočet EBD křivky využívá tzv. bezpečného zpomalení, označovaného jako $A_{safe}(V,d)$. Při jeho stanovení musí být zohledněny určité korekční faktory dané parametry vlaku a trati. Základní vzorec pro stanovení bezpečného zpomalení $A_{safe}(V,d)$ je následující:

$$A_{safe}(V,d) = A_{brake_safe}(V,d) + A_{gradient}(d) \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (1)$$

kde:

$A_{brake_safe}(V,d)$ – bezpečné zpomalení nouzové brzdy (viz dále) $[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$;

$A_{gradient}(d)$ – zpomalení dané sklonem koleje (viz dále) $[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$.

Výpočet $A_{gradient}(d)$ vychází z úpravy pohybové rovnice vlaku, a jeho výpočet je uveden i ve zdroji [3]:

$$A_{gradient}(d) = \frac{s \cdot g}{1000 + 10 \cdot M_{rot}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (2)$$

kde:

s – sklon trati [%];

g – gravitační zrychlení (9,81) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

M_{rot} – ekvivalentní hmotnost rotačních hmot, vyjádřená jako procento celkové hmotnosti vlaku [%].

Protože se tato práce zabývá brzděním nákladních vlaků, jejichž brzdící účinek je popsán pomocí brzdících procent, bude zde diskutován pouze způsob lambda. Výpočet bezpečného zpomalení nouzové brzdy ($A_{brake_safe}(V,d)$) je v takovém případě následující:

$$A_{brake_safe}(V,d) = Kv(V) \cdot Kr(L_{vl}) \cdot A_{be}(V) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3)$$

kde:

$Kv(V)$ – integrovaný korekční faktor závislý na rychlosti [-];

$Kr(L_{vl})$ – integrovaný korekční faktor závislý na délce vlaku [-];

$A_{be}(V)$ – zpomalení nouzové brzdy, které je stanovené pomocí tzv. konverzního modelu (viz dále) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$].

Není-li národními hodnotami stanoveno jinak, použijí se v souladu s [3] defaultní hodnoty integrovaných korekčních faktorů $Kv(V) = 0,7$ a $Kr(L_{vl}) = 0,9$. Dále je uveden postup výpočtu tzv. základního zpomalení AD_0 , které je jakožto základní hodnota obecné charakteristiky v $A_{be}(V)$ (viz obrázek 13) využito při výpočtech bezpečného zpomalení nouzové brzdy ($A_{brake_safe}(V,d)$), resp. bezpečného zpomalení, označovaného jako $A_{safe}(V,d)$. K výpočtu $A_{be}(V)$ z brzdících procent slouží konverzní model. Postup výpočtu $A_{be}(V)$ je při použití konverzního modelu následující:

Prvním krokem je výpočet tzv. limitní rychlost V_{lim} . Vzorec pro její výpočet je následující:

$$V_{lim} = 16,85 \cdot \lambda_0^{0,428} \quad [\text{km/h}] \quad (4)$$

kde:

λ_0 – brzdící procenta vlaku [%].

Dále, pokud maximální rychlost vlaku patří do intervalu $0 \text{ km/h} - V_{lim}$, pak je základní zpomalení AD_0 (viz obrázek 13) možné vypočítat:

$$AD_0 = 0,0075 \cdot \lambda_0 + 0,076 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (5)$$

kde:

λ_0 – brzdící procenta vlaku [%].

V opačném případě se postupuje podle postupu definovaného konverzním modelem, a dosažitelné zpomalení je pak odstupňováno v jednotlivých rychlostních pásmech (viz obrázek 13). V případě nákladních vlaků provozovaných do rychlosti 100 km/h je většinou V_{lim} větší než maximální dovolená rychlost vlaku (V_{max}), a proto je $A_{be}(V) = AD_0$, tedy konstantní. Bezpečné zpomalení $A_{safe}(V, d)$ je užito pro výpočet dráhy nouzového brzdění EBD. Jedná se o základní vzorec z fyziky pro již zmíněný předpoklad, že brzdné zpomalení bude konstantní v celém rychlostním pásmu 0 km/h – V_{max} :

$$d(EBD) = \frac{v_0^2}{2 \cdot A_{safe}(V, d)} \quad [m] \quad (6)$$

kde:

v_0 – rychlost, ze které vlak brzdí [m/s];

$A_{safe}(V, d)$ – bezpečné zpomalení [$m \cdot s^{-2}$].

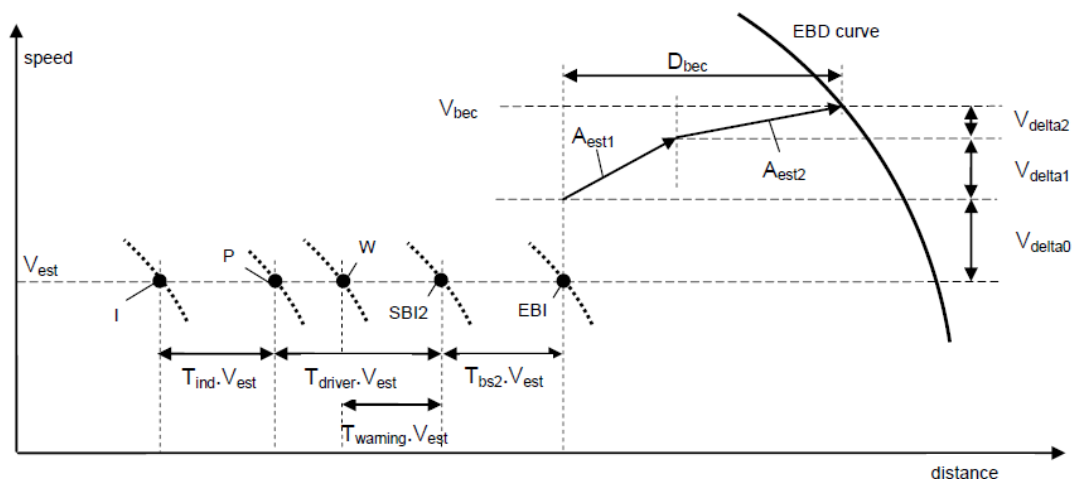
2.3 Stanovení dohledových limitů

Aby pohyb vlaku mohl kopírovat brzdnou křivku EBD (a tedy zastavit bezpečně v požadovaném místě i v případě, že by strojvedoucí sám požadovaným způsobem nesnižoval rychlost vlaku), musí dojít ve vhodný okamžik k zásahu nouzové (případně provozní) brzdy.

Pro ETCS je za tímto účelem definováno šest dohledových limitů. Jsou to:

- zásah nouzové brzdy (EBI – Emergency Brake Intervention);
- zásah provozní brzdy (SBI – Service Brake Intervention);
- upozornění (W – Warning);
- povolená rychlost (P – Permitted);
- indikace (I – Indication);
- místo začátku sledování uvolňovací rychlosti.

Tyto dohledové limity a jejich vzájemné posuny jsou znázorněny na obrázku 14.



Obrázek 14 - dohledové limity

Zdroj: [3]

Účelem dohledového limitu EBI je zajistit, že vlak nepřekročí v místě cíle cílovou rychlost (resp. při brzdění k EoA bezpečně zastaví v požadovaném místě). Účelem všech ostatních dohledových limitů je pomoci strojvedoucímu zabránit zásahu nouzové brzdy udržováním rychlosti vlaku v příslušných mezích.

Porovnáním rychlosti a polohy vlaku s různými dohledovými limity generuje palubní zařízení příkazy k brzdění (Emergency/Service Brake Intervention – EBI/SBI), příkazy k odpojení trakce (Traction Cut Off – TCO) a příslušné informace pro strojvedoucího. Informace zobrazované strojvedoucímu se vybírají podle následujících stavů dohledu funkce sledování rychlosti a vzdálenosti: normální stav (Normal status), stav indikace (Indication status), stav překročení rychlosti (Overspeed status), stav varování (Warning status) a stav zásahu (Intervention status). Palubní zařízení přitom musí strojvedoucímu vždy zobrazovat informace o cíli (cílová rychlost a vzdálenost k cíli) vztahující se v daném okamžiku k jednomu cíli – tzv. Most Relevant Displayed Target (MRDT). MRDT se vybere mezi dohlíženými cíli, u kterých je překročen indikační dohledový limit.

2.3.1 Výpočet dohledového limitu EBI

Princip výpočtu všech dohledových limitů je takový, že jsou určitým způsobem představeny před křivku nouzového brzdění EBD. Je to dáno tím, že musí dojít k včasnému brzdění (v krajním případě zásahu nouzové brzdy), aby vlak bezpečně zastavil před EoA. V návaznosti na obrázek 14 se při určité odhadované (resp. měřené) počáteční rychlosti obecně předpokládá, že vlak zrychluje se zrychlením A_{est1} . Stanovení limitu EBI pak vychází z toho, že je to vzdálenost od místa na křivce EBD při rychlosti V_{bec} (která je na základě počáteční rychlosti

V_{est} vypočtena s ohledem na nepřesnosti měření rychlosti, a s ohledem na možné zrychlování o hodnotě D_{bec} . Přijme-li se zjednodušující předpoklad, že počáteční zrychlení je nulové (záporné dle specifikací ani být uvažováno nemůže), a neuvažuje-li se nepřesnost měření rychlosti, pak platí, že D_{bec} je rovno součinu V_{est} a T_{be} (viz vztah (9) dále). Konverzní model uvádí nejprve nutnost výpočtu tzv. základní doby náběhu nouzové brzdy, značené $T_{brake_basic_eb}$. Výpočet pro režim brzdění G je následující:

$$T_{brake_basic_eb} = 12 + 0,05 \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad [s] \quad (7)$$

kde:

L – délka vlaku [m].

Dále se v případě lambda způsobu vypočítá tzv. bezpečná doba náběhu nouzové brzdy, značená T_{be} :

$$T_{be} = T_{brake_basic_eb} \cdot Kt_{int} \quad [s] \quad (8)$$

kde:

$T_{brake_basic_eb}$ – základní doba náběhu nouzové brzdy [s];

Kt_{int} – integrovaný korekční faktor pro dobu náběhu [-].

Není-li národními hodnotami stanoveno jinak, použije se v souladu s [3] defaultní hodnota integrovaného korekčního faktoru $Kt_{int} = 1,1$. T_{be} lze (podobně jako $A_{safe}(V,d)$) získat dvěma způsoby – buď přímo (měřením a je to součást dat o vlaku – metoda gama), nebo zpětně pomocí konverzního modelu (s využitím režimu brzdění a délky vlaku). Práce je zaměřena na konverzní model (metodu lambda), protože je zde vybrán nákladní vlak, jehož brzdící schopnosti jsou popsány brzdícími procenty.

Následně je možné vypočítat samotnou vzdálenost EBI od EoA:

$$d(EBI) = d(EBD) + v_0 \cdot T_{be} \quad [m] \quad (9)$$

kde:

$d(EBD)$ – délka EBD křivky [m];

v_0 – rychlost, ze které vlak brzdí [m/s];

T_{be} – bezpečná doba náběhu nouzové brzdy [s].

Doba náběhu znamená to, že ETCS při zásahu EBI předpokládá, že během této doby prodlevy ještě nedochází k brzdění. Po uplynutí této doby začne probíhat brzdění kopírující křivku EBD. Další postup závisí na tom, jestli je, nebo není povoleno používat provozní brzdu. V případě, že povolena není platí, že EBI=SBI2. Je-li povolena, počítá se – analogicky k limitu EBI – limit SBI2, jehož předsunutí před EBI limit je dáno součinem počáteční rychlosti a doby náběhu

provozní brzdy (která se opět počítá pro lambda vlaky pomocí konverzního modelu na základě znalosti režimu brzdění a délky vlaku). Koeficienty v příslušných vztazích jsou oproti nouzové brzdě jiné (uvedeny ve zdroji [3]).

2.3.2 Výpočet dohledového limitu W

Dohledový limit W dává strojvedoucímu určitý prostor na reakci, resp. že při překročení tohoto limitu je strojvedoucí (vizuálně a akusticky) varován, že může dojít k zásahu ETCS do řízení (Warning status). Vzdálenost dohledového limitu W od EoA je možné stanovit podle vzorce:

$$d(W) = d(EBI) + v_0 \cdot T_{warning} \quad [m] \quad (10)$$

kde:

$d(EBI)$ – délka křivky EBI (SBI2) [m];

v_0 – rychlost, ze které vlak brzdí [m/s];

$T_{warning}$ – doba mezi dohledovým limitem W a EBI (SBI2) [s].

$T_{warning} = 2$ s (hodnota uvedena ve zdroji [3]).

2.3.3 Výpočet dohledového limitu P

Jde o dovolenou rychlost, při jejímž překročení má strojvedoucí ještě prostor na reakci, ale je upozorněn, že již překročil dovolenou rychlost. Vzdálenost dohledového limitu P od EoA je možné stanovit podle vzorce:

$$d(P) = d(EBI) + v_0 \cdot T_{driver} \quad [m] \quad (11)$$

kde:

$d(EBI)$ – délka křivky EBI (SBI2) [m];

v_0 – rychlost, ze které vlak brzdí [m/s];

T_{driver} – reakční doba strojvedoucího mezi dohledovými limity P a EBI (SBI2) [s].

$T_{driver} = 4$ s (hodnota uvedena ve zdroji [3]).

2.3.4 Výpočet dohledového limitu I

Jedná se o upozornění strojvedoucího, že se nachází v oblasti TSM. Vzdálenost dohledového limitu I od EoA je možné stanovit podle vzorce:

$$d(I) = d(P) + v_0 \cdot (5 + T_{driver}) \quad [m] \quad (12)$$

kde:

$d(P)$ – délka křivky P [m];

v_0 – rychlost, ze které vlak brzdí [m/s];

T_{driver} – reakční doba strojvedoucího mezi dohledovými limity P a EBI (SBI2) [s].

3 BRZDOVÝ SYSTÉM KOLEJOVÝCH VOZIDEL

S cílem zajistit bezpečné zastavení vlaku (resp. snížení jeho rychlosti) v požadovaném místě využívají vlakové zabezpečovače včetně ETCS vazbu na brzdový systém vlaku a v případě nebezpečí obvykle aktivují nouzovou brzdu. V této kapitole je proto popsáno, jaké principy využívají, a jak fungují brzdy železničních vozidel. Brzdu železničních vozidel (např. nákladních vozů) lze rozdělit na mechanickou část, která slouží k samotnému vytvoření brzdné síly na obvodu kol, a na pneumatickou část brzdy, která slouží k regulaci brzdného účinku. Informace v této kapitole jsou převzaty ze zdroje [7].

3.1 Mechanická část brzdy

Mechanická část brzdy zajišťuje distribuci přítlaču od jeho zdroje, kterým je na vozidle brzdový válec, na jednotlivé třecí plochy. Přítlačná síla F_p je v tomto případě vyvolána působením tlaku vzduchu v brzdovém válci a na brzdové zdrže je přenášena přes tzv. pákoví, což je mechanismus umístěný na spodku vozidla. Skládá se z převodnic, pák, táhel, čepů, stavěče odlehlosti zdrží, rozpory zdrží atd. Výpočet přítlačné síly je dán vztahem:

$$F_p = \left(\frac{\pi \cdot D_{BV}^2}{4} \cdot p_{BV} - O_{VP} - O_{SZ} \right) \cdot i \cdot \eta \quad [\text{N}] \quad (13)$$

kde:

D_{BV} – průměr brzdového válce [m];

p_{BV} – tlak v brzdovém válci [Pa];

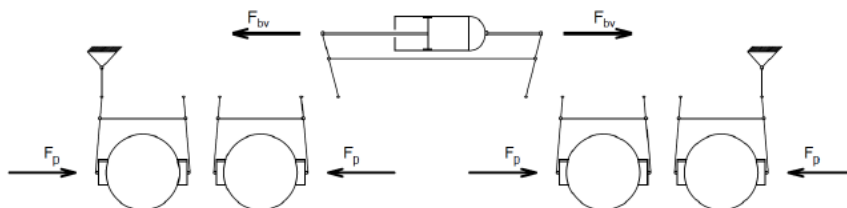
O_{VP} – odpor vratné pružiny brzdového válce [N];

O_{SZ} – odpor stavěče odlehlosti zdrží [N];

i – převod pákoví (daný poměrem ramen použitých brzdových pák) [-];

η – účinnost převodu pákoví [-].

Mechanická část brzdového systému čtyřnápravového nákladního vozu je schematicky znázorněna na obrázku 15.



Obrázek 15 - schéma mechanické části brzdy nákladního vozu

Ze znalosti patřičné síly lze stanovit brzdou sílu na obvodu kola, která je pro špalíkovou brzdou dána vztahem:

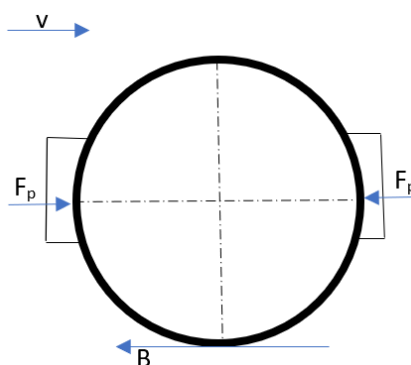
$$B = 2 \cdot f \cdot F_p \quad [\text{N}] \quad (14)$$

kde:

f – součinitel tření [-];

F_p – přítláčná síla na obvodu kol [N].

Vzájemný vztah přítláčné síly na obvodu kol a brzdné síly je znázorněn na obrázku 16.



Obrázek 16 - síly působící na dvojkol při vzniku brzdné díly na obvodu kol

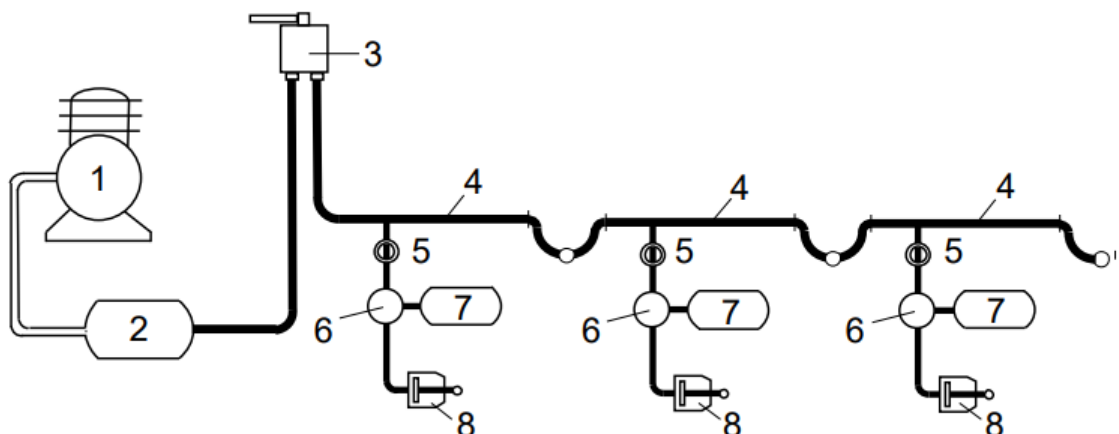
Zdroj: autor na podkladě [7]

3.2 Pneumatická část brzdy

Ze vztahu (13) plyne, že vznik přítláčné síly je spjat s působením tlaku vzduchu v brzdovém válci. Regulace tlaku vzduchu v brzdových válcích (ovládání brzd železničních vozidel) standardně zajišťuje pneumatická část brzdy. V současnosti se v evropské nákladní železniční dopravě používá výhradně samočinný pneumatický brzdový systém UIC, jehož parametry jsou definovány vyhláškou UIC 540. Samočinná brzda je taková, která při neúmyslném přerušení ovládacího vedení (v případě pneumaticky ovládané brzdy tedy hlavního potrubí) zaúčinkuje brzděním. Děje se to tak, že v případě přerušení hlavního potrubí dojde ke snížení tlaku v tomto potrubí, a tím se zvýší tlak v brzdovém válci, čímž dojde k aktivaci brzdné síly. Ve vyhlášce UIC 540 jsou např.:

- uvedeny základní požadavky na brzdu v mezinárodním železničním provozu;
- rozlišení režimů brzdění P (osobní) a G (nákladní);
- stanoveny hodnoty normálního provozního tlaku v hlavním potrubí a maximálního tlaku v brzdovém válci nebo definovány některé základní pojmy.

Funkční schéma samočinné pneumatické brzdy je možné vidět na obrázku 17.



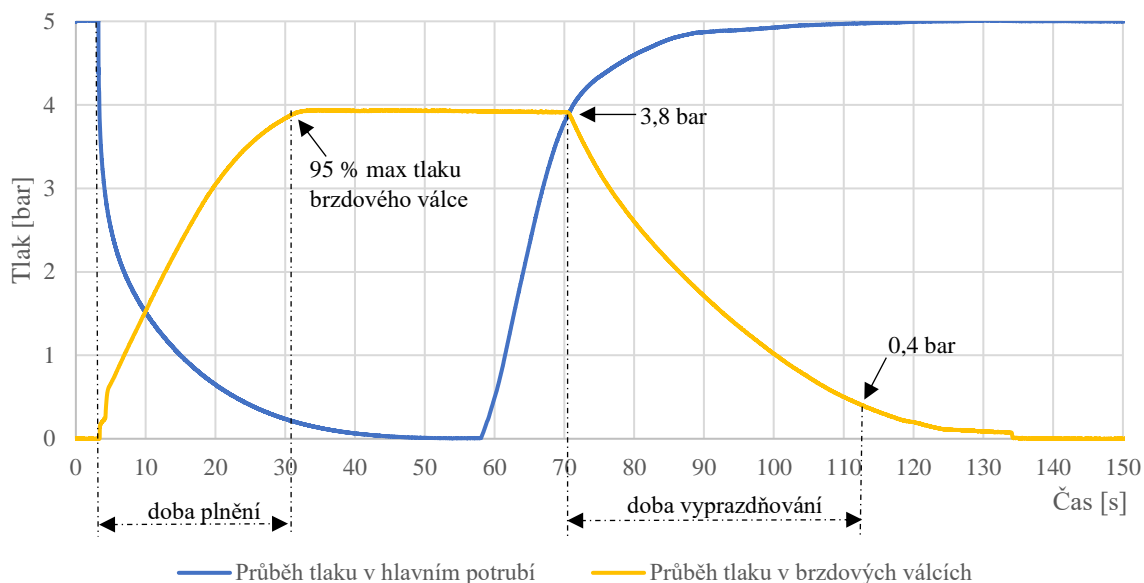
Obrázek 17 - schéma samočinné pneumatické brzdy

Zdroj: [9]

kde:

1 – kompresor; 2 – hlavní vzduchojem; 3 – brzdič nepřímé brzdy; 4 – hlavní potrubí; 5 – uzavírací kohout brzdy; 6 – rozvaděč; 7 – pomocný vzduchojem; 8 – brzdový válec

Pneumatická brzda využívá ke své činnosti stlačený vzduch v hlavní potrubí. Brzda přitom reaguje na změny tlaku v hlavní potrubí prostřednictvím rozvaděče. Při poklesu tlaku v hlavní potrubí dojde u vozů, které nejsou uzavíracím kohoutem vypnuty z brzdy, k plnění brzdových válců tlakovým vzduchem z pomocného vzduchojemu. Tlak vzduchu v brzdovém válci vyvodí sílu na pístnici tohoto válce, která se přenáší mechanickou částí brzdy na brzdové zdrže. Na příslušném dvojkolí se pak vyvozená přitlačná síla transformuje na brzdovou sílu na obvodu kol. Při opětovném zvýšení tlaku v hlavní potrubí dojde k odbrzdění, přičemž jsou brzdové válce odvětrávány do ovzduší a zároveň je prostřednictvím rozvaděčů doplňován stlačený vzduch z hlavního potrubí do pomocných vzduchojemů, díky čemuž je brzda připravena na další brzdění. Tlak vzduchu v hlavní potrubí je za běžných okolností regulován brzdičem, který je ovládán strojvedoucím. Při požadavku na brzdění je prostřednictvím brzdiče hlavní potrubí odvětráváno do ovzduší. Při požadavku na odbrzdění je hlavní potrubí přes brzdič doplňováno tlakovým vzduchem z hlavního vzduchojemu, který je zásobován stlačeným vzduchem pomocí kompresoru. Při náhlém úniku tlakového vzduchu z hlavního potrubí (např. vlivem roztržení vlaku nebo při aktivaci nouzové brzdy) dojde k rychločinnému brzdění. Průběh tlaku vzduchu v brzdových válcích a hlavní potrubí při rychločinném brzdění s vyznačením doby plnění a vyprazdňování brzdových válců je znázorněno na obrázku 18.



Obrázek 18 - průběh tlaku vzduchu v brzdových válcích a hlavním potrubí při rychločinném brzdění a následném úplném odbrzdění s vyznačením doby plnění a vyprazdňování brzdových válců

Zdroj: autor

Z hlediska účinku brzdy je zásadní funkce rozvaděčů na jednotlivých vozidlech, které zajišťují pozvolné plnění a odvětrávání brzdových válců, a tudíž i pomalý nárůst a pokles brzdící síly dosahované na obvodu kol jednotlivých vozidel. Důvodem záměrně pomalého nárůstu tlaku v brzdových válcích na počátku brzdění, zejména v režimu G, je snaha omezit podélné rázy vznikající v soupravě, které by mohly v extrémním případě vést až k přetržení vlaku nebo vykolejení. Podélné silové působení mezi jednotlivými vozidly řazenými ve vlaku při brzdění je důsledkem dvou skutečností:

- informace o požadavku na brzdění se šíří podél soupravy vlaku omezenou rychlostí, a proto vozidla v zadní části vlaku začínají brzdit později než vozidla v přední části vlaku;
- brzdící účinek jednotlivých vozidel nemusí být stejný.

Negativním důsledkem přechodových charakteristik brzdových rozvaděčů (zejména v režimu G) je prodlužování zábrzdných drah se všemi dopady na vlakovou dopravu. Kombinace doby prodlevy na začátku brzdění (doby, která uplyne od zadání požadavku na brzdění do počátku nárůstu tlaku v brzdových válcích) a relativně dlouhé doby plnění brzdových válců se přitom projevuje právě tehdy, když se vlak pohybuje v rámci procesu brzdění nejrychleji.

Přehled některých základních pojmů definovaných vyhláškou UIC 540:

- **Odbrzděný stav** – situace, kdy nedochází k vyvíjení brzděné síly. Toto nastává, je-li v hlavním potrubí jmenovitý tlak $p_{HP} = 5$ bar, v pomocném vzduchojemu $p_{PV} = 5$ bar a v brzdovém válci $p_{BV} = 0$ bar.
- **Rychločinné brzdění** – používá se k nouzovému zastavení vozidla. Při zavedení rychlobrzdy (strojvedoucím, vlakovým zabezpečovačem nebo při roztržení vlaku) dochází k rychlému úniku tlaku z hlavního potrubí, a proto tento stav nastává, je-li v hlavním potrubí tlak $p_{HP} = 0$ bar, v pomocném vzduchojemu $p_{PV} = 3,8$ bar a v brzdovém válci $p_{BV} = 3,8$ bar.
- **Provozní brzdění** – oproti rychločinnému brzdění je způsobeno jen částečným poklesem tlaku v hlavním potrubí ($p_{HP} = 3,5 - 5$ bar), při němž rozvaděč pustí z pomocného vzduchojemu do brzdového válce jen takový tlak, který je úměrný poklesu tlaku v hlavním potrubí ($p_{BV} = 0 - 3,8$ bar).
- **Doba plnění brzdového válce** – čas měřený od počátku nárůstu tlaku v brzdovém válci do doby dosažení 95 % hodnoty požadovaného tlaku. Tato doba se liší v závislosti na režimu brzdění. Pro režim P (I. způsob brzdění neboli osobní) je $t_{pP} = 3 - 5$ s. Pro režim G (II. způsob brzdění nebo nákladní) je $t_{pG} = 18 - 30$ s.
- **Náskok brzdy** – je označení pro počáteční část doby plnění brzdového válce, která se vyznačuje strmějším nárůstem tlaku. V této počáteční fázi ještě brzdění neprobíhá. Tlak v brzdovém válci dosažený na konci doby náskoku brzdy ($p_{BV} = 0,4 - 0,7$ bar) vyvolá sílu, která postačuje k vymezení vůlí v brzdovém pákoví a dolehnutí brzdových špalíků na jízdní plochu kol.
- **Odbrzďování** – je opětovné zvyšování tlaku v hlavním potrubí spojené s poklesem tlaku v brzdovém válci. Lze rozlišovat částečné a úplné odbrzďování. Prakticky všechny současné brzdové systémy jsou tzv. stupňovitě odbrzďovatelné, avšak starší konstrukce brzdových rozvaděčů umožňovaly pouze jednorázové odbrzďování.
- **Doba vyprazdňování brzdového válce** – je čas měřený od počátku poklesu tlaku v brzdovém válci do doby, kdy je dosaženo tlaku $p_{BV} = 0,4$ bar. Tato doba se opět liší v závislosti na zvoleném režimu brzdění. Pro režim P je $t_{vP} = 15 - 20$ s. Pro režim G $t_{vG} = 45 - 60$ s.
- **Průrazná doba** – čas, který uplyne od okamžiku, kdy strojvedoucí zadá brzdičem požadavek na brzdění, nebo od okamžiku počátku nárůstu tlaku v brzdovém válci prvního vozidla do okamžiku, kdy začne narůstat tlak v brzdovém válci posledního vozidla řazeného ve vlaku.

- **Průrazná rychlost** – je stanovena jako podíl délky hlavního potrubí a příslušné průrazné doby. Jde tedy o rychlost šíření signálu pro ovládání brzd v pneumatickém brzdovém systému. Průrazná rychlost musí být vyšší než $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.3 Hodnocení brzdícího účinku železničních vozidel

Brzdící účinek vlaku vyjadřuje schopnost vlaku snížit rychlost, resp. zastavit. Aby bylo možné kontrolovat rychlost jízdy vlaku vlakovým zabezpečovačem, je nutná znalost brzdícího účinku konkrétního vlaku. Jak je uvedeno v kapitole 2, jedním ze vstupů pro palubní část ETCS je závislost zpomalení nouzové brzdy na rychlosti vlaku na rovině, kterou je tedy možné brzdící účinek vlaku charakterizovat. Ověřování a hodnocení reálných brzdících schopností kolejových vozidel se provádí experimentálně – s využitím brzdových zkoušek. Brzdící účinek železničních vozidel může být definován dvěma způsoby:

- metoda gama, což je popis brzdného účinku takovým způsobem, že je vyjádřeno brzdou dosažitelné brzdné zpomalení na rychlosti (spolu s údajem o ekvivalentní době náběhu);
- metoda lambda, což je hodnocení pomocí brzdících procent.

Pro činnost ETCS je nutné charakterizovat brzdny účinek závislostí dosažitelného zpomalení na rychlosti, což je u metody gama zjišťováno přímo zkouškami. U metody lambda je tyto údaje nutno zjistit zpětně pomocí brzdících procent. U nákladních vlaků se používá metoda lambda, proto této metodě bude věnována bližší pozornost. Na základě výsledků těchto zkoušek se pro vozidla stanovují speciálně zavedené veličiny (brzdící procento a brzdící váha). Tyto veličiny vyjadřují schopnost brzdy zastavit na vodorovné koleji vozidlo (vlak) z určité počáteční rychlosti na určité zábrzdě dráze. Stanovením brzdících procent se zabývá vyhláška UIC 544-1, ve které je uvedena metodika jejich experimentálního zjišťování. Na základě zábrzděných drah změřených pro různé počáteční rychlosti a pro různé režimy brzdění tak lze s pomocí nomogramů uvedených ve vyhlášce určit brzdící procento λ pro tyto režimy brzdění. Brzdící procento λ tedy určitým způsobem kvantifikuje závislost mezi počáteční rychlostí jízdy vozidla (vlaku) a délkou zábrzdě dráhy ve vodorovné přímé koleji. Brzdící váha je pak dána vztahem [10]:

$$B_v = \frac{\lambda}{100} \cdot M \quad [t] \quad (15)$$

kde:

λ – brzdící procento [%];

M – hmotnost vozidla [t].

Hodnoty brzdící váhy v jednotlivých režimech brzdění má každé vozidlo uvedeno v technické dokumentaci a obvykle je vyznačeno na bočnici. Díky znalosti brzdících vah B_v (platných pro příslušný režim brzdění) a celkové hmotnosti M jednotlivých vozidel je možné následně stanovit brzdící procento vlaku, který je z těchto vozidel sestaven [10]:

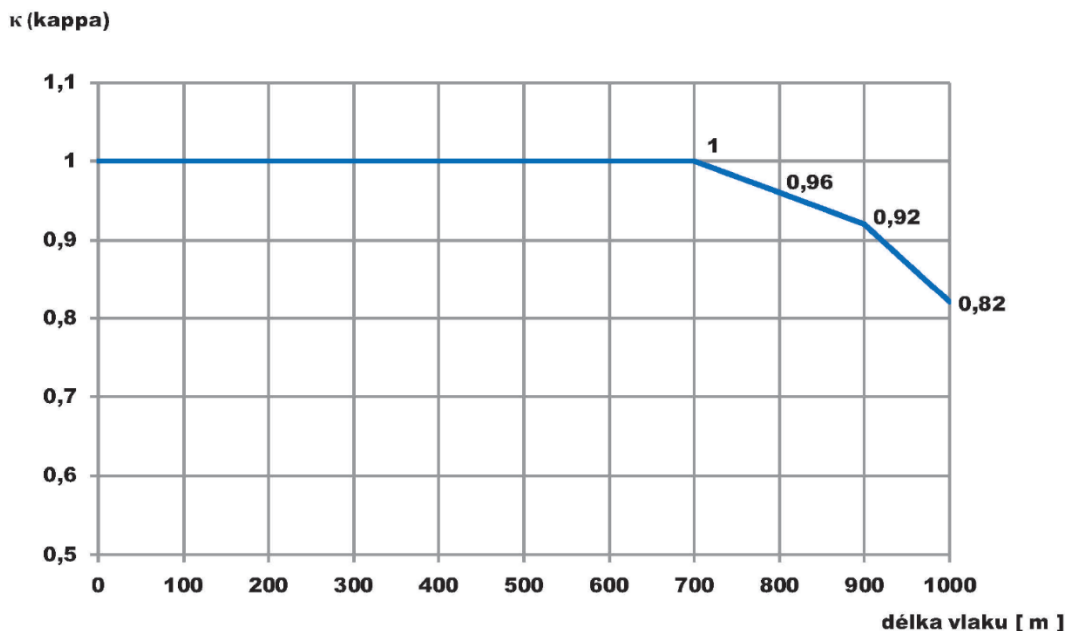
$$\lambda = \kappa \cdot \frac{\sum B_v}{\sum M} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

kde:

κ – koeficient kappa, který upravuje výslednou hodnotu brzdících procent vlaku pro dlouhé vlaky, a to v závislosti na použitém režimu brzdění (viz např. obrázek 19) [-];

$\sum B_v$ – celková brzdící váha všech vozidel napojených na brzdový systém [t];

$\sum M$ – celková hmotnost všech vozidel v soupravě [t].



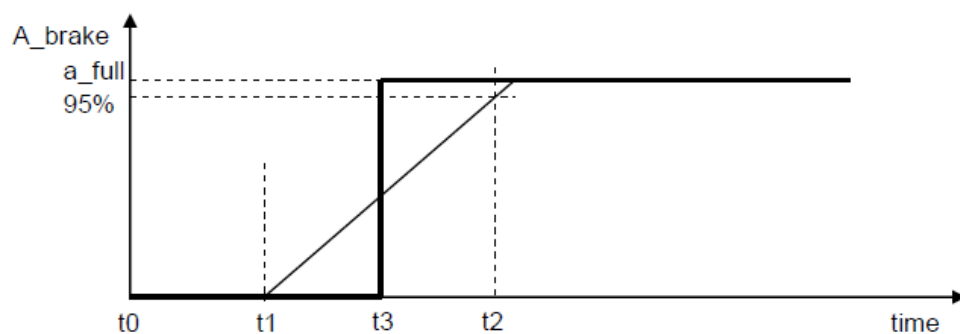
Obrázek 19 - závislost koeficientu kappa na délce vlaku brzděného v režimu G

Zdroj: [10]

Výměra brzdících procent, která je potřebná k bezpečnému provozu v určitém traťovém úseku určitou rychlostí, resp. obecně minimální požadovaný účinek brzdy, je pak charakteristikou infrastruktury. V tradičním pojetí požadovaná brzdící procenta zaručují, že zábrzdňá dráha vlaku z dovolené maximální rychlosti bude v daném traťovém úseku kratší než traťová zábrzdňá vzdálenost (vzdálenost od předvěsti k hlavnímu návestidlu). Skutečná brzdící procenta vlaku proto musí být vyšší nebo alespoň rovna požadovaným brzdícím procentům, která vycházejí z tabulek brzdících procent uvedených ve zdroji [10] a pro konkrétní traťové úseky a pro konkrétní vlaky se uvádějí v jízdním řádu.

V souvislosti se systémem vlakového zabezpečovače s kontrolou rychlosti (ETCS) se jeví jako problematický popis brzdících schopností vlaku jen pomocí brzdících procent, tedy tzv. metodou lambda. Brzdící procenta totiž definují jen vztah mezi počáteční rychlostí a délkou zábrzdne dráhy na rovině, a na rozdíl od popisu brzdících schopností vlaku brzdýmimi křivkami (metoda gama) nevyovídají nic o samotném průběhu brzdění.

Pro funkci ETCS je potřeba získat závislost zpomalení na rychlosti a ekvivalentní dobu náběhu brzdy, což se v případě metody lambda provádí (s vysokou mírou nejistoty) zpětně pomocí konverzního modelu. Doba náběhu je uvažována jako doba prodlevy plus polovina doby plnění brzdového válce, přičemž se uvažuje, že po tuto dobu vlak nebrzdí vůbec a ve druhé polovině doby plnění brzdových válců naopak brzdí plným účinkem (jedná se o určité zjednodušení reality, kdy se pozvolný nárůst nahrazuje skokovou funkcí). Toto zjednodušení je možné vidět na obrázku 20.



Obrázek 20 - skoková funkce doby náběhu brzdy

Zdroj: [3]

kde:

$t_0 - t_1$: doba prodlevy;

$t_1 - t_2$: nárůst brzdne síly na 95 % maxima (doba plnění brzdového válce);

$t_0 - t_3$: ekvivalentní doba náběhu brzdy.

4 VÝPOČTOVÝ MODEL BRZDĚNÍ NÁKLADNÍHO VLAKU

Pro zjištění skutečného chování nákladního vlaku při brzdění byl vytvořen matematický model v MS Excel. Tento model využívá principu numerické integrace pohybové rovnice vlaku. Pohybová rovnice vlaku má tvar [7]:

$$m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl}) \cdot \ddot{x} = F_{ok} - B - O_v - O_t \quad (17)$$

kde:

m_{vl} – celková hmotnost všech vozidel řazených ve vlaku [kg];

ρ_{vl} – hodnota součinitele rotačních hmot vlaku [-];

\ddot{x} – okamžitá hodnota zrychlení vlaku ve směru jízdy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

F_{ok} – celková tažná síla na obvodu kol [N];

B – celková brzdná síla na obvodu kol [N];

O_v – celkový vozidlový odpor všech vozidel řazených ve vlaku [N];

O_t – celkový traťový odpor všech vozidel řazených ve vlaku [N].

4.1 Princip numerického řešení pohybové rovnice vlaku

Proměnlivost sil, působících během brzdění na vlak vede k tomu, že brzdění vlaku lze obecně popsat jako pohyb nerovnoměrně zpomalený. Východisko numerického řešení spočívá v tom, že z pohybové rovnice vlaku (17) lze stanovit zrychlení v každém místě na trati [7]:

$$\ddot{x} = \frac{F_{ok} - B - O_v - O_t}{m_{vl} \cdot (1 + \rho_{vl})} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (18)$$

Princip, který se při numerickém řešení uplatňuje spočívá v rozdělení času na jednotlivé shodné dílčí kroky o velikosti Δt . V těchto jednotlivých dílčích časových krocích se uvažuje konstantní hodnota brzdného zpomalení. Díky tomu je možné nerovnoměrně zpomalený pohyb převést na souslednost navzájem navazujících rovnoměrně zpomalených pohybů. Postup výpočtů při řešení pohybu vlaku v závislosti na ujeté dráze lze shrnout do následujících bodů [7]:

- vyšetřovaný časový úsek, během kterého brzdění vlaku probíhá lze rozdělit na n dílčích časových kroků o velikosti Δt ;
- pro každý dílčí časový krok Δt lze určit s využitím vzorce (18) střední hodnotu zrychlení \ddot{x}_i ;
- jelikož se jedná o brzdění, bude tažná síla na obvodu kol F_{ok} rovna nule;
- brzdná síla B je specifickou veličinou, které bude dále věnována bližší pozornost.

- díky znalosti počáteční rychlosti v_i na začátku i -tého dílčího časového kroku Δt , a díky znalosti konstantního brzdného zpomalení v dílčích krocích Δt lze vypočítat rychlost v_{i+1} na konci i -tého kroku, která je zároveň počáteční rychlostí v kroku následujícím:

$$v_{i+1} = v_i + \ddot{x}_i \cdot \Delta t \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$

- protože hlavním výstupem tohoto modelování jsou brzděné křivky (závislost rychlosti na dráze), je potřeba stanovit i ujetou dráhu. Ujetou dráhu v každém dílčím kroku Δt lze stanovit pomocí vzorce:

$$\Delta x_i = v_i \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \ddot{x}_i \cdot \Delta t^2 \quad [\text{m}] \quad (20)$$

- výsledná zbrzděná dráha je rovna:

$$x = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad [\text{m}] \quad (21)$$

4.2 Výpočtový model pro brzdění nákladního vlaku a jeho parametry

Předlohou pro modelování brzdění vlaku byl kontejnerový vlak Nex43331 společnosti Metrans Rail ze dne 5.11.2021. Souprava byla složena z lokomotivy typu Bombardier TRAXX MS2e a 24 plošinových vozů pro přepravu kontejnerů. Z toho bylo 6 vozů šestnápravových řady Sggrss80 a 18 čtyřnápravových vozů řady Sggns80. Celý vlak byl brzděn v režimu „G“. Parametry vlaku jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 - základní parametry vybraného vlaku

Počet náprav	108
Délka všech vozů [m]	626
Celková hmotnost vozů [t]	1666
Režim brzdění	G
Brzdicí váha [t]	1654
Brzdicí procenta [%]	98
Hmotnost lokomotivy [t]	84
Vozidlový odpor	T4
Součinitel rotačních hmot vozů	0,03
Součinitel rotačních hmot lokomotivy	0,1

Zdroj: autor na podkladech [11]

Tyto parametry budou následně využity v matematickém modelu pro simulaci brzdění vlaku. Parametry jednotlivých vozidel řazených ve vlaku jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 - parametry jednotlivých vozidel vybraného vlaku

Vůz	Celková hmotnost [t]	Brzdící váha v režimu G [t]	Hmotnost prázdného vozu [t]	Počet náprav	Maximální přitlačná síla brzdových špalíků [kN]	Délka přes nárazníky [m]
Lokomotiva	84	73	-	4	-	19
1	60,180	60,180	21,500	4	215,15	25,94
2	69,289	69,289	21,500	4	254,93	25,94
3	80,900	77,000	21,500	4	265,70	25,94
4	76,000	76,000	21,500	4	265,70	25,94
5	46,865	46,865	21,500	4	162,78	25,94
6	90,730	90,730	25,070	6	325,15	26,39
7	49,500	49,500	21,500	4	172,60	25,94
8	49,500	49,500	21,500	4	172,60	25,94
9	92,656	92,656	24,270	6	334,63	26,39
10	57,214	57,214	21,500	4	202,90	25,94
11	59,200	59,200	21,500	4	211,07	25,94
12	97,760	97,760	24,050	6	360,46	26,39
13	63,764	63,764	21,500	4	230,42	25,94
14	52,020	52,020	24,020	6	165,92	26,39
15	80,900	77,000	21,500	4	265,70	25,94
16	70,860	70,860	21,500	4	262,11	25,94
17	49,500	49,500	21,500	4	172,60	25,94
18	102,810	102,810	24,340	6	387,04	26,39
19	63,420	63,420	21,500	4	228,93	25,94
20	59,828	59,828	21,500	4	213,68	25,94
21	80,900	77,000	21,500	4	265,70	25,94
22	57,329	57,329	21,500	4	203,36	25,94
23	58,876	58,876	21,500	4	209,72	25,94
24	95,900	95,900	27,500	6	350,93	26,39

Zdroj: autor na podkladech [11]

Vozidlový odpor je uvažován T4 (ložené čtyřnápravové vozy). Výpočet vypadá následovně [7]:

$$O_v = (1,3 + 0,00015 \cdot V^2) \cdot M \cdot g \quad [\text{N}] \quad (22)$$

kde:

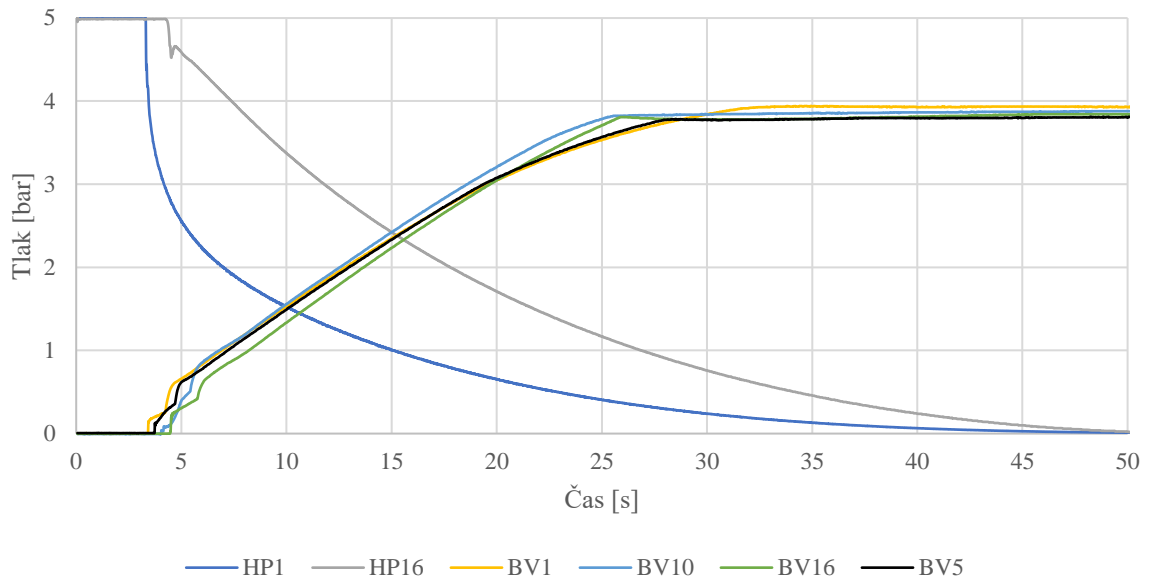
V – rychlost vlaku [km/h];

M – hmotnost soupravy [t];

g – gravitační zrychlení (9,81) [m·s⁻²].

Maximální přitlačná síla brzdových špalíků byla pro vozy Sggrss80 a Sggnss80 dopočítána pomocí stanovené aproximační funkce na základě parametrů systému automatické regulace brzdného účinku podle ložení vozu s využitím technické dokumentace k těmto vozům.

Pro získání představy o reálném chování brzdového systému vlaku byla využita data z brzdových zkoušek, provedených v rámci řešení bakalářské práce [8] na zkušebním stavu společnosti DAKO-CZ. Na obrázku 21 je v závislosti na čase zachycen průběh tlaku v hlavním potrubí (HP) a v brzdových válcích (BV) vybraných vozů soupravy vlaku o 16 vozech (při rychločinném brzdění v režimu G, ke kterému dojde po zásahu dohledového limitu EBI).



Obrázek 21 - datový záznam brzdových zkoušek

Zdroj: autor na podkladech [12]

Z vyhodnocení průběhů uvedených na obrázku 21 byly následně dopočítány tyto charakteristiky:

- doba prodlevy mezi nárůstem tlaku v BV prvního a posledního vozu činí 1,2 s;
- tlak v brzdových válcích narůstá při rychločinném brzdění v režimu G s průměrnou strmostí 0,145 bar/s.

Hodnota zjištěné strmosti 0,145 bar/s (tedy lineární nárůst tlaku v BV) byl převzat i u výpočtového modelu pro brzdění vlaku v této práci. Strmost odpovídá době plnění na 95 % maximálního tlaku BV (při rychločinném brzdění v režimu G) cca 25 s, což je v souladu s požadavky vyhlášky UIC 540. Doba prodlevy 1,2 s odpovídá 16vozové soupravě, zatímco v této práci byl pro modelování zvolen vlak o 24 vozech (navíc velmi dlouhých). Z tohoto důvodu byla použita doba prodlevy 2,5 s. Opět to odpovídá požadavkům vyhlášky UIC 540 na průraznou rychlost 250 m/s (pro 626 m dlouhý vlak).

Výpočtový model pro brzdění vlaku vytvořený pro tuto práci obsahuje časové průběhy tlaků v BV jednotlivých vozů, přičemž:

- doba prodlevy je modelována tak, že počátek nárůstu tlaku v BV na jednotlivých vozech je vždy posunut o 0,1 s (což je délka jednoho dílčího kroku Δt a rovněž to i odpovídá průrazné rychlosti 250 m/s pro 25metrový vůz);
- lineární nárůst tlaku v jednotlivých BV je uvažován s průměrnou strmostí 0,145 bar/s až na 3,8 bar (maximální tlak v BV při rychločinném brzdění).

Protože jsou vozy vybaveny systémem automatické regulace brzdného účinku podle ložení vozu, v následující části výpočtového modelu jsou ještě tlaky v jednotlivých BV přepočítávány na přítlačnou sílu na obvodu kol. To se děje s využitím předpokladu, že maximálnímu tlaku v BV (3,8 bar) odpovídá příslušná maximální hodnota přítlačné síly na obvodu kol dle tabulky 2.

Protože je již znám způsob získání přítlačné síly brzdových špalků pro každý vůz, je možné získat brzdnou sílu za celý vlak v každém jednotlivém dílčím kroku Δt . Ta se taktéž v každém jednotlivém dílčím kroku Δt stanoví:

$$B = \sum F_{dyn} \cdot f + B_{lok} \quad [\text{kN}] \quad (23)$$

kde:

$\sum F_{dyn}$ – přítlačná síla brzdových špalků za všechny vozy [kN];

f – součinitel tření [-];

B_{lok} – brzdná síla lokomotivy [kN].

Součinitel tření je uvažován dle vzorce:

$$f = 0,021 + \left(\frac{12,1635}{V + 39,2221} \right) \quad [-] \quad (24)$$

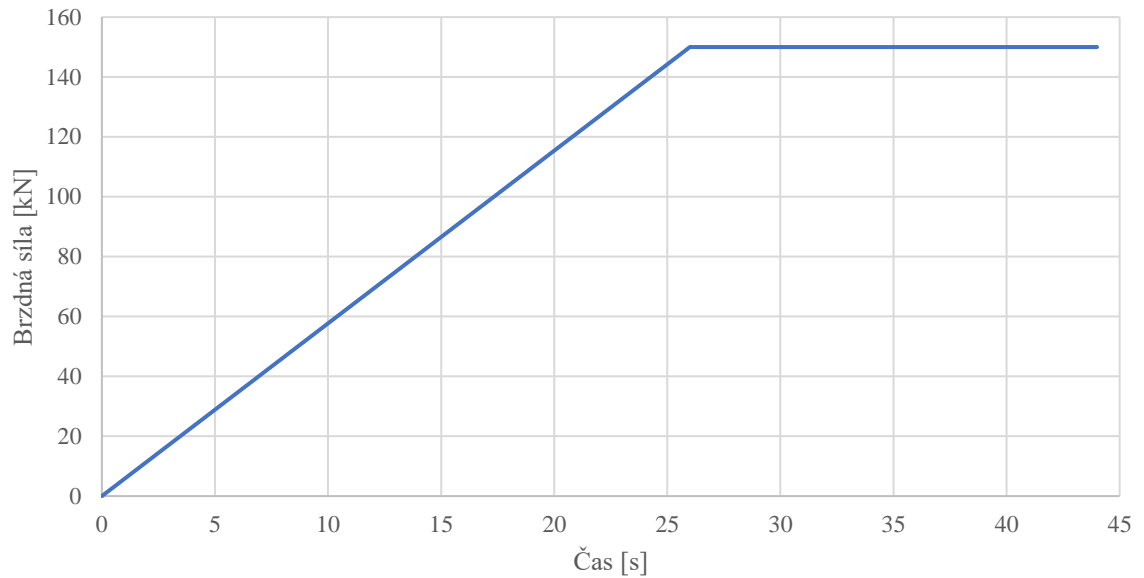
kde:

V – rychlost vlaku [km/h].

Tato charakteristika byla naměřena při brzdových zkouškách nákladního vozu s brzdovými špalíky typu K, vyrobenými z materiálu Jurid 816M, a je uvedena v práci [13].

Na rozdíl od vozů (kde byla k dispozici technická dokumentace) u lokomotivy není přesně známo, jak brzdí, a proto je potřeba provést kvalifikovaný odhad. Je známo, že lokomotiva je vybavena kotoučovou brzdou, pro kterou je význačné, že průběh součinitele tření je téměř konstantní. Dále je předpokládáno, že při nouzovém brzdění lokomotiva buď brzdí pouze pneumatickou brzdou, nebo využívá i elektrodynamickou brzdu. Celkový účinek brzdy je ale stejný, jako při použití pouze mechanické třecí síly. S využitím vzorce (16) je možné stanovit brzdící procento samotné lokomotivy (86,9 %). Z vyhlášky UIC 544-1 lze vyčíst, že lokomotiva

brzděná v režimu G a vykazující 86,9 brzdících procent by měla zastavit na vodorovné přímé koleji z rychlosti 100 km/h na dráze 545 m. Pokud je uvažován lineární náběh brzdné síly po dobu 26 s (stejně jako tomu bylo u modelování brzdné síly u vozů) a následně konstantně působící brzdná síla, lze opět numericky namodelovat, jaká je potřebná brzdná síla, aby lokomotiva zastavila na oněch 545 metrech. Numerickou metodou bylo zjištěno, že tato brzdná síla činí 150 kN. Časový průběh brzdné síly lokomotivy je zachycen na obrázku 22.



Obrázek 22 - časový průběh brzdné síly lokomotivy

Zdroj: autor

5 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ VYBRANÝCH PROVOZNÍCH SCÉNÁŘŮ BRZDĚNÍ VLAKU

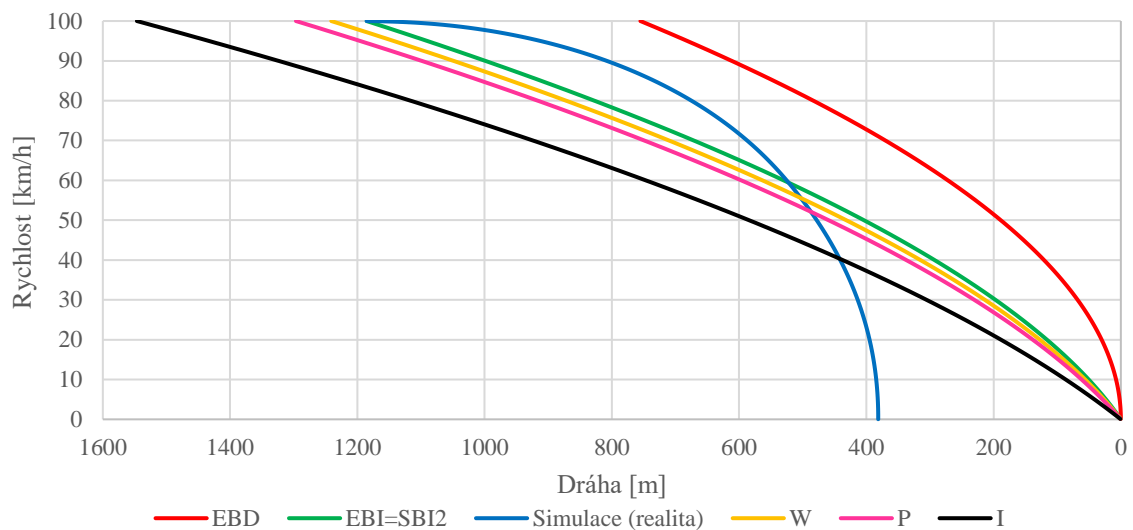
Tato kapitola se zabývá samotným vytvářením brzdných křivek a dohledových limitů pro zvolený vlak Nex43331. Podstatou je porovnat, jakým způsobem se liší reálné brzdné křivky (vykreslené pomocí numerického modelu popisovaného v kapitole 4) a křivky, které vytváří mobilní část ETCS, jejichž výpočet je dán v [3] a je taktéž popsán v kapitole 2 této práce.

Výpočet brzdné křivky EBD probíhá s využitím vzorce (6), ve kterém figuruje tzv. bezpečné zpomalení $A_{safe}(V,d)$. Hodnota $A_{safe}(V,d)$ činí $0,51093 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pro zvolený vlak Nex43331 (za předpokladu jízdy po vodorovné přímé koleji). Toto bylo zjištěno s využitím postupu uvedeného v oddíle 2.2.1. Díky tomu je možné brzdnou křivku EBD graficky vykreslit.

Výpočet dohledového limitu EBI je založen na využití vzorce (9), ve kterém figuruje tzv. bezpečná doba náběhu nouzové brzdy T_{be} , během které je uvažováno, že vlak nevyvíjí žádnou brzdnou sílu. Až po uplynutí této doby T_{be} je uvažován plný brzdný účinek (viz obrázek 20) s brzdným zpomalením $A_{safe}(V,d)$. Hodnota T_{be} činí 15,49 s pro zvolený vlak Nex43331. Toto je vypočítáno s využitím postupu uvedeného v oddíle 2.3.1. Následně je možné dohledový limit EBI taktéž graficky vykreslit.

Dohledové limity W, P, I jsou vypočítány dle vzorců (10), (11) a (12). Jedná se o příslušná předsunutí před dohledový limit EBI.

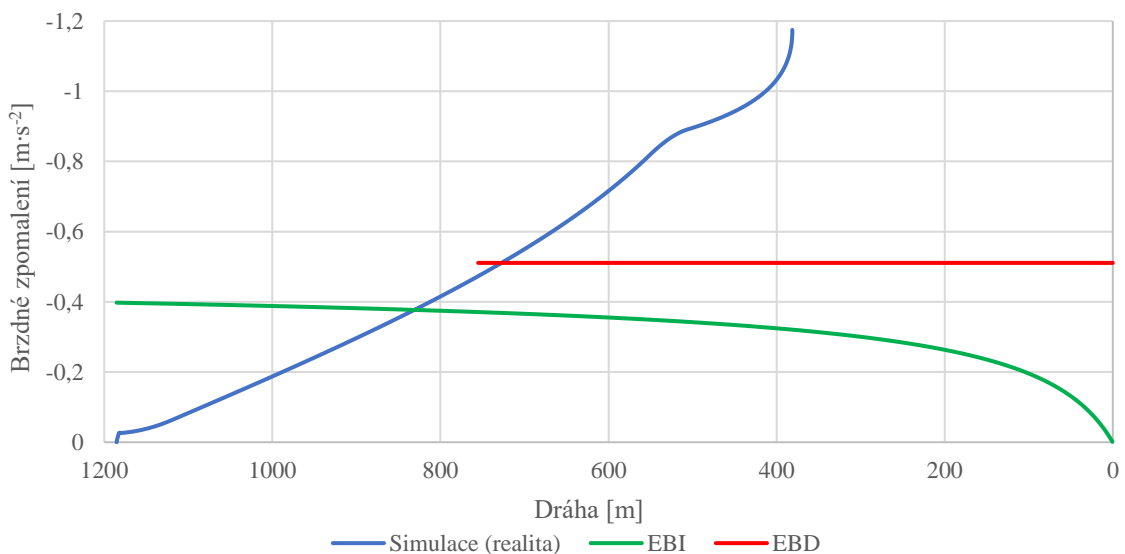
Na obrázku 23 je graficky znázorněna nasimulovaná brzdná křivka vlaku Nex43331, která byla získána pomocí modelu numerického řešení pohybu vlaku pro počáteční rychlost 100 km/h. Její délka je cca 805 m. S touto reálnou nasimulovanou brzdnou křivkou je porovnána brzdná křivka EBD, kterou počítá mobilní část ETCS. Jedná se o určitý předpoklad ETCS, dle kterého by daný vlak Nex43331 brzdil v případě zásahu nouzové brzdy (po překročení dohledového limitu EBI). Dále jsou v tomto obrázku znázorněny i dohledové limity (W, P, I), po jejichž překročení jsou generovány příslušné informace pro strojvedoucího. Jak je vidět, v případě, kdy dojde k zásahu nouzové brzdy (v okamžiku překročení limitu EBI), tak reálně vlak Nex43331 by dokázal zastavit cca 380 m před EoA. Nicméně ETCS předpokládá průběh brzdění dle křivky EBD, což je zcela jiný průběh brzdění, než jaký je ve skutečnosti (zjištěný pomocí simulace). Názorně je to ukázáno na obrázku 24.



Obrázek 23 - brzdné křivky a dohledové limity pro počáteční rychlost 100 km/h

Zdroj: autor

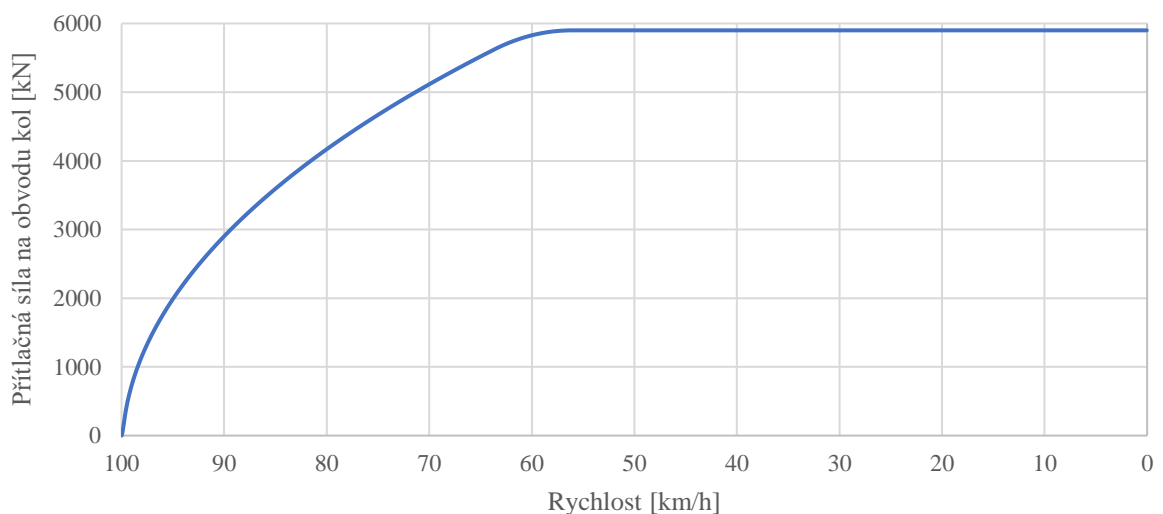
Důvodem je zcela odlišný průběh brzdného zpomalení. Ten je v závislosti na ujeté dráze znázorněn na obrázku 24. Zatímco model brzdění ETCS předpokládá, že po dobu cca 15,5 s se vlak pohybuje konstantní rychlostí a následně brzdí s konstantním zpomalením cca $0,511 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (červená čára), skutečný průběh zpomalení je vykreslen modře. Ve skutečnosti totiž během doby náběhu brzdná síla narůstá postupně, až po uplynutí této doby vlak brzdí plným brzdícím účinkem (kde se ještě projevuje třecí charakteristika, a proto hodnota brzdného zpomalení dále roste).



Obrázek 24 - závislost brzdného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 100 km/h

Zdroj: autor

Jak již bylo několikrát řečeno, při projetí dohledového limitu EBI dojde k zásahu nouzové brzdy, což je nežádoucí, protože jak bylo dokázáno v obrázku 23, vlak zastaví cca 380 m před EoA. K tomu, aby nedošlo k zásahu nouzové brzdy a současně, aby se vlak bezpečně přibližoval k EoA je potřeba, aby se vlak v limitním případě pohyboval těsně pod EBI křivkou. Z obrázku 24 ovšem plyne, že reálný průběh brzdného zpomalení (tedy v zásadě náběh brzdné síly) je zcela odlišný od průběhu brzdného zpomalení, který odpovídá křivce EBI. Konstantní průběh brzdného zpomalení u EBD křivky ($0,51093 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) je dán postupem, který je popsán v oddíle 2.2.1. Ve stručnosti se jedná o to, že pro zvolený nákladní vlak Nex43331, jehož maximální povolená rychlost je 100 km/h činí základní zpomalení AD_0 jedinou složku závislosti brzdného zpomalení na rychlosti (viz obrázek 13). Proto zde nebude brzdné zpomalení odstupňováno v různých rychlostních pásmech. K dosažení plného brzdného účinku vlaku (všech vozidel) dojde při rychlosti 56 km/h, tak jako ukazuje obrázek 25. Zde je potřeba upozornit, že se jedná o závislost přítláčné síly na obvodu kol všech vozidel, nikoliv o brzdou sílu. Brzdná síla je totiž výsledkem součinu přítláčné síly na obvodu kol a součinitele tření, který se neustále mění v závislosti na rychlosti (podle vzorce 24). Mění se tedy v závislosti na rychlosti i velikost výsledné brzdné síly vlaku.

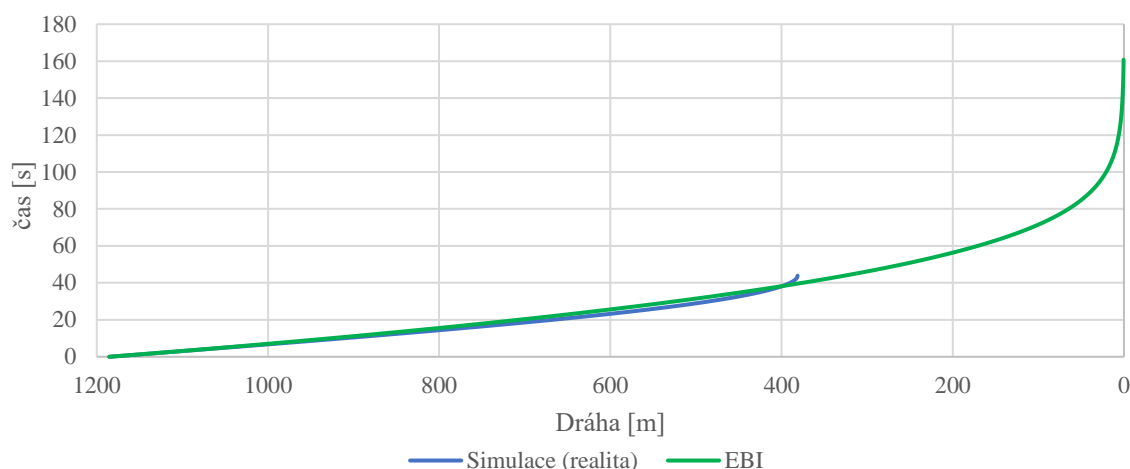


Obrázek 25 - závislost celkové přítláčné síly na obvodu kol na rychlosti

Zdroj: autor

Dalším negativním aspektem je dopad na kapacitu/propustnost železniční dopravní cesty. V grafu na obrázku 26 je porovnání času potřebného k zastavení pro reálně brzdící vlak a pro vlak, který by se v limitním případě měl držet těsně pod EBI křivkou (aby nedošlo k nežádoucímu zásahu nouzové brzdy, a tím pádem zastavení vlaku cca 380 m před EoA). Časový rozdíl je zde cca 116 s. Toto prodloužení doby potřebné k zastavení vlaku se projeví

především v tzv. času obsazení určitého prostorového oddílu, což jak bylo zmíněno, má nepříznivý dopad na ukazatele propustnosti železniční dopravní cesty.



Obrázek 26 - závislost času na ujeté dráze při brzdění z rychlosti 100 km/h

Zdroj: autor

Tyto stěžejní poznatky (rozdíl zábrzdných drah, odlišný průběh brzdného zpomalení, odlišné časy potřebné k zastavení) platí samozřejmě nejen pro počáteční rychlost 100 km/h, ale i pro ostatní namodelované scénáře. Byly uvažovány počáteční rychlosti 80 km/h, 60 km/h, 40 km/h a 20 km/h. Délky zábrzdných drah a polohy dohledových limitů pro jednotlivé uvažované počáteční rychlosti shrnuje tabulka 3.

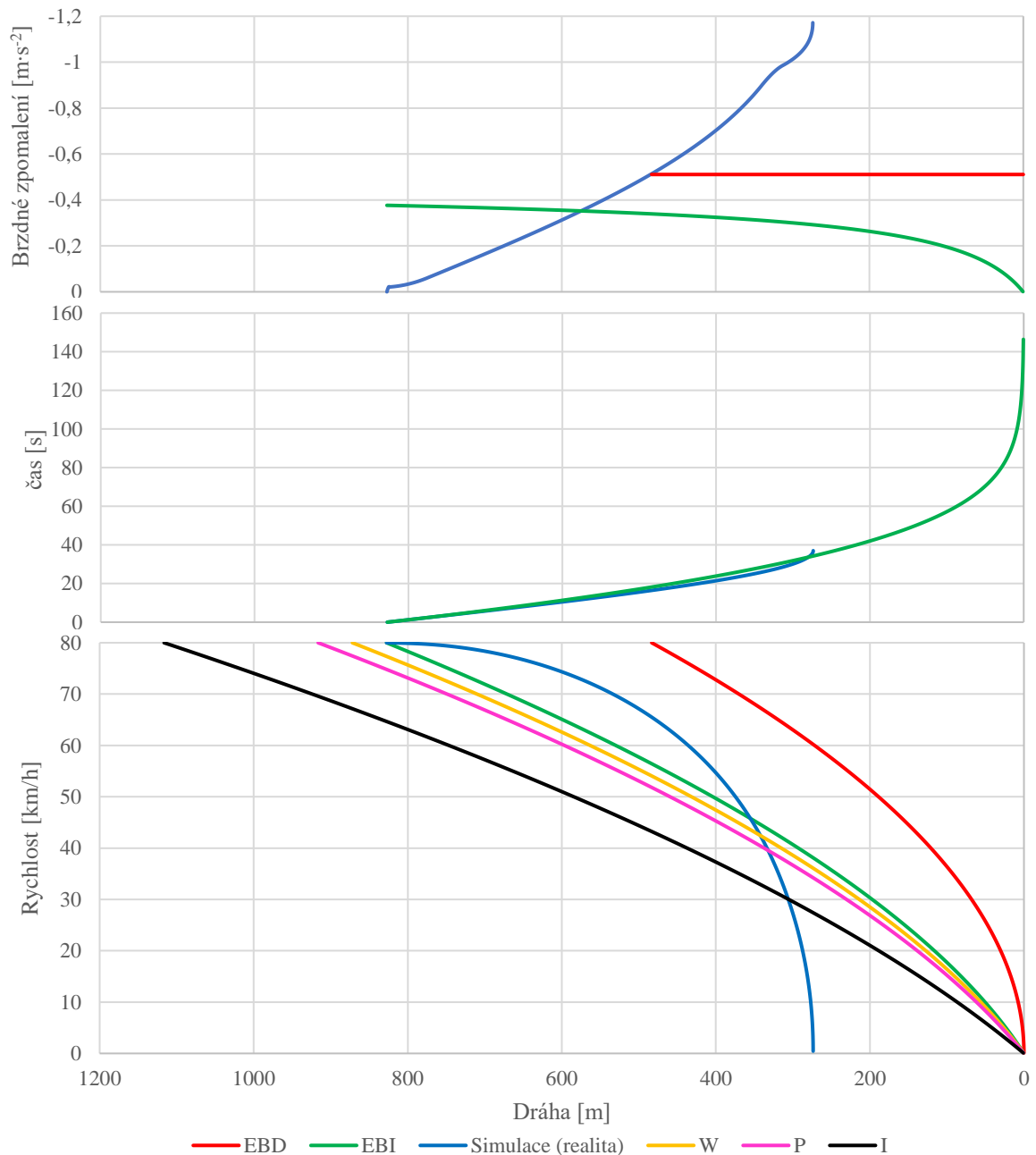
Tabulka 3 - porovnání délek zábrzdných drah a polohy dohledových limitů pro jednotlivé počáteční rychlosti

Počáteční rychlost [km/h]	Délka zábrzdných drah a polohy dohledových limitů [m]						Rozdíl nasimulované zábrzdné dráhy a EBI [m]	Doba brzdění - simulace [s]	Doba brzdění - EBI [s]
	Simulace	EBD	EBI	W	P	I			
20	65	30	116	127	138	188	52	44	160
40	186	121	293	315	337	437	107	37	146
60	349	272	530	563	597	747	181	31	131
80	554	483	827	872	916	1116	274	24	114
100	804	755	1185	1241	1296	1546	381	17	92

Zdroj: autor

Jak je vidět v osmém sloupci tabulky 3, místa zastavení (vzdálenosti od EoA) při zásahu nouzové brzdy (po překročení dohledového limitu EBI) jsou dle specifikací ETCS a dle reálného průběhu brzdění zcela odlišné. V absolutní hodnotě samozřejmě platí, že čím vyšší je počáteční rychlost vlaku, tím je rozdíl zábrzdných drah znatelnější. Ovšem čím nižší je počáteční rychlost, tím bezpečná doba náběhu nouzové brzdy T_{be} tvoří větší část celého procesu brzdění. T_{be} je totiž stále stejné, bez ohledu na počáteční rychlost. Pro úplnost jsou dále uvedeny i grafy brzdných křivek a dohledových limitů pro ostatní počáteční rychlosti.

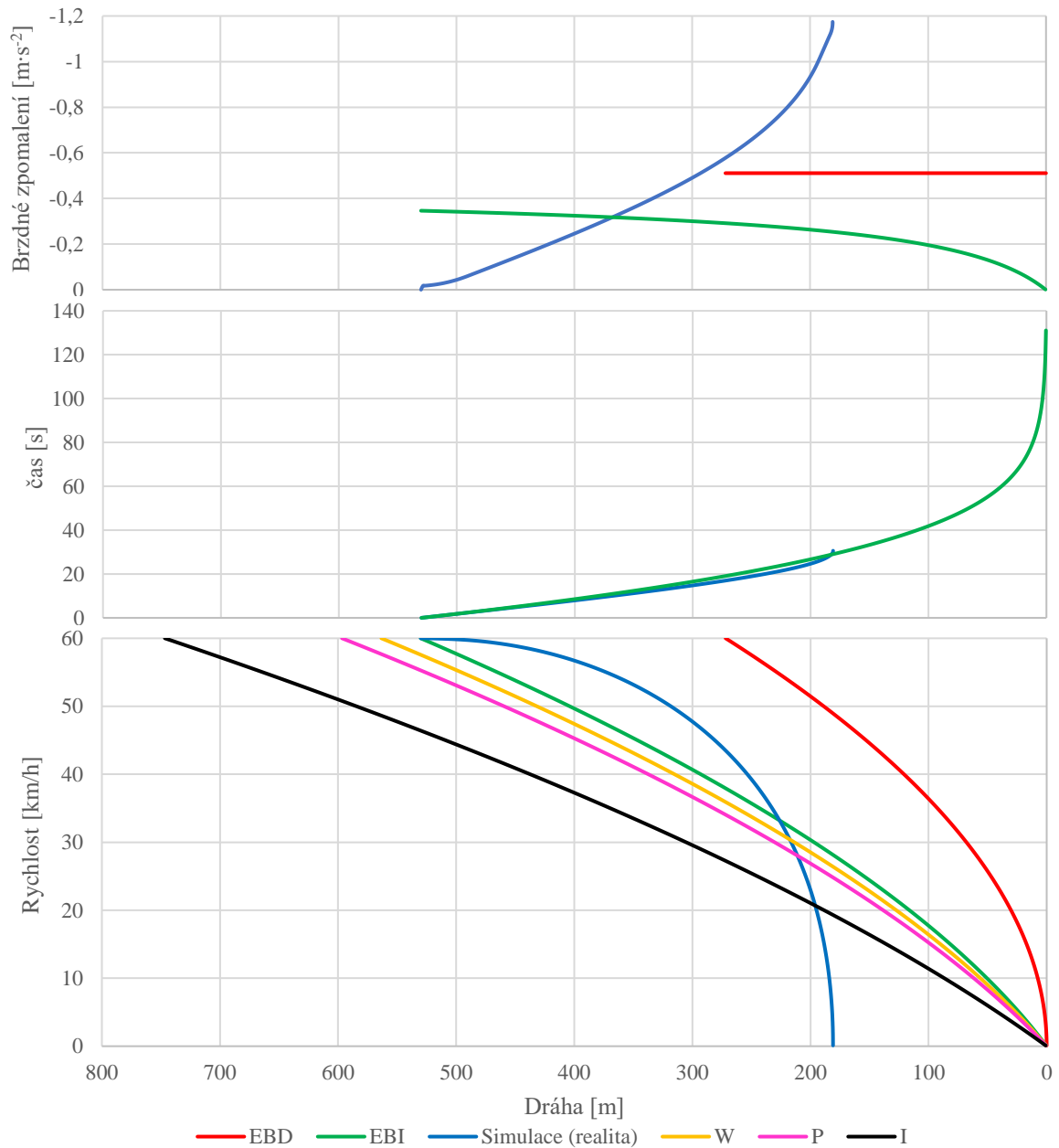
Na obrázku 27 jsou znázorněny brzdné křivky a dohledové limity pro počáteční rychlost 80 km/h. Z tohoto obrázku je vidět, že rozdíl zábrzdných drah je zde 274 m. Časový rozdíl při zastavování činí cca 109 s. V tomto grafu je taktéž uvedena závislost brzdného zpomalení na ujeté dráze.



Obrázek 27 - závislost rychlosti, času a brzdného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 80 km/h

Zdroj: autor

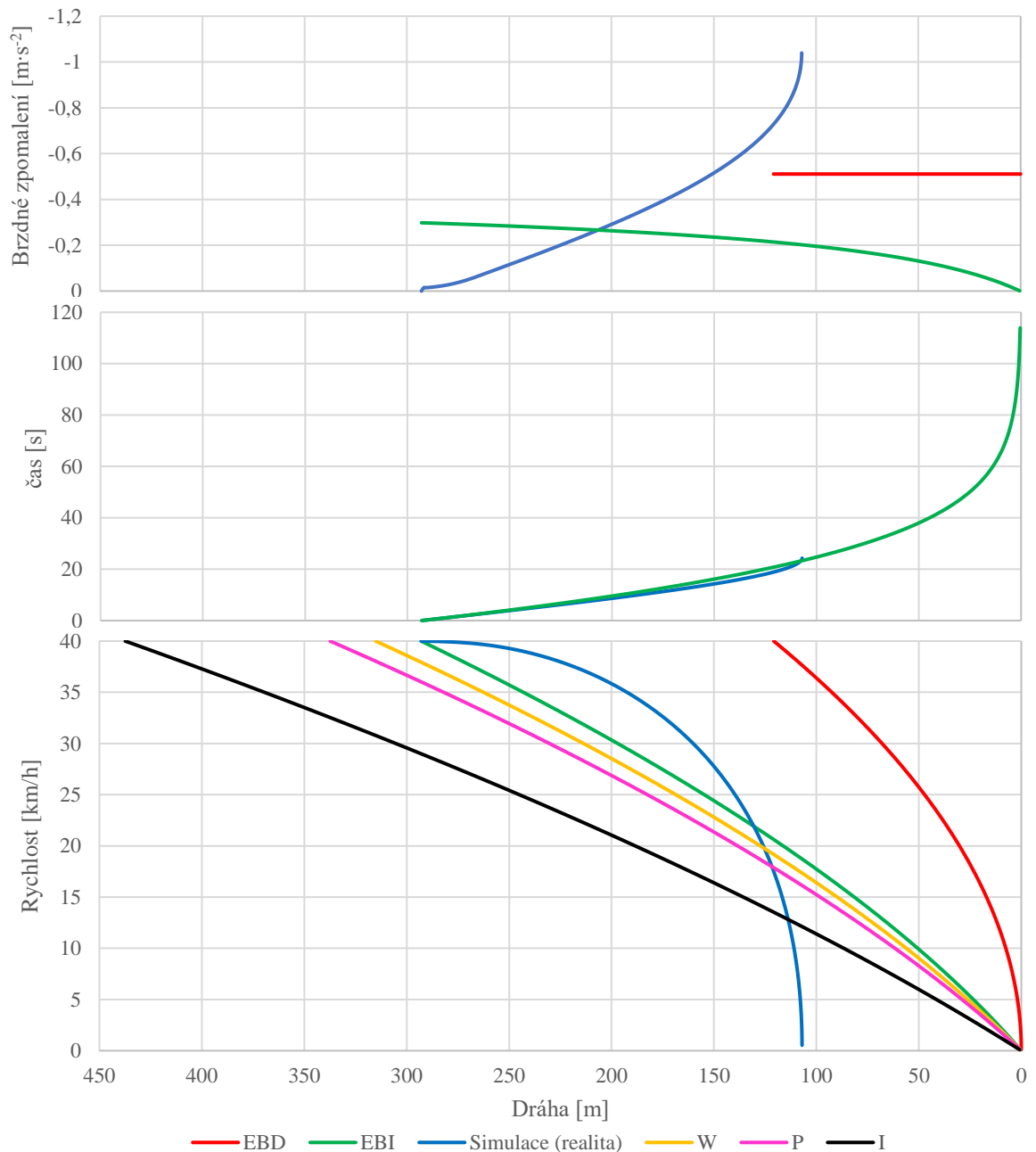
Dále na obrázku 28 jsou znázorněny brzděné křivky a dohledové limity pro počáteční rychlost 60 km/h. Z tohoto obrázku je možné vysledovat, že rozdíl zábrzdných drah pro počáteční rychlost 60 km/h je 181 m. Časový rozdíl při zastavování je cca 100 s. Na tomto grafu je uvedena taktéž závislost brzděného zpomalení na rychlosti.



Obrázek 28 - závislost rychlosti, času a brzděného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 60 km/h

Zdroj: autor

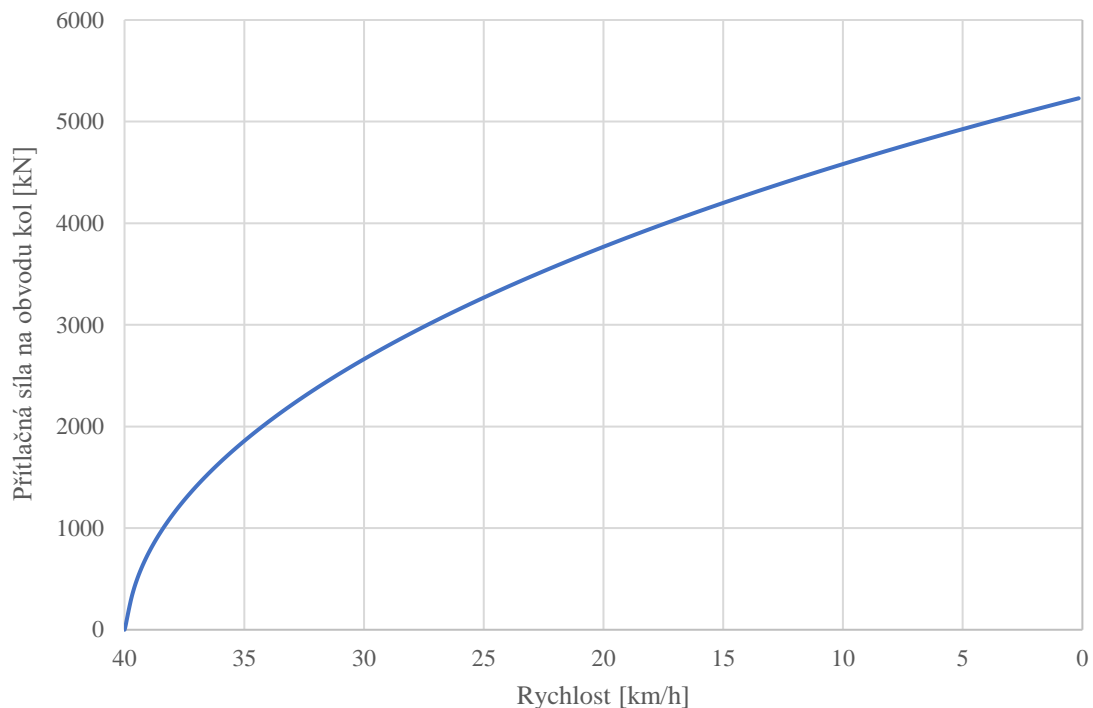
Dále na obrázku 29 jsou uvedeny brzdné křivky a dohledové limity pro počáteční rychlost 40 km/h. Z tohoto obrázku je možné vysledovat, že rozdíl zábrzdných drah pro počáteční rychlost 40 km/h je 107 m. Časový rozdíl při zastavování je cca 90 s. V tomto grafu je taktéž uvedena závislost brzdného zpomalení na rychlosti.



Obrázek 29 - závislost rychlosti, času a brzdného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 40 km/h

Zdroj: autor

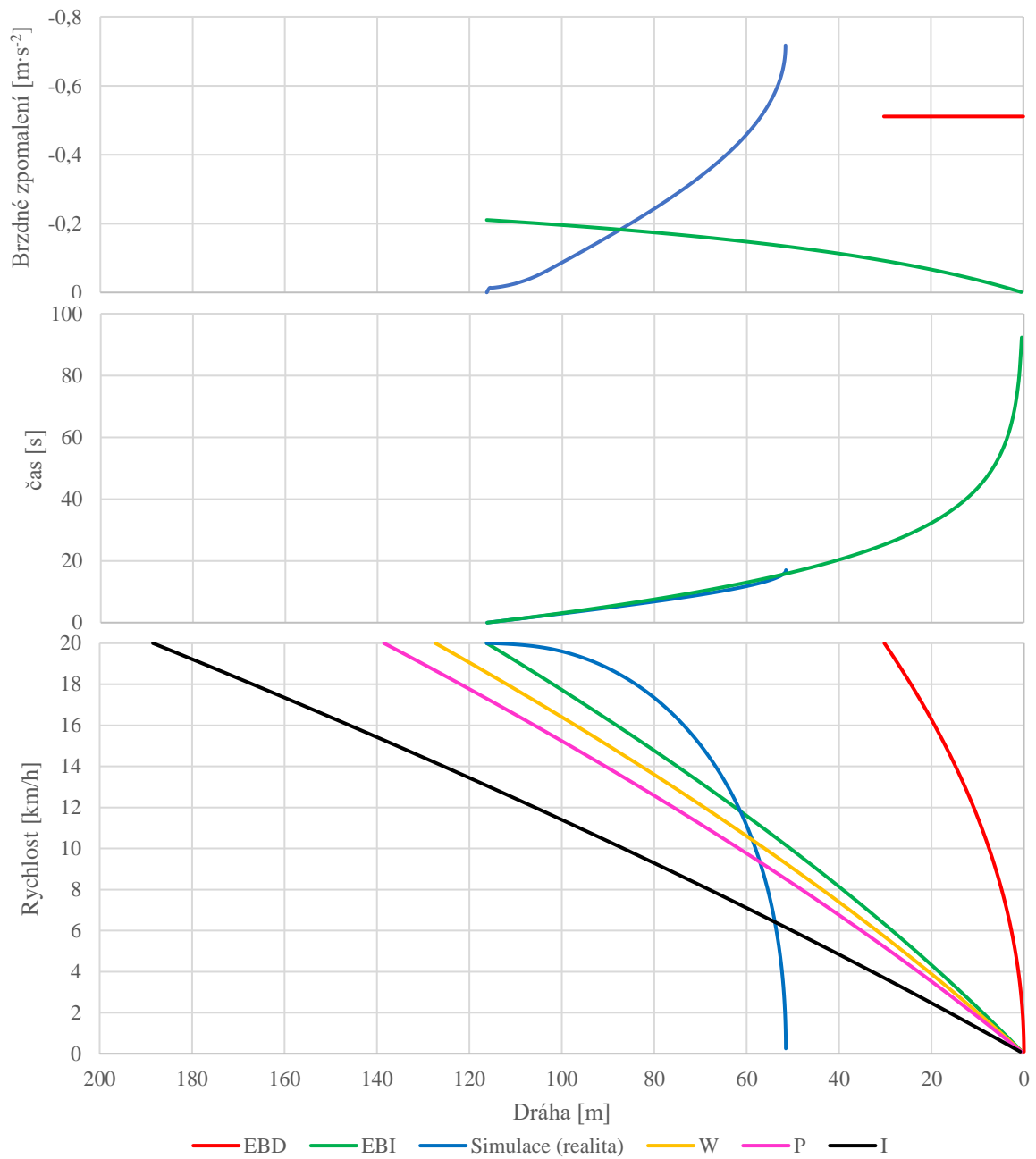
Při počáteční rychlosti 40 km/h již dochází k tomu, že vlak stihne zastavit dříve, než uplyne celá doba náběhu. Vlak při brzdění z počáteční rychlosti 40 km/h tedy nestihne dosáhnout plného brzdného účinku, tak jak je zobrazeno v grafu na obrázku 30. Při porovnání s obrázkem 25 je vidět, že v případě brzdění z rychlosti 40 km/h vozidla vlaku nedosáhnou maximální přitlačné síly na obvodu kol. Přesto však vlak dokáže stihnout zastavit 107 m před EoA.



Obrázek 30 – závislost celkové přitlačné síly na obvodu kol na rychlosti

Zdroj: autor

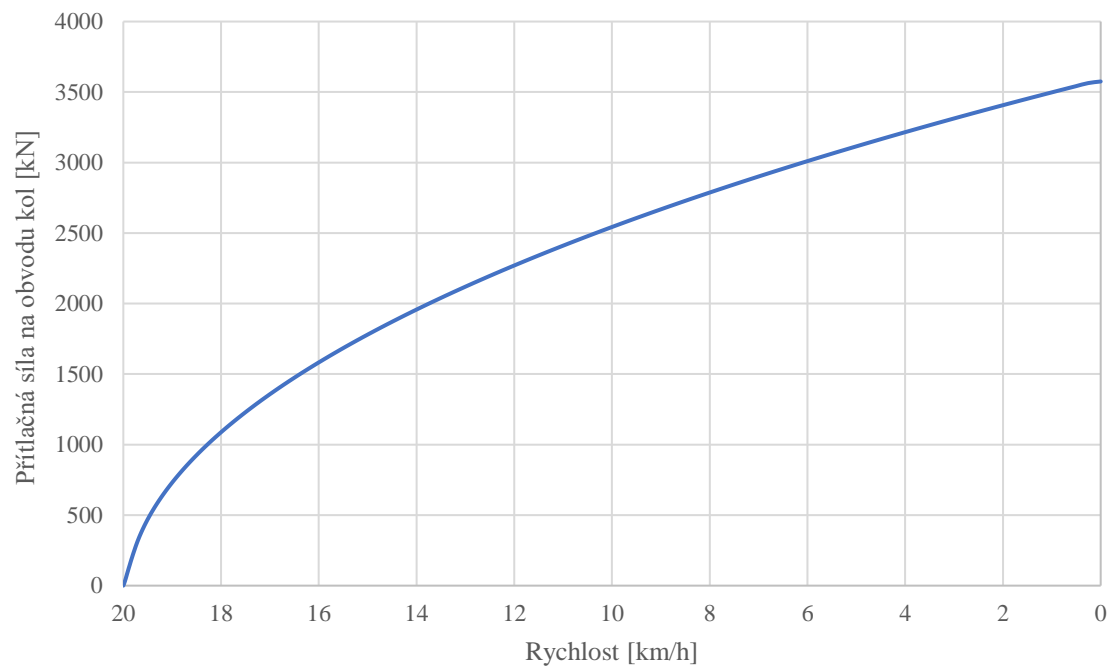
Dále na obrázku 31 jsou uvedeny brzdné křivky a dohledové limity pro počáteční rychlost 20 km/h. Z tohoto obrázku je možné vysledovat, že rozdíl zábrzdných drah pro počáteční rychlost 20 km/h je 52 m. Časový rozdíl při zastavování je cca 75 s. V tomto grafu je taktéž uvedena závislost brzdného zpomalení na rychlosti.



Obrázek 31 - závislost rychlosti, času a brzdňého zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 20 km/h

Zdroj: autor

Stejně jako v přechozím scénáři, i zde vlak nestihne dosáhnout plného brzdného účinku (viz obrázek 32). Přesto stihne zastavit 52 m před EoA.



Obrázek 32 - závislost celkové přítláčné síly na obvodu kol na rychlosti

Zdroj: autor

6 MOŽNOSTI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY PŘIBLIŽOVÁNÍ VLAKU K EoA

Z přechozí kapitoly plyne, že existují dvě zásadní příčiny příliš dlouhé vzdálenosti mezi místem zastavení vlaku a EoA:

- Nesoulad brzdného zpomalení, požadovaného křivkou EBI a brzdné zpomalení reálně brzdícího vlaku. Zde je řešením snížení dosahovaného zpomalení (i za cenu prodlužování času potřebného k zabrzdění). Proto byly vyšetřeny situace, zda by bylo východiskem brzdit pneumatickou samočinnou brzdou s brzdným účinkem 50 % nebo 25 %.
- Dlouhá doba náběhu brzdy (zpoždění brzdného účinku), která velmi předsouvá dohledové limity před křivku EBD. Zde je řešením zkrácení této doby náběhu, což umožňuje elektropneumatická brzda, a proto byl ověřen její potenciální přínos.

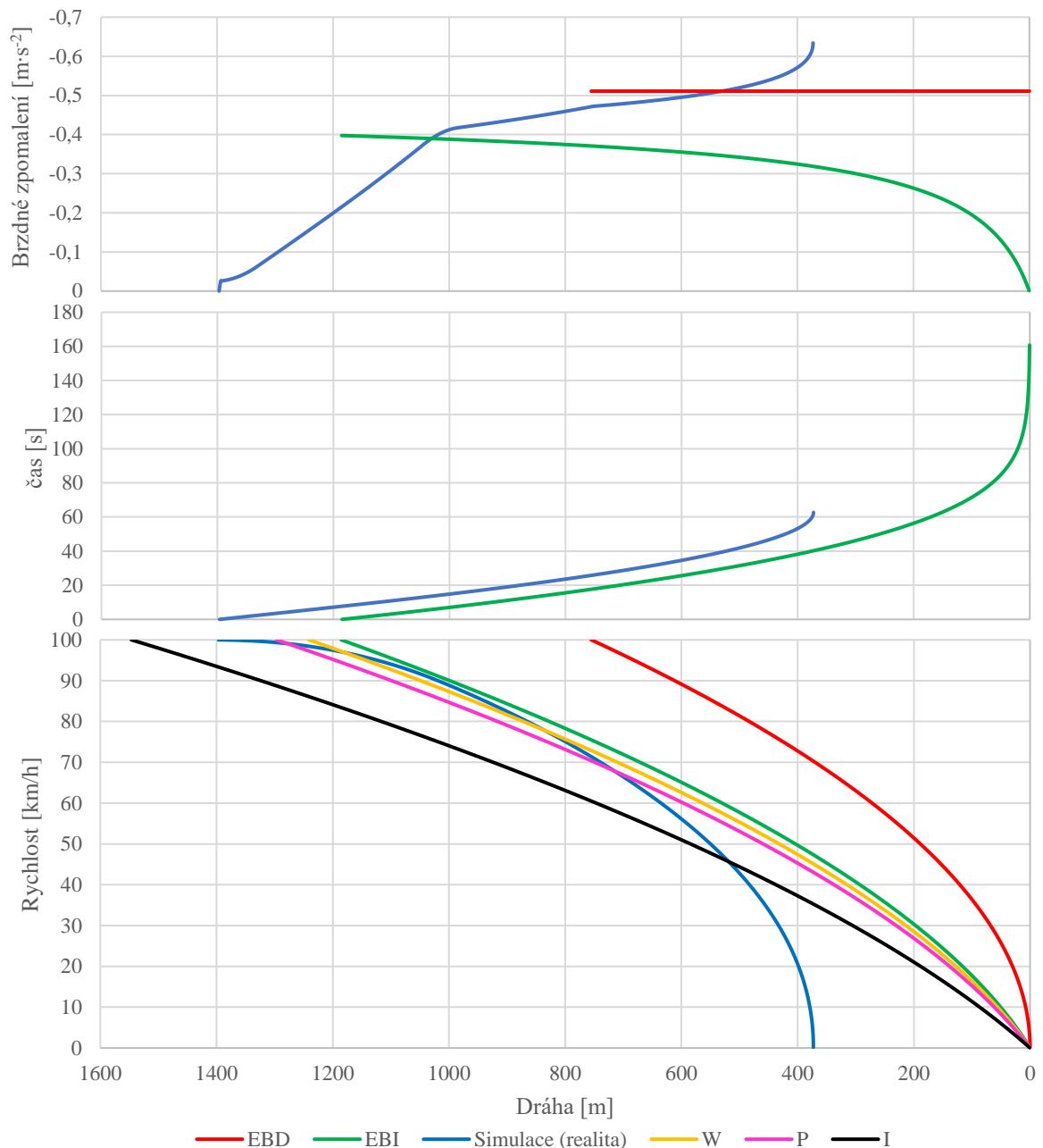
V návaznosti na fakt, že při překročení dohledového limitu EBI dojde k vynucenému zásahu nouzové brzdy, a následně zastavení vlaku daleko před EoA (v závislosti na počáteční rychlosti) byly zpracovány i návrhy, jakým způsobem by se nechtěnému zásahu nouzové brzdy dalo zabránit a zároveň, aby se vlak svým čelem dostal co nejbližší k EoA. Byly provedeny tyto varianty:

- brzdění klasickou pneumatickou brzdou při brzdném účinku 50 %;
- brzdění klasickou pneumatickou brzdou při brzdném účinku 25 %;
- brzdění elektropneumatickou brzdou při brzdném účinku 100 %;
- brzdění elektropneumatickou brzdou při brzdném účinku 60 %.

Při brzdění klasickou pneumatickou brzdou byl v simulačním modelu pouze změněn maximálně dosažitelný tlak v BV – a tedy i jemu odpovídající maximálně dosažitelná přítlačná síla na obvodu kol. Při brzdění elektropneumatickou brzdou došlo k tomu, že zde již nefiguruje doba prodlevy v závislosti na pořadí vozu (je odstraněn vliv průrazné rychlosti), a dále díky elektricky ovládaným ventilům, ovládajícím plnění brzdových válců na jednotlivých vozech, byla doba plnění BV stanovena na 2 s (strmost plnění BV je tedy 1,9 bar/s). S tím souvisí i úprava bezpečné doby náběhu nouzové brzdy T_{be} při výpočtu dohledového limitu EBI. Protože ve specifikacích ETCS je doba náběhu nahrazena skokovou funkcí (viz obrázek 20), bude T_{be} rovno polovině doby plnění BV – tedy 1 s.

Na obrázku 33 jsou uvedeny brzdné křivky, dohledové limity, časy potřebné k zastavení a průběhy zpomalení v závislosti na ujeté dráze pro případ brzdění klasickou pneumatickou

brzdou při brzděném účinku 50 %. Nasimulovanou brzdou křivku (tedy místo, kde by měl strojvedoucí začít brzdit) přitom bylo nutné umístit tak, aby nedošlo k jejímu protnutí se zásahovou křivkou EBI. To by totiž způsobilo opět nechtěný zásah nouzové brzdy (s brzděným účinkem 100 %), a tudíž by zde opět nastávala situace, kdy by došlo k prodlužování vzdálenosti mezi místem zastavení a EoA.

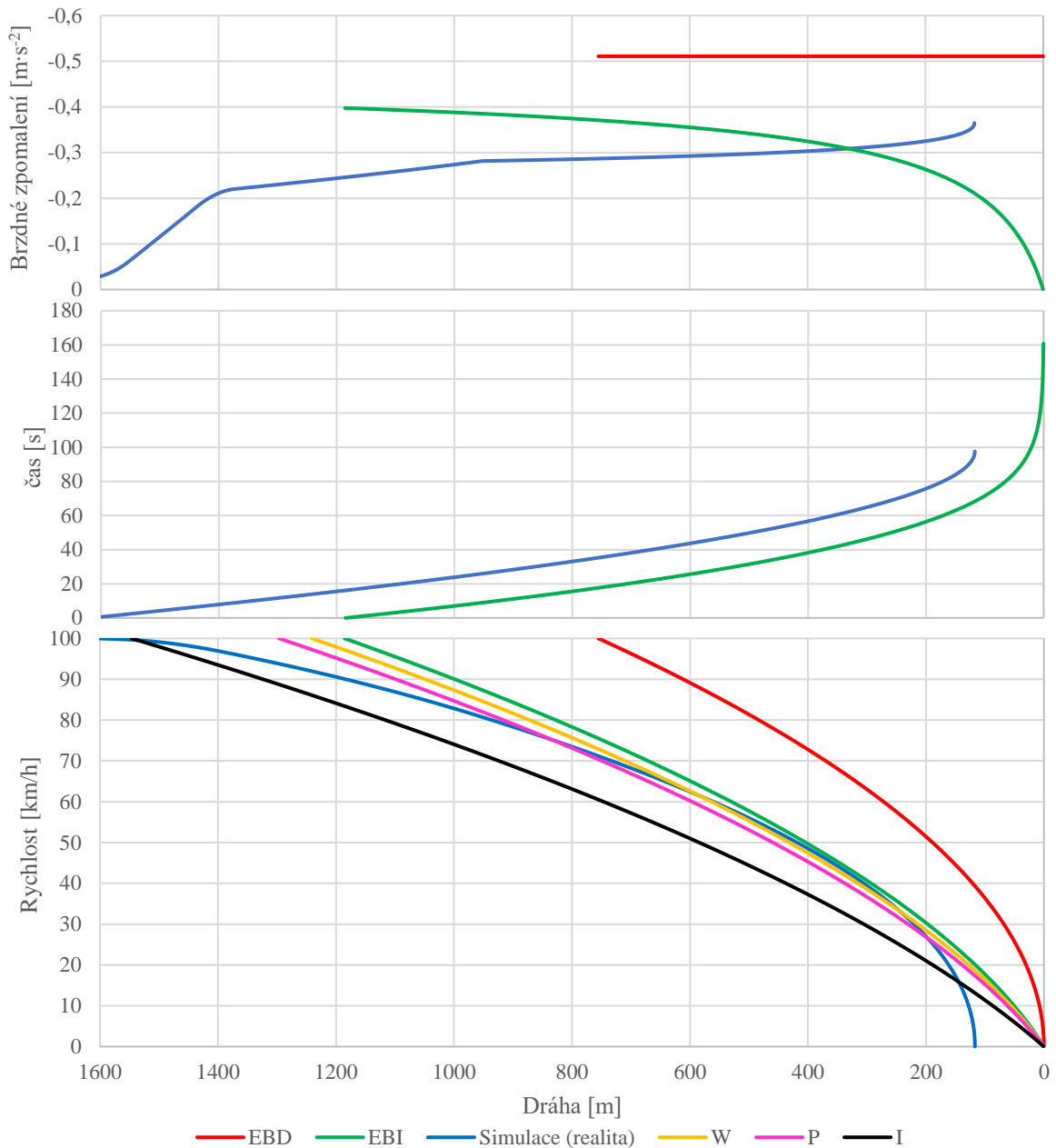


Obrázek 33 - závislost rychlosti, času a brzděného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 100 km/h při brzděném účinku 50 %

Zdroj: autor

Jak plyne z obrázku 33, pro to, aby vlak zastavil co nejbližší EoA a zároveň, aby nepřekročil dohledový limit není tato varianta vhodná. Vlak by zůstal stát cca 370 m před EoA.

Další variantou je brzdění klasickou pneumatickou brzdou při brzděném účinku 25 %. Tyto výsledky znázorňuje obrázek 34.



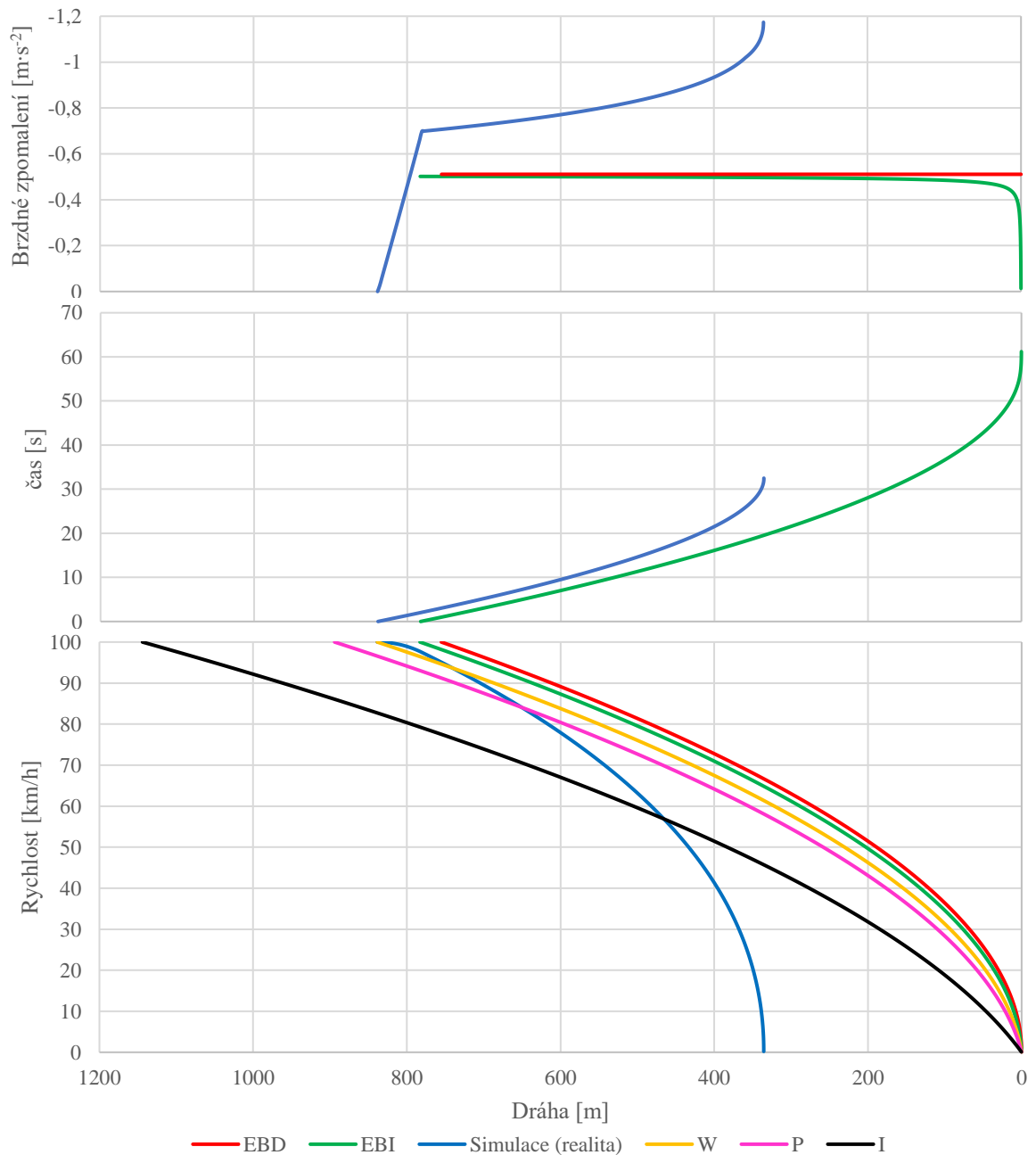
Obrázek 34 - závislost rychlosti, času a brzděného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 100 km/h při brzděném účinku 25 %

Zdroj: autor

Jak je možné vidět z obrázku 34, zde se vzdálenost zastavení před EoA snížila na cca 116 m, ale za tu cenu, že doba potřebná na zastavení je cca 100 s, a strojvedoucí by musel začít brzdit cca 1600 m před EoA. Toto, jak již bylo zmíněno, má nepříznivý dopad na kapacitu/propustnost železniční dopravní cesty.

Další variantou je brzdění elektropneumatickou brzdou při brzděném účinku 100 %. Výsledky jsou na obrázku 35. Jak je možné vidět, sice došlo k menšímu předsunutí dohledových limitů

před EBD křivku, nicméně rychlý náběh elektropneumatické brzdy způsobí rychlejší dosažení plného brzdného účinku. Proto zde vlak zůstane stát cca 335 m před EoA. Odlišná podoba EBI křivky (a ostatních dohledových limitů) je důsledkem odlišného průběhu zpomalení u EBI křivky. To se změnilo důsledkem zkrácení bezpečné doby náběhu T_{be} .

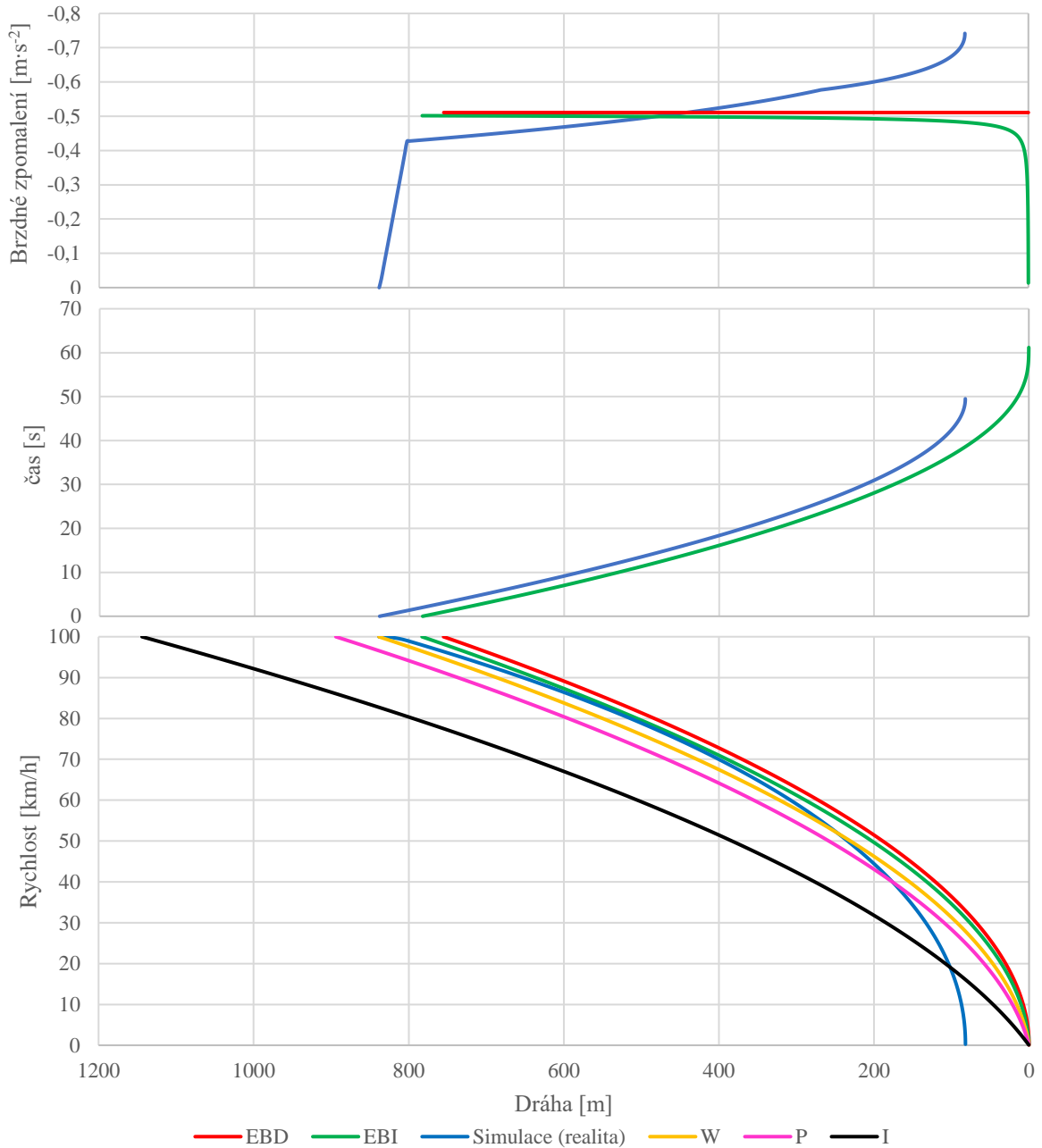


Obrázek 35 - závislost rychlosti, času a brzdného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 100 km/h při použití elektropneumatické brzdy a při brzdném účinku 100 %

Zdroj: autor

Vlivem rozdílných průběhů zpomalení je potřeba snížit brzdný účinek, aby rychlost lépe kopírovala EBI křivku.

Poslední variantou je brzdění elektropneumatickou brzdou při brzdém účinku 60 %. Tak, jako bylo zmíněno výše, použitím této brzdy se upraví i bezpečná doba náběhu T_{be} , která má následně vliv na podobu dohledového limitu EBI. Výsledky této varianty a podoba dohledových limitů je znázorněna na obrázku 36.



Obrázek 36 - závislost rychlosti, času a brzděného zpomalení na ujeté dráze pro počáteční rychlost 100 km/h při použití elektropneumatické brzdy a při brzdém účinku 60 %

Zdroj: autor

Jak je možné vidět z obrázku 36, vzdálenost zastavení před EoA je cca 80 m, což je značně blíže než v předchozích variantách. Také čas potřebný k zastavení je kratší – cca 50 s.

ZÁVĚR

V této práci byl popsán princip fungování vlakového zabezpečovače ETCS. Zmíněny byly také jednotlivé režimy ETCS. Především pak byl nastíněn způsob, jakým ETCS dohlíží na brzdění vlaku ke konci oprávnění k jízdě. Dále byly charakterizovány jednotlivé dohledové limity, včetně principu jejich stanovování. V další části této práce byl popsán brzdový systém železničních vozidel. Poznatky ohledně brzdového systému železničních vozidel byly využity při tvorbě matematického modelu, díky kterému bylo možné nasimulovat reálný průběh brzdění vlaku. Tento matematický model byl sestaven v tabulkovém editoru MS Excel, a je založen na numerickém řešení pohybové rovnice vlaku. V rámci tvorby matematického modelu pro numerické řešení pohybu vlaku byla analyzována data z brzdových zkoušek. Z těchto dat byly stanoveny potřebné vstupy (doba prodlevy v závislosti na pořadí vozu a strmost plnění brzdových válců) pro výpočtový model. Díky tomuto modelu bylo možné sestavit reálné brzdné křivky vlaku, které byly následně porovnávány s brzdnými křivkami a dohledovými limity, jejichž výpočet je dán specifikacemi ETCS. Z těchto porovnání vyšlo najevo, že ETCS sice nabízí vysokou úroveň zabezpečení jízdy vlaku (především díky nepřetržité kontrole rychlosti a vyloučení možnosti projetí návěsti „stůj“, a tedy vyloučení selhání lidského faktoru), nicméně při stanovování brzdných křivek a dohledových limitů se chová příliš restriktivně. Dále bylo zjištěno, že ETCS předpokládá zcela odlišný průběh brzdění, než jaký je ve skutečnosti. Toto se děje důsledkem skutečností, že reálný průběh brzdné síly (tedy i brzdného zpomalení) je odlišný od toho, jaký předpokládá ETCS. Navíc ve výpočtech dohledových limitů figuruje tzv. bezpečná doba náběhu brzdy, která příliš předsouvá dohledové limity před křivku EBD. To má za následek, že při zaúčinkování nouzové brzdy (projetím limitu EBI) vlak zabrzdí několik stovek metrů před koncem oprávnění k jízdě. To spolu nese veškeré negativní dopady na prodlužování jízdních dob, a tedy i na kapacitu/propustnost železniční dopravní cesty. Dále byly prověřeny možnosti, jakým způsobem by se vlak musel blížit ke konci oprávnění k jízdě, aby nedošlo k nechtěnému zásahu nouzové brzdy, aby nezastavil příliš daleko před koncem oprávnění k jízdě. První dvě varianty návrhu byly uskutečněny za předpokladu použití klasické pneumatické brzdy, pouze se sníženým brzdným účinkem. Toto se příliš neosvědčilo, jelikož vzdálenost místa zastavení před koncem oprávnění k jízdě byla stále příliš velká, navíc s velmi dlouhým časem potřebným k zabrzdění. Ve třetí a čtvrté variantě se předpokládalo použití elektropneumatické brzdy, která se v principu umožňuje nulovou dobou prodlevy a rychlé plnění brzdových válců. Tato varianta se jeví jako nejvýhodnější, jelikož vlak zastaví v přijatelné vzdálenosti od konce oprávnění k jízdě, a navíc i během krátkého času.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] MICHÁLEK T.: *Technické aspekty interoperability kolejových vozidel*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2017 [cit. 2022-03-15]. ISBN 978-80-7560-048-6.
- [2] SPRÁVA ŽELEZNIC, S. O. *Co je ETCS* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/stavby-zakazky/modernizace/etcs/co-je-etcs>
- [3] ERTMS/ETCS *SUBSET-026-3, ISS. 3.6.0. System Requirements Specification*. ERA, 2016.
- [4] RAILSYSTEM.NET, *Balise* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://railsystem.net/balise/>
- [5] MAREK, J., MYSLIVEC, I., BUBENÍK, M. *Návrhy úprav funkčního chování ERTMS/ETCS při dohledu cíle na generické úrovni*. Vědeckotechnický sborník Správy železnic. 2020 (2), s. 83–107. ISSN 2694-9172 [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/94808101/N%C3%A1vrhy+%C3%BApravy+funk%C4%8Dn%C3%ADho+chov%C3%A1n%C3%AD+ERTMSETCS+p%C5%99i+dohledu+c%C3%ADle+na+generick%C3%A9+%C3%BArovni.pdf/3a9e0a49-084c-439d-afe2-7afb74826c59>
- [6] CS.WIKIPEDIA.ORG, *European Train Control System* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/European_Train_Control_System
- [7] MICHÁLEK T., ZELENKA J.: *Trakční mechanika*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018 [cit. 2022-03-15]. ISBN 978-80-7560-175-9.
- [8] JAROŠ P.: *Podélná dynamika souprav nákladních vlaků*. Pardubice 2019. Bakalářská práce [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/73724>
- [9] SCHWEIZERISCHE EISENBAHNEN: *Schweizerische Fahrdienstvorschriften* [online]. Bern, 2020. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSuZnC6O32AhWSCuwKHccQBnkQFnoECAQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bav.admin.ch%2Fdam%2Fbav%2Fde%2Fdokumente%2Ffdv-a2020%2Ffdv-r300-1-15-a2020.pdf.download.pdf%2FFDV_A2020_R300.1-15_d.pdf&usg=AOvVaw1pp1BwyYN7lZr78nHi3Rko
- [10] MDČR: *Vyhláška č. 173/1995 Sb. Vyhláška Ministerstva dopravy, kterou se vydává dopravní řád drah* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1995-173>
- [11] Provozní záznamy společnosti METRANS Rail.
- [12] Datové záznamy brzdových zkoušek společnosti DAKO-CZ.
- [13] PULDA J.: *Simulace jízdní brzdové zkoušky nákladního vozu*. Pardubice 2019. Bakalářská práce [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/73723>