

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

**Specifické problémy rekuperace na
stejnoseměrném trakčním systému 3 kV**

Bc. Jiří Pytelka

Diplomová práce

2012

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Pytelka**
Osobní číslo: **D10762**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení v dopravě**
Název tématu: **Specifické problémy rekuperace na stejnosměrném trakčním systému 3 kV**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Energetický potenciál rekuperačního brzdění
Parametry zařízení podílejících se na rekuperaci
Vliv odstupu napětí vozidla a napájecí stanice na dosah rekuperačního brzdění
Možnosti snížení impedance proudové cesty s cílem zvýšit dosah rekuperačního brzdění
Celkové hodnocení úspěšnosti rekuperace v závislosti na výkonu, odstupu napětí a impedanci

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Jansa F. : Dynamika a energetika elektrické trakce, NADAS, Praha, 1980

ČSN EN 50388. Drážní zařízení - Napájení a drážní vozidla - Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability, ČNI, Praha, 2006

ČSN EN 50163 ed.2. Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav, ČNI, Praha, 2005

SŽDC (ČSD) SR 34 (E). Nastavovanie, prevadzka a údržba reléových ochrán trakčného napájacieho obvodu, Federálne ministerstvo dopravy, Praha, 1979

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Mlynařík

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

21. prosince 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2012


prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.


doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci 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., autorský zákon, 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 5. 2012

Jiří Pytelka

Poděkování

Jak za přístup k některým studijním materiálům, tak především za poskytnutí cenných připomínek velice děkuji pánům Ing. Jiřímu Pohlovi ze společnosti Siemens, s.r.o a Ing. Ladislavu Mlynaříkovi, coby vedoucímu této práce.

ANOTACE

Tato práce je věnována problematice rekuperace na železnici ve stejnosměrné napájecí soustavě 3 kV. Je zde na několika příkladech jízdy vlaku naznačen energetický potenciál brzdění a možnosti jeho využití, dále jsou popsány parametry zařízení podílejících se na rekuperaci (trakční měnič, trakční vedení, zpětná cesta a hnací vozidlo) a jejich vliv na účinnost tohoto procesu.

Podle parametrů těchto zařízení bylo vytvořeno náhradní schéma trakčního obvodu a popsány poměry v trakčním vedení v situacích naprázdno a při zatížení.

Stěžejní záležitostí této práce je popis napěťových, proudových a výkonových poměrů v trakčním obvodu při rekuperaci a jejich výpočet v modelových situacích, pro jehož zjednodušení a kvůli přehlednosti a možnosti srovnání výsledků byla vytvořena aplikace v tabulkovém procesoru, která je součástí této práce. Na zvolených modelových situacích byla zkoumána možnost zvýšení efektu využití rekuperačního brzdění jednak zvýšením maximálního dovoleného napětí v trakčním vedení na hodnotu stanovenou evropskou normou, a jednak snížením odporu vedení. Na závěr je vyhodnocen energetický přínos obou variant.

KLÍČOVÁ SLOVA

rekuperace; stejnosměrná napájecí soustava 3kV; trakční vedení; trakční obvod; nejvyšší dovolené napětí

ABSTRACT

This thesis is devoted to problems of recuperation in the railway 3 kV DC feeding system. There is shown in this discourse energetic potential of the train braking in a few exemplifications, including its opportunities of utilization. Attention is also given to the equipments participate in the process of recuperation (traction line, feeding station, driving vehicle) and to their effect on the efficiency of this process.

According to parameters of these equipments there was made equivalent diagram of traction circuit and were described conditions in a traction line at situations without loading and with loading.

Fundamental matter of this discourse is description of voltage, current and wattage conditions in the traction line during recuperation and their calculation in the model situations. There was made the application in the spreadsheet for these calculations that is part of this discourse. Possibilities of increasing of recuperation's utilization were

examined partly by increasing of maximum voltage in a traction line according to European standard and partly by reduction of traction line resistance. Energetic benefit of both variants is analysed in the last part of this thesis.

KEYWORDS

recuperation; feeding system 3 kV DC; traction line; traction circuit; maximum permissible voltage

OBSAH

ÚVOD	10
1 FYZIKÁLNÍ A TECHNICKÁ PODSTATA PROBLÉMU	12
1.1 Energetický potenciál brzdění	12
1.1.1 Jízdní a traťové odpory	12
1.1.2 Zastavovací brzdění	15
1.1.3 Spádové brzdění	24
1.2 Možnosti využití rekuperačního brzdění	26
1.2.1 Vlastní spotřeba hnacích vozidel a vlaků	26
1.2.2 Zásobníky energie	29
1.2.3 Návrat energie zpět do rozvodné sítě	29
1.2.4 Odběr jiným trakčním vozidlem	30
2 PARAMETRY ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍCH SE NA REKUPERACI	31
2.1 Způsob napájení ve stejnosměrném systému 3 kV	31
2.2 Trakční měnič	32
2.2.1 Vnější charakteristika trakční měničky	32
2.2.2 Náhradní schéma trakční měničky	35
2.3 Trakční vedení	36
2.4 Zpětná cesta	38
2.5 Trakční vozidla	39
2.5.1 Typy a koncepce vozidel umožňujících rekuperační brzdění	39
2.5.2 Parametry moderních vozidel	40
2.6 Vliv účinnosti jednotlivých komponent na efekt rekuperačního brzdění	40
3 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V TRAKČNÍM VEDENÍ	42
3.1 Limitní hodnoty napětí, požadavky norem a předpisů	42
3.2 Náhradní úsek	43
3.3 Situace bez rekuperace	43
3.3.1 V úseku není žádný odběr	43
3.3.2 V úseku je jediný odběr	43
3.3.3 V úseku je více odběrů	44
3.4 Situace při rekuperaci	45
3.4.1 V úseku je vozidlo rekuperačně brzdící	45
3.4.2 Způsob výpočtu	48
3.4.3 Výpočet pomocí tabulkového procesoru	50

4	MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ VYUŽITÍ REKUPERACE	51
4.1	Poměry při převažujícím odběru v úseku s rekuperujícím vozidlem ($I_X, I_Y < I_{Z1}$)	51
4.1.1	Výkonové poměry	52
4.1.2	Energetické poměry (Situace 4)	56
4.2	Poměry při převažujícím odběru v sousedních úsecích ($I_X, I_Y > I_{Z1}$)	61
4.2.1	Výkonové poměry	61
4.2.2	Energetické poměry	62
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
	SEZNAM TABULEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM ZKRATEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH	74

ÚVOD

Na českých elektrizovaných drahách se pro trakční práci spotřebuje ročně více než 1 TWh elektrické energie [6], [7], což spolu s ostatními drážními odběry dělá ze železnice jednoho z největších spotřebitelů elektřiny v České republice. Samozřejmou snahou všech dopravců je proto dosažení co největších úspor v této oblasti. Pokud se v budoucnu prosadí způsob plateb za elektřinu podle skutečné spotřeby měřené elektroměrem na vozidle (dosud se platí paušálně za kWh/1 000 tkm), bude tato snaha ještě více posílena. V úvahu je třeba vzít i fakt, že se vzrůstající dovolenou rychlostí vozidel narůstá i množství mařené kinetické energie.

Jedním ze způsobů, jak zmenšit energetickou náročnost železniční dopravy na elektrifikovaných tratích, je přeměna jinak mařené kinetické energie při brzdění vlaků na elektrickou, čímž se umožní její opětovné využití k užitečné práci.

Vzhledem k tématu práce by bylo vhodné zmínit se alespoň v krátkosti o systémech napájení trakčního vedení, o používaných typech trakčních motorů a o problematice brzdění vlaků.

V ČR se na elektrifikovaných železničních tratích používají (až na dvě výjimky¹) dva systémy napájení, a to původní stejnosměrný systém, dnes o napětí 3 kV, a od šedesátých let 20. století také střídavý jednofázový systém o napětí 25 kV/50 Hz.

Hnací vozidla byla osazena již od počátku stejnosměrnými motory se sériovým, později s cizím buzením, které byly vhodné jak z hlediska jednoduché odporové regulace otáček, tak i z hlediska výhodné charakteristiky moment – otáčky. Zhruba od devadesátých let minulého století se však díky pokroku v oblasti výkonové elektroniky (frekvenční měniče) uplatňují v trakčních pohonech železničních vozidel téměř výhradně asynchronní motory s kotvou nakrátko.

Co se týká brzdění vlaků, nejstarším systémem, který se na železnici používá prakticky od jejích počátků, je brzdění tlakovzdušnými mechanickými brzdami (dříve špalkovými, působícími přímo na obvod kol vozidel, dnes většinou kotoučovými). Tlakový vzduch je vyráběn kompresorem na hnacím vozidle a dále rozveden po celé délce vlaku průběžným potrubím, na které je napojeno brzdové ústrojí každého vozu. Protože se jedná o třecí brzdy, je zřejmé, že veškerá kinetická energie, která se vlaku brzděním odebírá, se v těchto brzdách mění na ztrátové teplo. Tato soustava tvoří dodnes z několika důvodů hlavní systém pro provozní brzdění a musí být, na rozdíl od ostatních brzdňích systémů zmíněných níže,

¹ Prvním případem je nejstarší elektrifikovaná trať na našem území, tedy trať Tábor – Bechyně, napájená stejnosměrným napětím 1 500 V, druhým případem je trať Znojmo – Šatov napájená střídavým napětím 16 kV/16,7 Hz.

použitelná za všech podmínek. Jde jak o důvody bezpečnostní (automatické zabrzdění všech částí vlaku v případě jeho roztržení), tak také o možnost plynulého brzdění vlaku až do nulové rychlosti, včetně zajištění stojící soupravy. Proto se ostatní brzdové systémy způsobů používají vždy jako určitá nadstavba, byť mohou být v mnoha konkrétních provozních situacích převažujícím nebo dokonce i jediným zdrojem brzdné síly.

Nezávisle na druhu trakce se používají i další ztrátové způsoby brzdění vlaku, například magnetickými kolejnicovými brzdami nebo brzdami na principu vířivých proudů.

Hnací vozidla s elektrickými motory (jak závislé tak i nezávislé trakce) s výhodou využívají dalšího způsobu brzdění, a to elektrodynamického brzdění trakčními motory. V tomto režimu jsou trakční motory poháněny kinetickou energií brzděné soupravy a pracují tedy v generátorickém chodu. Vyrobená elektrická energie se pak většinou maří v odpornících na vozidle, tudíž se opět jedná o ztrátový způsob brzdění.

V případě elektrické závislé trakce se však elektrická energie vyrobená při generátorickém chodu motorů nemusí mařit v odpornících, ale může se (za určitých podmínek) dodávat zpět do napájecí soustavy (trakčního vedení), odkud ji lze dále využít. Takový způsob brzdění se nazývá brzdění rekuperační², a je možno jej využít ve všech napájecích systémech.

Zatímco elektrodynamické brzdění do odporníků se využívá již dlouhou dobu, rekuperační brzdění se všeobecně rozšířilo až s rozvojem výkonové polovodičové techniky. Jelikož však proces rekuperace podléhá (obzvlášť na stejnosměrné trakci) jistým omezením snižujícím jeho výsledný efekt, bude se tato práce zabývat možnostmi, jak tato omezení co nejvíce eliminovat.

Pro výpočty uvedené ve 4. kapitole byla vytvořena aplikace v tabulkovém procesoru, která je přílohou této práce.

² Rekuperací by se měl obecně označovat jakýkoliv způsob, který umožňuje využívání mařené energie opět k užitečné práci. Pro účely této práce se rekuperací nebo rekuperačním brzděním bude rozumět způsob brzdění popsáný v tomto odstavci.

1 FYZIKÁLNÍ A TECHNICKÁ PODSTATA PROBLÉMU

1.1 Energetický potenciál brzdění

Kinetická energie pohybujícího se hmotného bodu je úměrná jeho hmotnosti a čtverci jeho rychlosti. V případě vlaku, považovaného pro zjednodušení za hmotný bod, do hry navíc vstupuje tzv. součinitel rotačních hmot ξ , respektující energii obsaženou v rotujících hmotách soupravy, což jsou například dvojkolí, převodovky a kotvy trakčních motorů či vozidlových generátorů. Tento bezrozměrný součinitel nabývá hodnot dle druhu vozidla, pro elektrické lokomotivy se udává 1,2 až 1,25, pro osobní vozy asi 1,05 a pro vozy nákladní od 1,04 (ložené) do 1,12 (prázdné). Ve výpočtech se pro zjednodušení často počítá s určitou hodnotou ξ pro celý vlak, která je vzhledem k poměru hmotností lokomotivy a vozů většinou blízká hodnotě udávané pro vozy. Kinetická energie vlaku je pak

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m_{VLAK} \cdot v^2 \cdot \xi \quad [\text{J}; \text{kg}, \text{m/s}] \quad (1.1)$$

což se dá při použití jednotek obvyklých v železniční praxi psát jako

$$E_K = 1072 \cdot 10^{-5} \cdot m_{VLAK} \cdot V^2 \cdot \xi \quad [\text{kWh}; \text{t}, \text{km/h}] \quad (1.2)$$

kde je:

m_{VLAK}	celková hmotnost vlaku [t]
V	rychlost vlaku [km/h]
ξ	součinitel rotačních hmot

Je zřejmé, že při hmotnostech vlaků v řádu stovek až tisíců tun a rychlostech až 160 km/h není množství pohybové energie, které je nutno vlaku při brzdění odebrat (přeměnit na jiný druh energie), nikterak malé.

Do procesu přeměny však nevstupuje veškerá energie jedoucího vlaku, neboť během brzdění se vlak stále pohybuje a část energie se tak spotřebuje na krytí jízdních a traťových odporů.

1.1.1 Jízdní a traťové odpory

Během jízdy působí na vozidla různé trakční síly a odpory, z nichž jsou pro účely této práce zajímavé především odpory jízdní a odpory traťové.

Jízdní odpor O_j [kN] zahrnuje především:

- odpor smykového tření v ložiskách
- odpor valivého tření mezi kolem a kolejnicí

- odpor vzduchu

V trakční mechanice se často používají měrné veličiny, proto se zavádí tzv. součinitel jízdního odporu o_j [N/kN], což je jízdní odpor vztažený na 1 kN tíhy vozidla jedoucího ustálenou rychlostí. Pro ten pak platí obecná rovnice

$$o_j = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}] \quad (1.3)$$

kde jsou:

a, b, c koeficienty respektující jednotlivé složky tření³
 V rychlost [km/h]

Pro vyčíslení součinitelů jízdních odporů se nejčastěji vychází z empirických vztahů, které jsou vytvořeny na základě reálných pokusů. V literatuře je možno najít více vztahů pro jednotlivé druhy vozidel (např. [5], [11]), pro moderní vozidla je dle [14] možno použít vztahy následující:

- pro čtyřnápravovou elektrickou lokomotivu:

$$o_{jEL} = 1 + 0,00026 \cdot V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}] \quad (1.4)$$

- pro ložené čtyřnápravové nákladní vozy:

$$o_{jV} = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}] \quad (1.5)$$

- a pro čtyřnápravové osobní vozy:

$$o_{jV} = 1,8 + 0,00023 \cdot V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}] \quad (1.6)$$

Součinitel jízdního odporu o_{jVLAK} celého vlaku (lokomotiva + vozy) je potom v poměru ke hmotnostem jednotlivých částí vlaku

$$o_{jVLAK} = \frac{m_{EL} \cdot o_{jEL} + m_V \cdot o_{jV}}{m_{EL} + m_V} \quad [\text{N/kN}] \quad (1.7)$$

kde je:

m_{EL} hmotnost lokomotivy [t]
 m_V celková hmotnost vozů [t]

³ Vzhledem k tomu, že lineární člen lze v praktických výpočtech zanedbat či zahrnout do ostatních, přechází rovnice (1.3) často na zjednodušený tvar

$$o_j = a + c \cdot V^2$$

Traťový odpor O_t [kN] zahrnuje v našich podmínkách především:

- odpor z oblouku
- odpor ze sklonu trati

Pro výpočty se opět používají měrné jednotky udávané v N/kN, tedy součinitelé traťového odporu o_t , odporu oblouku o_{obl} a odporu sklonu o_{skl} .

Součinitel odporu z oblouku je podobně jako součinitel jízdního odporu udáván pomocí empirických vztahů, zavedených různými autory. Pro hlavní dráhy s poloměrem oblouku r lze například použít vztah

$$o_{obl} = \frac{650}{r - 55} \quad [\text{N/kN}; \text{m}]$$

Součinitel odporu sklonu je díky malému sklonu tratí možno považovat za číselně rovný sklonu trati s udaným v promile⁴, tedy

$$o_{skl} \cong s \quad [\text{N/kN}; \text{‰}]$$

Součinitel traťového odporu je potom

$$o_t = o_{obl} + o_{skl} \quad [\text{N/kN}]$$

Při jízdě do stoupání působí odpor ze sklonu proti jízdě vlaku a o_{skl} má pro tyto výpočty kladné znaménko, při klesání naopak. Celkový součinitel trakčního odporu působícího na vlak během jízdy ustálenou rychlostí je

$$o_{TRAK} = o_{jVLAK} + o_t = o_{jVLAK} + o_{obl} + o_{skl} \quad [\text{N/kN}] \quad (1.8)$$

Energie E_O , která je spotřebována na překonání trakčního odporu na určité vzdálenosti ℓ se dá při uvažování konstantní rychlosti psát jako

$$E_O = o_{TRAK} \cdot m_{VLAK} \cdot g \cdot \ell \quad [\text{J}; \text{N/N}, \text{kg}, \text{m/s}^2, \text{m}]$$

což je po převedení na obvyklé jednotky

$$E_O = 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot o_{TRAK} \cdot m_{VLAK} \cdot \ell \quad [\text{kWh}; \text{N/kN}, \text{t}, \text{km}] \quad (1.9)$$

⁴ Odpor ze sklonu $O_{skl} = G \cdot \sin \alpha$ [N; N], kde α je úhel stoupání a G tíha vozidla. Jelikož sklon běžných železničních tratí bývá poměrně malý (max. v řádu několika desítek promile), je možno sinus α nahradit tangentou, což je převýšení stoupání h ku jeho délce l , tedy $\sin \alpha \approx \tan \alpha = h / l$. Z toho vyplývá, že $O_{skl} = G \cdot h / l$ a součinitel odporu sklonu $o_{skl} = G \cdot h / (l \cdot g \cdot m)$ [N/N; N, m, m, m/s², kg], což je po převedení na obvyklé jednotky $o_{skl} = h / l = s$ [N/kN; m, km; ‰].

1.1.2 Zastavovací brzdění

Zastavovacím brzděním se rozumí snížení rychlosti vlaku z rychlosti počáteční na nulovou. Vycházíme z následujících úvah:

- při zastavovacím brzdění na železnici jsou výchozími parametry rychlost vlaku na začátku brzdění v_0 a zábrzdá vzdálenost ℓ_B
- uvažujeme pro jednoduchost konstantní odrychlení po celou dobu brzdění

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot \ell_B} \quad [\text{m/s}^2; \text{m/s}, \text{m}] \quad (1.10)$$

čímž se dá zavést konstantní celková brzdná síla

$$F_{B_{\text{celk}}} = m \cdot a \cdot \xi \quad [\text{kN}; \text{t}, \text{m/s}^2, -] \quad (1.11)$$

- tato celková brzdá síla však v sobě zahrnuje i účinky trakčního odporu O_{TRAK} , tudíž brzdá síla F_B , která musí být vyvozena vlakovými brzdami je dána pro každou rychlost rozdílem

$$F_B = F_{B_{\text{celk}}} - O_{\text{TRAK}} \quad [\text{kN}] \quad (1.12)$$

- jelikož jízdní odpor s rychlostí stoupá, bude brzdá síla F_B s rychlostí klesat
- v každém okamžiku brzdění je vyvozen brzdý výkon P_B

$$P_B = F_B \cdot v \quad [\text{kW}; \text{kN}, \text{m/s}] \quad (1.13)$$

Při elektrodynamickém brzdění je nutno respektovat některá omezení:

Omezení ohledně brzdé síly:

- použitím jen elektrodynamické brzdy ($F_B = F_{\text{EDB}}$) je brzdá síla omezena maximální adhezní silou $F_{\text{adh,max}}$, která je dána adhezní tíhou brzdícího vozidla G_{adh} a součinitelem adheze⁵ μ

$$F_B = F_{\text{EDB}} \leq F_{\text{adh,max}} = \mu_{\text{max}} \cdot G_{\text{adh}} = \mu_{\text{max}} \cdot m_{\text{adh}} \cdot g \quad [\text{kN}; -, \text{t}, \text{m/s}^2] \quad (1.14)$$

- pokud je potřebná brzdá síla větší než $F_{\text{adh,max}}$, není možno přenést brzdou sílu pouze přes kola elektrodynamicky brzdícího vozidla (lokomotivy) a pro dodržení zábrzdé vzdálenosti je třeba brzdit navíc i jinými vlakovými brzdami; nebo při dodržení $F_{\text{EDB}} \leq F_{\text{adh,max}}$ zvětšit zábrzdnou dráhu v souladu se vztahy (1.10) a (1.11)

⁵ Má-li být elektrodynamická brzda započitatelná do brzdících procent, počítá se dle požadavků našich železnic i TSI pro kolejová vozidla s ohledem na bezpečnost se součinitelem adheze při brzdění maximálně $\mu_{\text{max}} = 0,15$.

- od určité rychlosti (otáček) klesá strmě brzdná síla, nelze tedy brzdit do nulové rychlosti; při nízkých otáčkách je nízké i indukované napětí ve stroji ($U_i \approx n$), tím klesá proud dodávaný generátorem do stejnosměrném meziobvodu, a tím klesá také brzdný moment, který je tímto proudem vytvářen ($M_B \approx I_{ss}$)

Omezení ohledně brzdného výkonu:

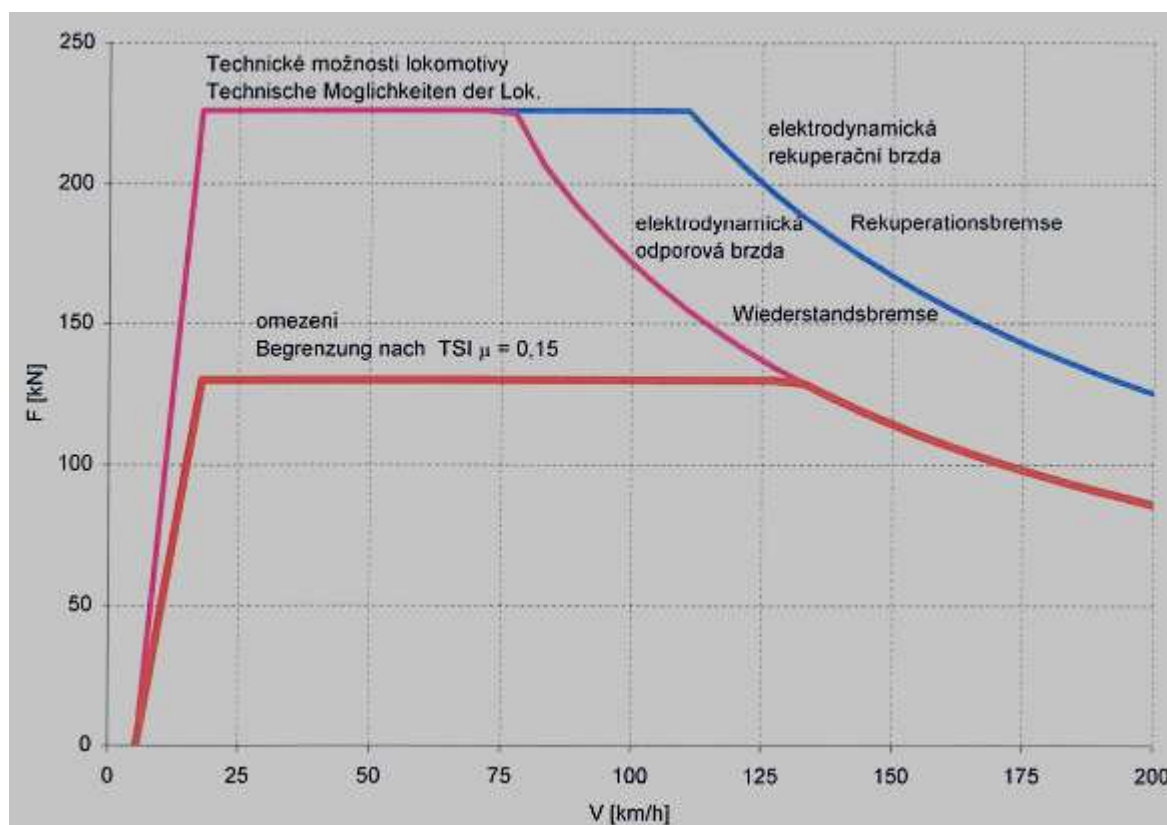
- okamžitý brzdný výkon P_B je dán součinem brzdné síly a okamžité rychlosti, při použití jen elektrodynamického brzdění je okamžitý brzdný výkon

$$P_{EDB} = \frac{F_{EDB} \cdot V}{3,6} \quad [\text{kW}; \text{kN}, \text{km/h}] \quad (1.15)$$

- pokud je brzdná síla omezena adhezí ve smyslu předchozích bodů, je i okamžitý výkon P_{EDB} omezen maximální adhezní silou na

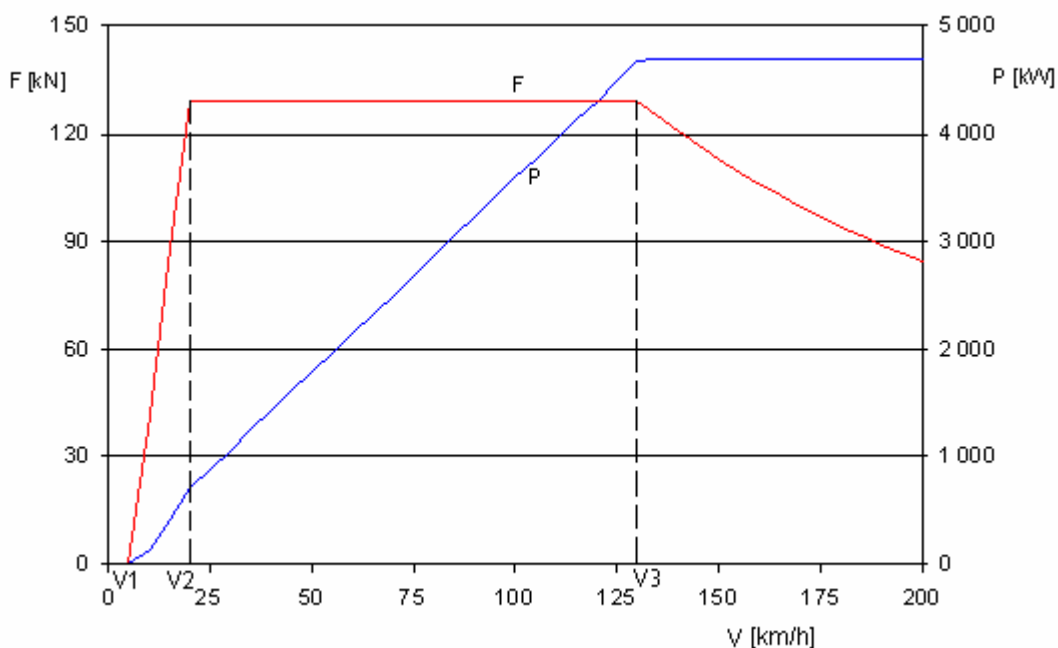
$$P_{EDB} = \frac{F_{adh,max} \cdot V}{3,6} \quad [\text{kW}; \text{kN}, \text{km/h}] \quad (1.16)$$

- maximální krátkodobý elektrický výkon elektrodynamické brzdy je navíc omezen parametry soustrojí motor (generátor) – měnič a případně také výkonovým dimenzováním brzdových odporníků



Obr. 1.1 Brzdová charakteristika lokomotivy Škoda 109 E [10]

Na obrázku 1.1 je zakreslená brzdová charakteristika elektrické lokomotivy Škoda 109 E řady 380, kde jsou výše zmíněná omezení patrná. Na obrázku 1.2 je navíc přidána křivka výkonu elektrodynamické brzdy odpovídající omezení⁶ $\mu = 0,15$ a omezenému výkonu brzdových odporníků podle obrázku 1.1. Od maximální rychlosti do rychlosti $V_3 \approx 131$ km/h je brzdná síla omezena maximálním výkonem brzdových odporníků (podle [10] je největší výkon na obvodu kol při brzdění do odporníků 4 700 kW a při rekuperaci 6 963 kW), dále je možno uplatnit konstantní maximální brzdnu sílu 129 kN danou součinitelem adheze $\mu = 0,15$ a od rychlosti $V_2 \approx 18$ km/h do rychlosti $V_1 \approx 5$ km/h klesá brzdná síla strmě na nulu.



Obr. 1.2 Výkonová charakteristika elektrodynamické brzdy lokomotivy Škoda 109 E při brzdění do odporníků

Na následujících příkladech bude ukázáno, jak se tyto úvahy projeví v praktických případech.

Pro jednoduchost budeme uvažovat zastavování vlaku při konstantním odrychlení na přímé rovné trati na zábrzdné vzdálenosti 1 000 m, adhezní hmotnost lokomotivy je 88 tun.

Př. 1.1: Zastavení nákladního vlaku o celkové hmotnosti 2 588 tun (88 t lokomotiva + 2 500 t vozy) jedoucího rychlostí 80 km/h na dráze 1 000 m.

⁶ Při rekuperačním brzdění s tímto omezením součinitele adheze by bylo možno uvažovat brzdnu sílu konstantní až do rychlosti asi 192 km/h (protažení vodorovné části červené křivky na obrázku 1.1 až do průsečíku s modrou křivkou rekuperační brzdy), tudíž by se na našich železnicích při rychlostech do 160 km/h omezení výkonu EDB vůbec neprojevovalo.

Po dosazení do (1.10) a (1.11) vyjde při použití součinitele rotačních hmot $\xi = 1,05$

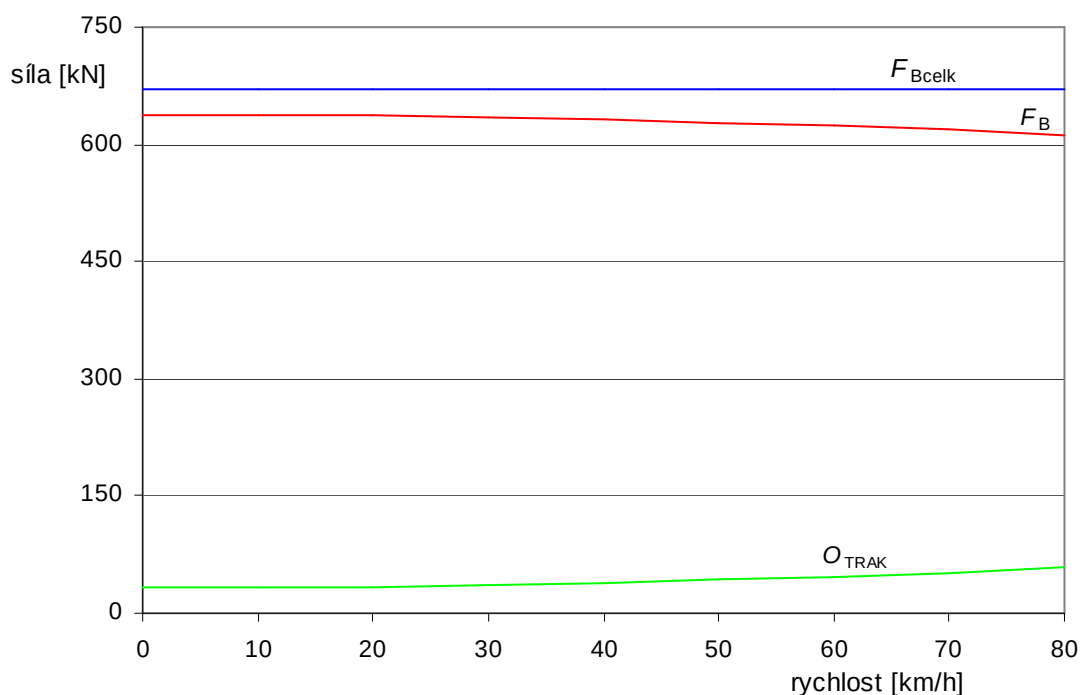
$$a = \frac{22,222^2}{2000} = 0,247 \text{ m/s}^2$$

$$F_{B_{celk}} = 2588 \cdot 0,247 \cdot 1,05 \cong 671 \text{ kN}$$

Dále je třeba spočítat součinitel jízdního a traťového odporu pro každou rychlost podle (1.4), (1.5) a (1.7), z nich podle hmotnosti vlaku trakční odpory O_{TRAK} a s použitím vztahu (1.12) vyjde křivka brzdné síly, která musí být vyvinuta vlakovými brzdami (viz obrázek 1.3)

$$F_B(V) = F_{B_{celk}} - O_{TRAK}(V)$$

Situace je zachycena na obrázku 1.3.



Obr. 1.3 Závislost celkové brzdné síly $F_{B_{celk}}$, brzdné síly vyvozené vlakovými brzdami F_B a trakčního odporu O_{TRAK} na rychlosti pro Př. 1.1

Z obrázku však vyplývá, že trakční odpor O_{TRAK} lze bez velké chyby nahradit v celém rozsahu například jeho střední hodnotou, což je v tomto případě 41,822 kN (jeho hodnoty stoupají od 32,8 kN při nulové rychlosti do 58,2 kN při rychlosti 80 km/h). Uvažovaná hodnota součinitele trakčního odporu o_{TRAK} pak bude při dosazení $O_{TRAK} = 41,822 \text{ N}$ a hmotnosti vlaku $m = 2\,588 \text{ t}$

$$o_{TRAK} = \frac{O_{TRAK}}{(m_{EL} + m_V) \cdot g} = \frac{41822}{2588 \cdot 9,806} = 1,648 \text{ N / kN} \quad (1.17)$$

Z toho vyplývá i možnost zavedení konstantní brzdné síly vlakových brzd F_B , která vychází podle (1.12)

$$F_B \cong 671 - 42 = 629 \text{ kN}$$

Největší brzdná síla elektrodynamické brzdy je omezena adhezí podle (1.14) na

$$F_{EDB\max} = F_{adh,\max} = 0,15 \cdot 9,806 \cdot 88 \cong 129 \text{ kN}$$

Největší výkon elektrodynamické brzdy (na začátku brzdění) bude podle (1.16)

$$P_{EDB\max} = \frac{129 \cdot 80}{3,6} \cong 2867 \text{ kW}$$

což znamená, že výkonové omezení EDB dané výkonem odporníků (4 400 kW) se v tomto případě neuplatní (to lze vypočítat i z obrázků 1.1 a 1.2).

Kinetická energie vlaku na začátku brzdění je podle vztahu (1.2)

$$E_K = 1072 \cdot 10^{-5} \cdot 2588 \cdot 80^2 \cdot 105 \cong 186 \text{ kWh}$$

Energie potřebná na překonání trakčního odporu je dle (1.9)

$$E_O = 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot 1648 \cdot 2588 \cdot 1 \cong 12 \text{ kWh}$$

a vlakovými brzdami je proto třeba zmařit energii

$$E_B = E_K - E_O = 186 - 12 = 174 \text{ kWh}$$

Zbývá určit, jakou část tohoto množství energie je možno zrekuperovat. Rychlým odhadem lze zjistit, že vzhledem k potřebné brzdné síle vlakových brzd $F_B = 629 \text{ kN}$ a největší brzdné síle elektrodynamické brzdy $F_{EDB\max} = 129 \text{ kN}$ (dané adhezí) bude možno zrekuperovat asi

$$\frac{F_{EDB\max}}{F_B} \cdot 100 = \frac{129}{629} \cdot 100 = 20,5 \% \text{ energie} \quad (1.18)$$

Nejjednodušším způsobem jak zjistit energii, která se zmaří elektrodynamickou brzdou, je uvažovat konstantní brzdou sílu $F_{EDB\max}$ až do nulové rychlosti; potom je celková energie zmařená elektrodynamickou brzdou na zábrzdě vzdálenosti 1 000 m

$$E_{EDB} = \frac{F_{EDB\max} \cdot \ell_B}{3600} = \frac{129 \cdot 1000}{3600} \cong 36 \text{ kWh} \quad (1.19)$$

K přesnějšímu výsledku by bylo možno dospět následovně. Z obrázku 1.2 lze vyčíst, že brzdná síla EDB je konstantní zhruba v rozmezí rychlostí 131 km/h až 18 km/h, pak lineárně klesá a při rychlosti asi 5 km/h dosáhne nuly.

Doba brzdění z $V_0 = 80$ km/h na $V_2 = 18$ km/h je při použití již dříve vypočteného konstantního odrychlení $a = 0,247$ m/s²

$$t_{02} = \frac{V_0 - V_2}{3,6 \cdot a} = \frac{80 - 18}{3,6 \cdot 0,247} = 69,73 \text{ s}$$

a dráha ujetá za tento čas

$$\ell_{02} = \frac{V_0}{3,6} \cdot t_{02} - 0,5 \cdot a \cdot t_{02}^2 = \frac{80}{3,6} \cdot 69,73 - 0,5 \cdot 0,247 \cdot 69,73^2 \cong 949 \text{ m}$$

Na této dráze se elektrodynamickou brzdou zmaří energie

$$E_{EDB,02} = \frac{F_{EDB} \cdot \ell_{02}}{3600} = \frac{129 \cdot 949}{3600} = 34 \text{ kWh}$$

Podobně je doba brzdění z $V_2 = 18$ km/h na $V_1 = 5$ km/h při stejném odrychlení

$$t_{21} = \frac{V_2 - V_1}{3,6 \cdot a} = \frac{18 - 5}{3,6 \cdot 0,247} = 14,62 \text{ s}$$

a dráha ujetá za tento čas

$$\ell_{21} = \frac{V_2}{3,6} \cdot t_{21} - 0,5 \cdot a \cdot t_{21}^2 = \frac{18}{3,6} \cdot 14,62 - 0,5 \cdot 0,247 \cdot 14,62^2 \cong 47 \text{ m}$$

Jak je vidět na obrázcích 1.1 a 1.2, brzdná síla v tomto intervalu klesá lineárně s rychlostí podle obecné rovnice

$$F_{EDB,21} = F_{EDB_{\max}} - k \cdot V + q$$

což (po dosazení rychlosti v metrech za sekundu) vychází na

$$F_{EDB,21} = 35,723 \cdot v - 49,615 \quad [\text{kN}; \text{m/s}] \quad (1.20)$$

Do této rovnice lze z rovnic pro rovnoměrně zpomalený pohyb dosadit:

- za rychlost

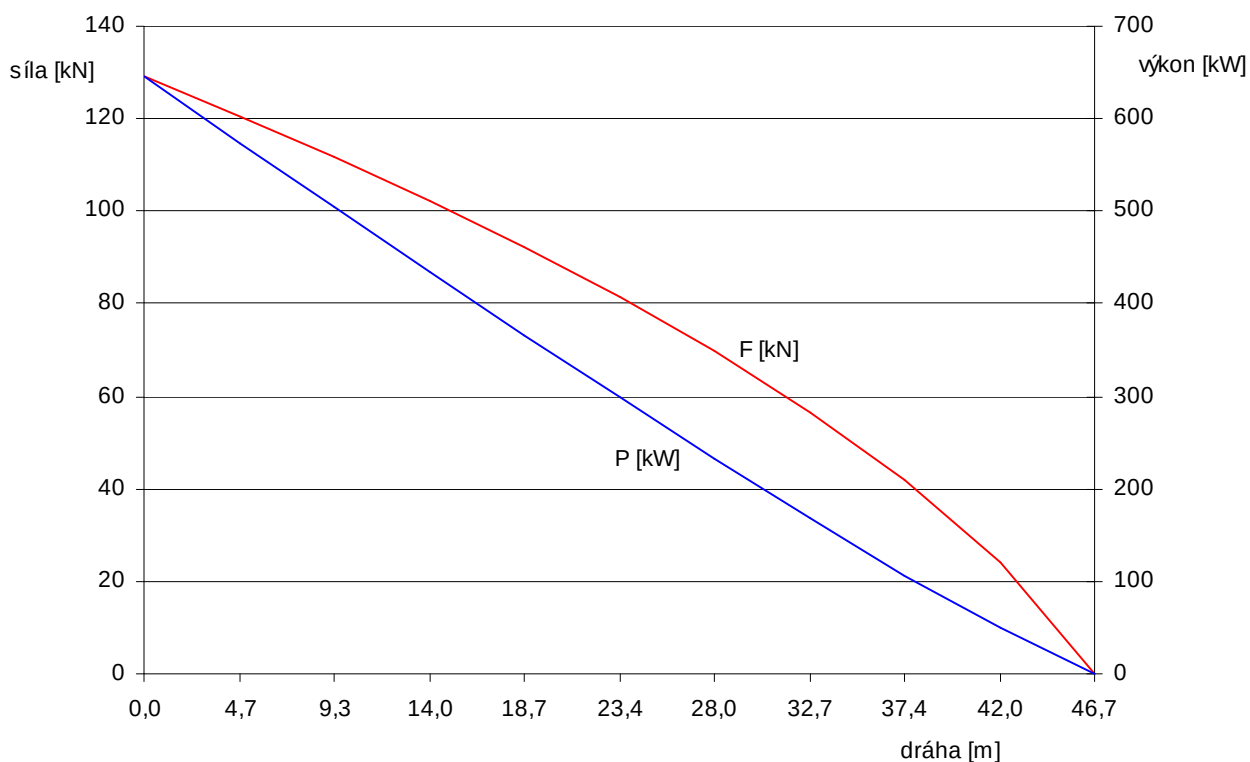
$$v = v_0 - a \cdot t \quad [\text{m/s}; \text{m/s}^2, \text{s}]$$

- a za čas

$$t = \frac{v_0 - \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot \ell}}{a} \quad [\text{s}; \text{m/s}, \text{m/s}^2, \text{m}]$$

a získat tak závislost síly na dráze (viz obrázek 1.4)

$$\begin{aligned} F_{EDB,21} &= 35,723 \cdot \left(v_0 - a \cdot \frac{v_0 - \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot \ell}}{a} \right) - 49,615 = 35,723 \cdot \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot \ell} - 49,615 = \\ &= 35,723 \cdot \sqrt{25 - 0,494 \cdot \ell} - 49,615 \quad [\text{kN}; \text{m}] \end{aligned} \quad (1.21)$$



Obr. 1.4 Závislost brzděné síly a výkonu na rychlosti v poslední fázi brzdění
(z rychlosti 18 km/h na 5 km/h)

Integrací křivky této síly přes dráhu ℓ_{21} (tedy v mezích od 0 do 47 m) se získá energie zmařená elektrodynamickou brzdou při poklesu rychlosti z 18 na 5 km/h.

$$E_{EDB,21} = \int_0^{47} F_{EDB,21} \cdot d\ell = \int_0^{47} (35,723 \cdot \sqrt{25 - 0,494 \cdot \ell} - 49,615) \cdot d\ell \quad [\text{kWs}; \text{kN}, \text{m}] \quad (1.22)$$

Substitucí $x = 25 - 0,494 \cdot \ell$, $dx/d\ell = -0,494$ a vyřešením integrálu

$$\int x^{0,5} d\ell = \frac{1}{-0,494} \cdot \int x^{0,5} dx = \frac{1}{-0,494} \cdot \left(\frac{x^{1,5}}{1,5} \right) = -1,35 \cdot x^{1,5}$$

vychází po zpětném dosazení do původní rovnice (1.22)

$$E_{EDB,21} = 35,723 \cdot (-135) \cdot \left[(25 - 0,494 \cdot \ell)^{15} \right]_0^{47} - 49,615 \cdot 47 = 3581,63 \text{ kWs} = 0,995 \text{ kWh}$$

Celková kinetická energie, která se elektrodynamickou brzdou zmaří je

$$E_{EDB} = E_{EDB,02} + E_{EDB,21} = 34 + 0,995 \cong 35 \text{ kWh}$$

což je hodnota blízká té, která vyšla při jednoduchém výpočtu v (1.19).

K rekuperaci je tak možno využít

$$\frac{E_{EDB}}{E_B} \cdot 100 = \frac{35}{174} \cdot 100 = 20,1\% \text{ energie určené ke zmaření v brzdách vlaku,}$$

což se opět příliš neliší od výsledku v jednoduchém výpočtu v (1.18).

Z výpočtu vyplývá, že pro účely této práce se bez velké chyby mohou uvažovat zmíněná zjednodušení podle vztahů (1.18) a (1.19).

Pro zajímavost uvedme, že k tomu, aby se zmíněný vlak ubrzdl samotnou elektrodynamickou brzdou při respektování $\mu = 0,15$, by musela být zábrzdňá dráha zhruba

$$\ell_B = \frac{3600 \cdot E_K}{F_{EDB} + O_{TRAK}} = \frac{3600 \cdot 186}{129 + 418} \cong 3920 \text{ m} \quad [\text{m; kWh, kN}] \quad (1.23)$$

Př. 1.2: Uvažujme úplné zastavení rychlíku se stejnou lokomotivou o celkové hmotnosti 400 tun jedoucího po rovině rychlostí 120 km/h. Zábrzdňá vzdálenost je opět 1 000 m.

Stejným způsobem jako v předchozím příkladu vychází odrychlení a celková brzdňá síla podle (1.10) a (1.11)

$$a = \frac{33,333^2}{2000} = 0,556 \text{ m/s}^2$$

$$F_{Bcelk} = 400 \cdot 0,556 \cdot 108 \cong 240 \text{ kN}$$

Střední hodnota trakční odporu O_{TRAK} je v tomto případě 11,369 kN.

Uvažovaná hodnota součinitele trakční odporu o_{TRAK} pak bude při dosazení $O_{TRAK} = 11\,369 \text{ N}$ a hmotnosti vlaku $m_{VLAK} = 400 \text{ t}$ do (1.17)

$$o_{TRAK} = \frac{O_{TRAK}}{m_{VLAK} \cdot g} = \frac{11369}{400 \cdot 9,806} = 2,898 \text{ N/kN}$$

Vlakové brzdy musí vyvinout stálou brzdňou sílu podle (1.12)

$$F_B \cong 240 - 11 = 229 \text{ kN}$$

Největší brzdná síla elektrodynamické brzdy je opět omezena adhezí podle (1.14) na

$$F_{EDB\max} = 0,15 \cdot 9,806 \cdot 88 \cong 129 \text{ kN}$$

a největší výkon elektrodynamické brzdy bude podle (1.16)

$$P_{EDB} = \frac{129 \cdot 120}{3,6} = 4300 \text{ kW}$$

To opět ukazuje, že výkonové omezení brzdových odporníků (4 400 W) se při této rychlosti ještě neuplatní, i když se již výrazně přibližuje.

Kinetická energie vlaku na začátku brzdění je podle (1.2)

$$E_K = 1072 \cdot 10^{-5} \cdot 400 \cdot 120^2 \cdot 1,08 \cong 67 \text{ kWh}$$

Energie potřebná na překonání trakčního odporu je dle (1.9)

$$E_O = 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot 2,898 \cdot 400 \cdot 1 \cong 3 \text{ kWh}$$

a vlakovými brzdami je proto třeba zmařit energii

$$E_B = E_K - E_O = 67 - 3 = 64 \text{ kWh}$$

Při respektování zjednodušení zdůvodněného v předchozím případě je energie, která se vlaku elektrodynamickým brzděním odebere podle (1.19)

$$E_{EDB} = \frac{129 \cdot 1000}{3600} \cong 36 \text{ kWh}$$

tudíž $64 - 36 = 28 \text{ kWh}$ se musí zmařit v ostatních brzdách. K rekuperaci je tak možno využít pouze 56 % kinetické energie vlaku určené ke zmaření při brzdění.

Opět pro zajímavost uvedme, že při použití pouze elektrodynamické brzdy by musela být zábrzdna dráha podle (1.23)

$$\ell_B = \frac{3600 \cdot E_K}{F_{EDB} + O_{TRAK}} = \frac{3600 \cdot 67}{129 + 11,4} \cong 1718 \text{ m}$$

Oproti minulému případu by tato zábrzdna dráha mohla být v reálném provozu již mnohdy akceptovatelná, a ukazuje se, že lze za cenu jistého prodloužení jízdní doby mnohem úsporněji brzdit na delší dráze (v tomto případě by mohlo do procesu rekuperace vstoupit i zbylých 44 % kinetické energie vlaku, tj. ne zcela zanedbatelných 28 kWh).

1.1.3 Spádové brzdění

Spádovým brzděním se rozumí udržování konstantní rychlosti vlaku při jízdě z klesání, kdy sklon trati způsobuje urychlování vlaku nad dovolenou rychlost. V tom případě je odpor ze sklonu záporný a v absolutní hodnotě je při dovolené rychlosti větší než jízdní a traťové odpory působící proti pohybu vlaku.

Při konstantním záporném trakčním odporu

$$o_{TRAK} = (o_{jVLAK} + o_{obl} + o_{skl}) < 0$$

musí vozidlo brzdit konstantní silou F_B , aby udrželo konstantní rychlost. V tom případě je konstantní i výkon brzděné síly ($P_B = F_B \cdot v$), čímž se oproti zastavovacímu brzdění zjednoduší výpočty.

Při jízdě z dostatečného spádu působí na vlak urychlující síla

$$F_O = -(o_{jVLAK} + o_{obl} + o_{skl}) \cdot m_{VLAK} \cdot g \cdot 10^{-3} \quad [\text{kN}; \text{N/kN}, \text{t}, \text{m/s}^2] \quad (1.24)$$

Při konstantní rychlosti musí proti této urychlující síle působit opačná síla brzdná

$$F_B = -F_O$$

V praktických případech se tyto úvahy projeví takto:

Př. 1.3: Uvažujme vlak podle Př. 1.1 v minulém odstavci (nákladní vlak o celkové hmotnosti 2 588 tun) jedoucí rychlostí 80 km/h ze spádu 10,3 ‰ na dráze 20 km. Odpor z oblouku zvolme na celé délce trati 0,3 N/kN (výsledný $o_{obl} + o_{skl} = -10 \text{ N/kN}$).

Součinitel měrného jízdního odporu o_{jVLAK} vyjde podle (1.4), (1.5) a (1.7) na 2,292 N/kN.

$$o_{TRAK} = o_{jVLAK} + o_{obl} + o_{skl} = 2,292 + (-10,3) + 0,3 = -7,708 \text{ N / kN}$$

Po dosazení do (1.24) vychází urychlující síla (záporný trakční odpor)

$$F_O = 7,708 \cdot 2588 \cdot 9,806 \cdot 10^{-3} \cong 196 \text{ kN}$$

Brzdná síla elektrodynamické brzdy je omezena adhezí stejně jako v předchozích příkladech podle (1.14) na

$$F_{adh,max} = 0,15 \cdot 88 \cdot 9,806 = 129 \text{ kN}$$

z čehož vyplývá, že pomocí EDB lze v tomto případě vyvinout jen 66 % potřebné brzděné síly.

Výkon EDB je v tomto případě podle (1.16)

$$P_{EDB} = \frac{129 \cdot 80}{3,6} \cong 2867 \text{ kW}$$

Energie zmařená elektrodynamickou brzdou je podle (1.19)

$$E_{EDB} = \frac{F_{EDB} \cdot \ell_B}{3600} = \frac{129 \cdot 20000}{3600} \cong 717 \text{ kWh}$$

Př. 1.4: Nakonec ještě ukažme, jak by se uvedené traťové poměry promítly do jízdy vlaku podle Př. 1.2 v minulém odstavci (rychlík o celkové hmotnosti 400 t) jedoucího stálou rychlostí 120 km/h z klesání 10,3 ‰. Odpor z oblouku zvolme stejně jako v Př. 1.3 na celé délce trati 0,3 N/kN (výsledný $o_{obl} + o_{skl} = -10 \text{ N/kN}$).

Součinitel měrného jízdního odporu o_{JVLAK} podle (1.4), (1.6) a (1.7) je 5,204 N/kN.

$$o_{TRAK} = o_{JVLAK} + o_{obl} + o_{skl} = 5,204 + (-10,3) + 0,3 = -4,796 \text{ N / kN}$$

Po dosazení do (1.24) vychází urychlující síla (záporný trakční odpor)

$$F_O = 4,796 \cdot 400 \cdot 9,806 \cdot 10^{-3} \cong 19 \text{ kN}$$

Brzdná síla elektrodynamické brzdy je omezena adhezí stejně jako v předchozím příkladu podle (1.14) na

$$F_{adh,max} = 0,15 \cdot 88 \cdot 9,806 = 129 \text{ kN}$$

z čehož vyplývá, že vlak lze v tomto případě přibrzďovat jen pomocí EDB.

Výkon EDB je v tomto případě podle (1.16)

$$P_{EDB} = \frac{19 \cdot 120}{3,6} \cong 633 \text{ kW}$$

Energie zmařená elektrodynamickou brzdou je podle (1.19)

$$E_{EDB} = \frac{19 \cdot 20000}{3600} \cong 106 \text{ kWh}$$

Z uvedených příkladů vyplývá, že v případě spádového brzdění je situace z hlediska využití rekuperačního brzdění příznivější, navíc zde v některých případech úplně odpadá nutnost použití průběžné vzduchové brzdy. Omezujícím faktorem použití elektrodynamické

brzdy je však složení některých nákladních vlaků, kdy by při brzdění v obloucích jen lokomotivou mohlo docházet k vytlačení lehčích vozů těžšími mimo koleje.

Všechny uvedené příklady slouží k nastínění silových, výkonových a energetických poměrů při elektrodynamickém brzdění za přijetí některých zjednodušujících předpokladů (konstantní odrychlení po celou dobu brzdění, brzdění na hranici adheze, využití elektrodynamického brzdění až do nulové rychlosti). Ačkoliv byly vybrány případy, které mohou v provozu běžně nastat, může být reálná situace při brzdění, například z hlediska adhezních poměrů, odlišná (jak horší, tak i lepší).

Celkový přehled výsledků příkladů 1.1 až 1.4 je uveden v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1 Výsledky příkladů 1.1 až 1.4

		m_{VLAK} [t]	V_0 [km/h]	l_B [km]	F_B [kN]	$F_{\text{EDB,max}}$ [kN]	$P_{\text{EDB},v0}$ [kW]	E_B [kWh]	E_{EDB} [kWh]	E_{EDB} / E_B [%]
Př. 1.1	zastavení	2 588	80	1	629	129	2 867	174	36	21
Př. 1.2	zastavení	400	120	1	229	129	4 300	64	36	56
Př. 1.3	spád	2 588	80	20	196	129	2 867	1 089	717	66
Př. 1.4	spád	400	120	20	19	129	633	106	106	100

Legenda:

m_{VLAK}	celková hmotnost vlaku [t]
V_0	počáteční rychlost při zastavování nebo konstantní rychlost na spádu [km/h]
l_B	brzdňá dráha
F_B	brzdňá síla, která musí být vyvozena vlakovými brzdami
$F_{\text{EDB,max}}$	maximální brzdňá síla vyvozená EDB (omezená adhezí)
$P_{\text{EDB},v0}$	výkon EDB při počáteční rychlosti brzdění
E_B	energie, která musí být zmařena vlakovými brzdami
E_{EDB}	energie zmařená elektrodynamickou brzdou

1.2 Možnosti využití rekuperačního brzdění

Z předešlé části je vidět, že množství energie, které by mohlo vstoupit do procesu rekuperace, není zanedbatelné. Jelikož se jedná o energii elektrickou, kterou nelze ve velkých množstvích jednoduše ukládat, je na místě otázka jejího dalšího využití.

1.2.1 Vlastní spotřeba hnacích vozidel a vlaků

Nejjednodušší možností jak zužítkovat rekuperovanou energii, je upotřebit ji pro vlastní spotřebu hnacího vozidla, kterou tvoří především kompresory a ventilátory, nebo ji upotřebit

na vlastní spotřebu tažených vozů, která je tvořena především vytápěním nebo klimatizací. Podle předpisu SŽDC V7 – *Trakční výpočty* je měrný příkon elektrického vytápění dálkových vlaků

$$e_{TOP} = 0,85 \cdot \left(0,5 - 0,5 \cdot \frac{T}{20} \right) \quad [\text{kW/t}] \quad (1.25)$$

kde T je vnější teplota [°C]

Spotřeba energie na vytápění vlaku je pak

$$E_{TOP} = e_{TOP} \cdot m_V \cdot t_{TOP} \quad [\text{kWh}] \quad (1.26)$$

kde je:

m_V celková hmotnost vozů [t]

t_{TOP} čas vytápění [h]

Jmenovitý výkon pomocných pohonů výše zmíněné moderní elektrické lokomotivy Škoda řady 380 je dle [10] asi 70 kW, tedy zhruba 1,1 % ze jmenovitého trakčního výkonu 6 400 kW. Při jízdě výkonem menším než jmenovitým je zřejmě menší i výkon pomocných pohonů, pro jednoduchost uvažujeme lineární závislost.

Př. 1.5: Uvažujme osmivozový rychlík z Př. 1.2 o celkové váze vozů 312 t zastavující na dráze 1 km z rychlosti 120 km/h při průměrné vnější teplotě v topném období +5 °C.

Doba zastavování je

$$t_B = t_{TOP} = \frac{2 \cdot \ell_B \cdot 3,6}{V_0} = \frac{2000 \cdot 3,6}{120} = 60 \text{ s} = 0,017 \text{ h}$$

Energie spotřebovaná na vytápění během brzdění dle (1.25) a (1.26)

$$E_{TOP} = 0,85 \cdot \left(0,5 - 0,5 \cdot \frac{5}{20} \right) \cdot 312 \cdot 0,017 \cong 1,7 \text{ kWh}$$

Výkon EDB při počáteční rychlosti $V_0 = 120$ km/h byl spočítán v příkladu 1.2, kde vyšlo $P_{EDB,V_0} = 4\,300$ kW. Střední výkon EDB během zastavování bude tedy zhruba 2 150 kW, což je 33,6 % udávaného jmenovitého výkonu. Uvažujme stálý výkon pomocných pohonů během zastavování také 33,6 % ze 70 kW jejich jmenovitého výkonu, tedy zhruba $P_{PP} = 23,5$ kW. Během doby brzdění 60 s se tak v pomocných pohonech spotřebuje energie $E_{PP} = 0,4$ kWh.

Na celou vlastní spotřebu vlaku E_{VS} (topení vlaku + pomocné pohony lokomotivy) připadají během brzdění asi $1,7 + 0,4 = 2,1$ kWh. Pomocí EDB se podle výpočtů

v příkladu 1.2 může zmařit energie $E_{EDB} = 36 \text{ kWh}$, takže ve vlastní spotřebě vlaku lze upotřebit jen zhruba 6 % případné rekuperované energie.

Př. 1.6: Stejný vlak při spádovém brzdění dle Př. 1.4, konstantní rychlost 120 km/h na dráze 20 km, průměrná vnější teplota v topném období +5 °C.

Čas brzdění je zde 10 minut, během kterého je:

- spotřeba na vytápění vozů dle (1.25) a (1.26) $E_{TOP} = 16,6 \text{ kWh}$
- výkon EDB vyšel v příkladu 1.4 na $P_{EDB} = 633 \text{ kW}$, což je 9,9 % udávaného jmenovitého výkonu, výkon pomocných pohonů uvažujeme tedy $P_{PP} = 6,9 \text{ kW}$
- spotřeba pomocných pohonů po dobu brzdění $E_{PP} = 1,2 \text{ kWh}$
- celková vlastní spotřeba vlaku po dobu brzdění (topení vlaku + pomocné pohony lokomotivy) $E_{VS} = 17,8 \text{ kWh}$, tedy zhruba 17 % ze 106 kWh případné rekuperované energie

Z uvedených příkladů vyplývá, že při zastavovacím brzdění by se v daných případech spotřebovala jen poměrně malá část rekuperační energie. Celkový přehled je v tabulce 1.2.

Tabulka 1.2 Výsledky příkladů 2.1 a 2.2

		V_0 [km/h]	E_{TOP} [kWh]	E_{PP} [kWh]	E_{VS} [kWh]	t_{REK} [min]	P_{PP} [kW]	E_{EDB} [kWh]	E_{VS} / E_{EDB} [%]
Př. 1.5	zastavení	120	1,7	0,4	2,1	1	23,5	36	6
Př. 1.6	spád	120	16,6	1,2	17,8	10	6,9	106	17

Legenda:

- V_0 počáteční rychlost při zastavování, nebo konstantní rychlost na spádu [km/h]
 E_{TOP} energie potřebná po dobu brzdění na vytápění soupravy
 E_{PP} energie spotřebovaná po dobu brzdění v pomocných pohonech lokomotivy
 E_{VS} energie spotřebovaná po dobu brzdění ve vlastní spotřebě vlaku ($E_{TOP} + E_{PP}$)
 t_{REK} doba brzdění
 P_{PP} střední výkon pomocných pohonů lokomotivy během brzdění
 E_{EDB} energie vlaku zmařená pomocí EDB
 E_{VS} / E_{EDB} procentuální využití energie EDB ve vlastní spotřebě vlaku

Poznámka: Při venkovní teplotě -25 °C by v prvním případě vyšla $E_{TOP} = 5,1 \text{ kWh}$, což by spolu se spotřebou pomocných pohonů 0,4 kWh znamenalo upotřebení 15,3 % rekuperační energie.

Ve druhém případě by vyšla E_{TOP} přibližně 49,7 kWh, což by v součtu se spotřebou pomocných pohonů 1,2 kWh znamenalo upotřebení již 48 % rekuperační energie. V našich podmínkách se však jedná o naprosto mezní situaci.

1.2.2 Zásobníky energie

Ukládání elektrické energie je v současné době velice aktuální téma zejména v oblastech „zelené“ energetiky a elektrické silniční dopravy. Ideálním řešením by bylo ukládat tuto energii přímo v její původní (elektrické) formě, bez další konverze a tudíž i větších ztrát. Obecně lze k těmto účelům využít především elektrochemické akumulátory, superkondenzátory nebo supravodivé zásobníky. Další možností je transformace elektrické energie na mechanickou, kterou lze ukládat například do setrvačníků nebo do tlakových nádob.

Z výsledků příkladů uvedených v části 1.1 je vidno, že ukládaná elektrická energie by byla v řádech desítek až stovek kilowatthodin. Jako zásobníků pro takové objemy energie se ve světě (nejčastěji v oblasti výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, kde slouží jako „vyrovnávací nádrže“ pro plynulý pokles dodávky elektrické energie při náhlých poklesech výroby) používají vzhledem k ceně uvedených zařízení převážně elektrochemické akumulátory a setrvačníky. Ačkoliv se v oblasti silničních vozidel s elektrickým pohonem, a to i pro hromadnou dopravu, začínají postupně uplatňovat také superkondenzátory, pro železniční dopravu zatím mají vzhledem ke své hmotnosti nedostatečné výkonové (kW/t) i energetické (kWh/t) parametry⁷.

Obecně tak lze říci, že jak z technického, tak i z ekonomického hlediska je nasazení těchto zařízení jako zásobníků trakční energie pro zmiňované objemy pro železniční dopravu dosud nerentabilní.

1.2.3 Návrat energie zpět do rozvodné sítě

Na českých drahách se v trakčních měnících používají výhradně neřízené (diodové) usměrňovače, neboť až do nedávné doby nebyla otázka rekuperace aktuální. Současný stav se zřejmě nebude nijak měnit, neboť změna by znamenala významný zásah do infrastruktury napájecích stanic spojený s nemalými finančními výdaji, což není nijak v zájmu majitele těchto zařízení (SŽDC).

Na tuto problematiku lze však pohlížet i z technické stránky. Pokud uvážíme, že napětí měníren je nastaveno na co nejvyšší hodnotu v rámci dovolených mezí (o důvodech a dalších podrobnostech bude pojednáno v dalších kapitolách, zde jen uvedme, že napětí naprázdno měníren dosahuje zhruba 3 500 V a maximální dovolené napětí v TV je 3 600 V), a že k „protlačení“ proudu z rekuperujícího vozidla zpět do distribuční sítě je vytvořen

⁷ Parametry superkondenzátorového článku firmy Maxwell, typ BMOD0063: 120 V / 63 F → 468 kJ = 0,13 kWh; měrný výkon 1,7 kW/kg; hustota energie 2,3 Wh/kg; rozměry zhruba 62/43/27 cm; hmotnost 60,5 kg; životnost 1 000 000 nabíjecích cyklů; cena zhruba 10 000 USD [15]

napěťový spád jen kolem 100 V, je vidět, že k tomuto „opačnému“ toku energie nejsou v současné době vytvořeny napěťové podmínky.

Při měrném odporu vedení například 0,05 Ω/km by z 10 km vzdáleného vozidla od měničky bylo možno přenést zpět do distribuční soustavy jen

$$I = \frac{\Delta U}{\rho \cdot \ell} = \frac{100}{0,05 \cdot 10} = 200 \text{ A} \quad (1.27)$$

což je při zmíněných 3 500 V na výstupu z měničky výkon jen 700 kW. Při rekuperačních výkonech v řádu MW (jak bude uvedeno dále) by byl přínos tohoto opatření v současné době přinejmenším sporný.

1.2.4 Odběr jiným trakčním vozidlem

Z předchozích odstavců je zřejmé, že pokud se rekuperační energie nevyužije ve vlastní spotřebě rekuperujícího vozidla nebo se vhodně neuloží, je jedinou zbývajícím možností odběr na jiném vozidle.

Tento odběr je možný pouze v případě, že rekuperující vozidlo „protlačí“ rekuperační proud odporem vedení až k místu případného odběru, což je ovlivněno především parametry trakčního vedení a napěťovými poměry v trakčním obvodu. Napěťové poměry jsou kromě napětí na vstupu do trakční napájecí stanice určeny především hustotou a polohou vozidel v daném úseku, přičemž přítomnost vozidel odebírajících proud v dosahu rekuperujícího vozidla je nutným předpokladem úspěšné rekuperace.

V [13] se s odkazem na „Technickou zprávu VÚŽ-03-17/2004“ uvádí: „*při měřeních prováděných VÚŽ na jednotkách řady 471 na trati Praha – Kolín bylo prokázáno, že v průměru 30 % elektrické energie odebrané vlakem z troleje během rozjezdu, příp. udržování konstantní rychlosti bylo při brzdění navraceno do trolejového vedení. Odběr rekuperované energie jinými vozidly byl přitom zjištěn ve více než 90 % případů.*“

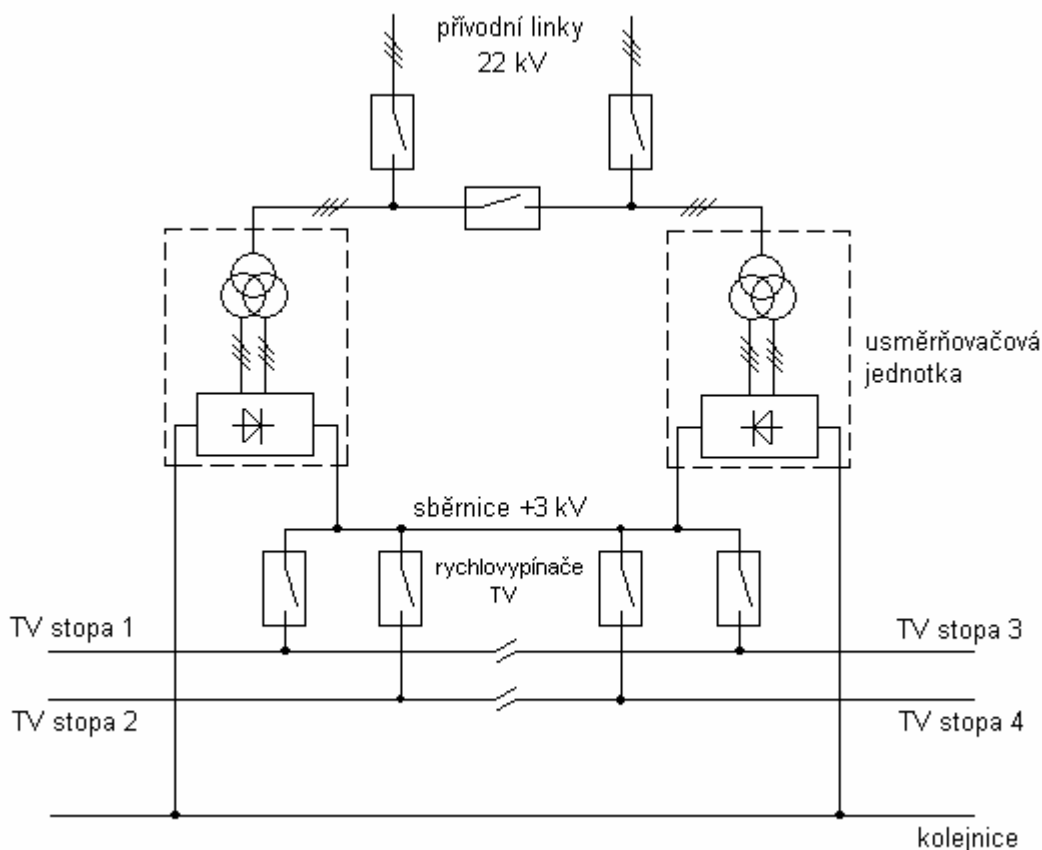
Tato vysoká pravděpodobnost odběru jiným vozidlem je zřejmě dána vysokým zatížením uvedené trati, a toto číslo nelze paušálně použít pro všechny případy. Nicméně je ukázáno, že v určitých úsecích není návrat energie do TV problémem a příznivý vliv rekuperace na úsporu energie je zřejmý.

2 PARAMETRY ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍCH SE NA REKUPERACI

2.1 Způsob napájení ve stejnosměrném systému 3 kV

Trakční napájecí stanice (měnírny) jsou připojené na distribuční soustavu, většinou přes transformátor 110/22 kV. Do měnárny tedy vstupuje vedení 22 kV, následuje transformace na 3 kV a usměrnění v neřízených (diodových) usměrňovačích. Z toho vyplývá, že elektrickou energii získanou rekuperací nelze dodávat přes diodové usměrňovače zpět do distribuční soustavy.

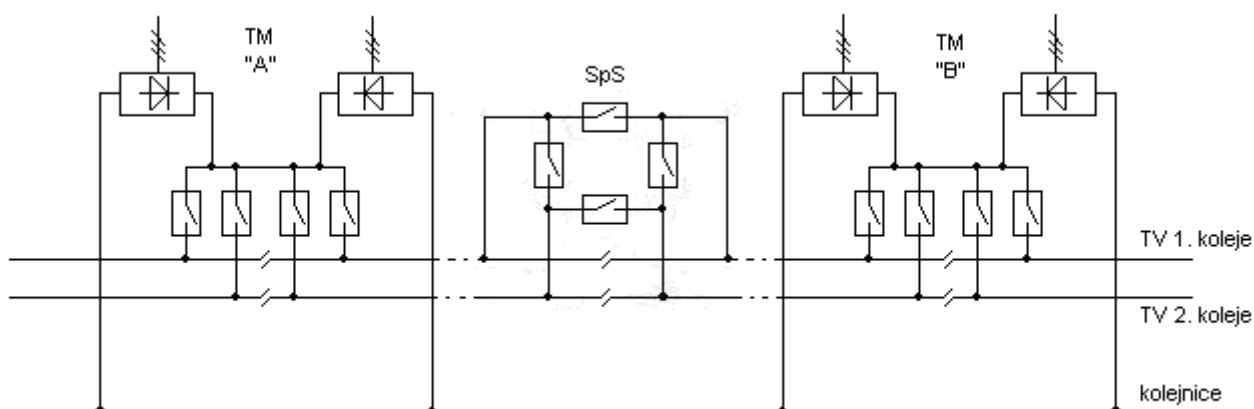
Kladné svorky usměrňovačů jsou vyvedeny na sběrnici 3 kV, ze které jsou přes rychlovypínače napájeny jednotlivé stopy trakčního vedení, záporné svorky jsou připojeny ke kolejnicím, které tvoří zpětnou cestu (viz obrázek 2.1).



Obr. 2.1 Zjednodušené schéma trakční měnárny

Jednotlivé stopy trakčního vedení jsou příčně i podélně odděleny sjízdnými spojkami (zůstávají však propojené přes sběrnici 3 kV v trakční měnárně), přičemž každá stopa je napájena pokud možno ze dvou stran (měnárny) proti sobě. Pokud je to možné, jsou dva rychlovypínače napájějící proti sobě jednu stopu svázané tzv. napáječovou vazbou, která při vypnutí jednoho rychlovypínače zabezpečí i vypnutí druhého.

Uprostřed meziměřírenského úseku se někdy zřizuje spínací stanice. Na obrázku 2.2 je nakresleno její ideální uspořádání, které umožňuje podélné i příčné propojení obou stop. V běžném provozu je spínací stanice propojena podélně, příčné propojení se někdy používá kvůli zmenšení odporu vedení (paralelní spojení odporů vodičů obou stop). To však má nevýhodu v tom, že při vypnutí jednoho z rychlovypínačů v měnírně z důvodu poruchy (zkratu) v některé stopě se vypnou i ostatní vypínače napájející všechny paralelně propojené stopy v daném úseku. Tím dochází i k vypnutí stopy, ve které porucha nenastala, což nepříznivě ovlivňuje provoz. Navíc se tak i prodlužuje doba vymezení místa poruchy (zkratu).



Obr. 2.2 Principiální schéma napájení při použití spínací stanice

2.2 Trakční měnirna

Na našich železnicích se většinou používají měnirny osazené usměrňovacími jednotkami o jmenovitém výkonu 3,3 nebo 5 MW (1 000 nebo 1 500 A) a celkovém výkonu podle zatížení trati 5 až 20 MW. Nejběžněji jsou měnirny osazené dvěma usměrňovacími jednotkami, přičemž u výkonnějšího typu postačuje v mnoha případech provoz jediné z nich. Důvodem je, kromě poklesu objemu přepravy v poslední době, hlavně možnost jejich značné přetížitelnosti.

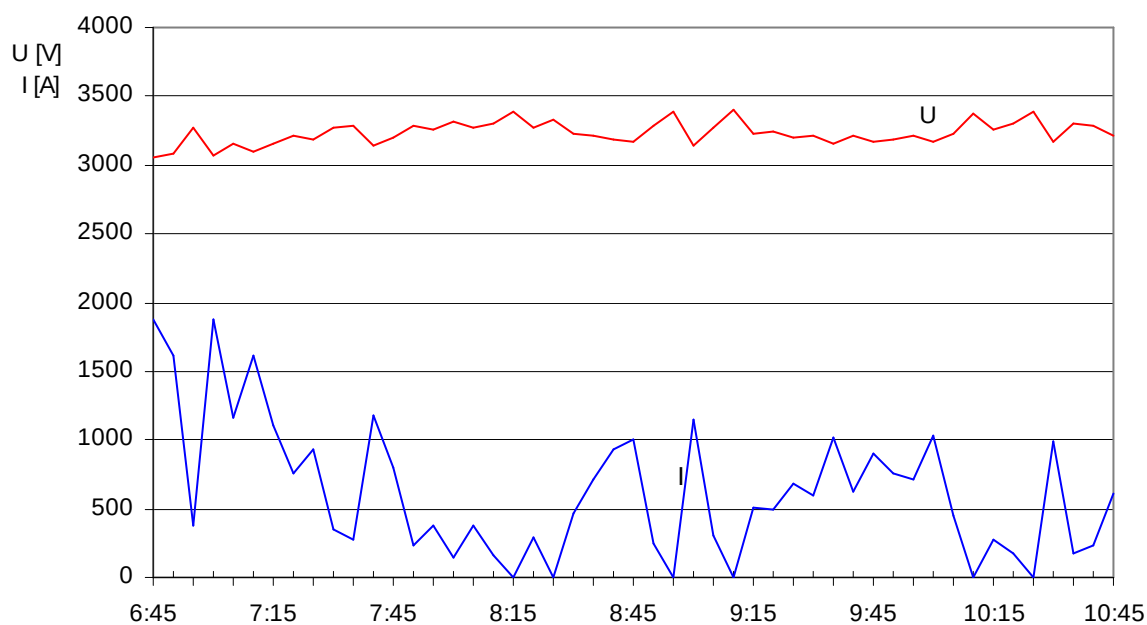
2.2.1 Vnější charakteristika trakční měnirny

Pro účely této práce by bylo vhodné získat vnější charakteristiku měnirny a vytvořit její náhradní schéma.

Na obrázku 2.3 je zachycen časový průběh napětí a proudu na výstupu trakčního usměrňovače. V tomto případě jde o konkrétní měření na výstupu převozní trakční měnirny EZB-PM1 o výkonu 5 MW (1 500 A) nainstalované namísto stabilní měnirny Hoštejn, která se nachází na hlavním železničním tahu mezi Českou Třebovou a Zábřehem.

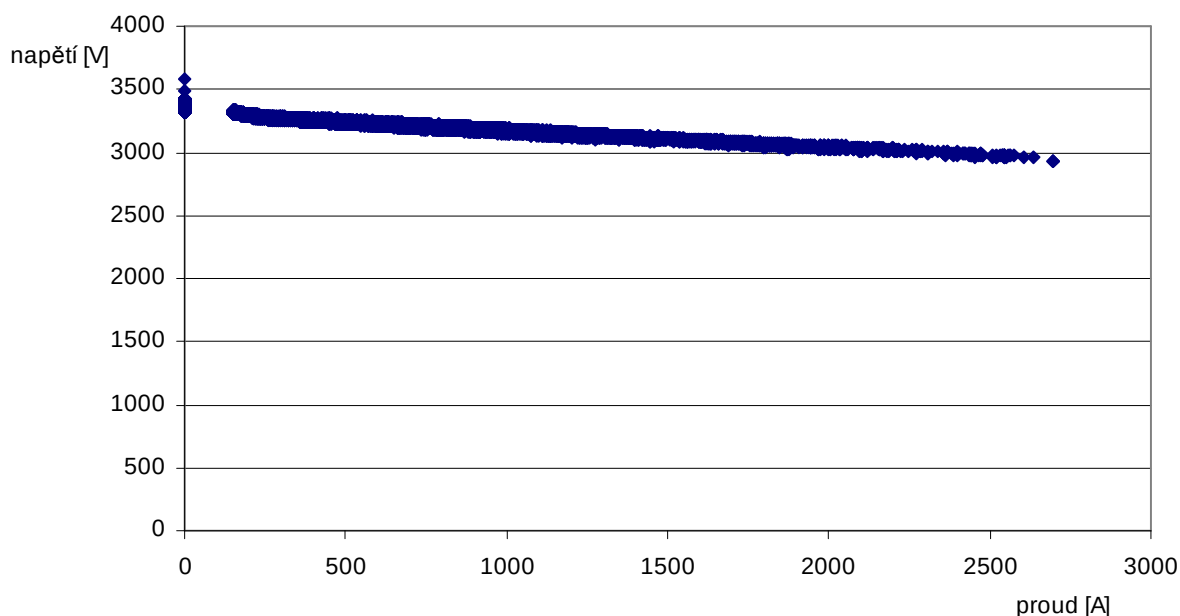
Jelikož je převozná měnírna osazena pouze jednou usměrňovačovou jednotkou (jedno soustrojí transformátor – usměrňovač), ukazují sejmuté charakteristiky zatížení celé měnírny.

Na obrázku jsou zachyceny hodnoty napětí a proudu zjednodušeně v intervalu 5 minut od 6:45 do 10:45 hod. dne 9. 9. 2011, reálná měření však probíhala v intervalu 1 sekunda, tudíž bylo v tomto období změřeno 14 401 hodnot napětí a proudu.



Obr. 2.3 Časový průběh zatížení měnírny (interval měření 5 minut)

Uspořádáním naměřených dat do grafu se souřadnicemi proud – napětí vznikne zatěžovací charakteristika $U = f(I)$.



Obr. 2.4 Zatěžovací charakteristika měnírny

Z této charakteristiky je ovšem patrné, že pro jednu hodnotu proudu bylo naměřeno několik hodnot napětí (obzvlášť zřetelné je to u nulových hodnot proudu, kdy se hodnoty napětí pohybují v rozmezí 3 310 až 3 584 V). To může mít několik příčin.

První z nich je kolísání napětí přírodních linek, což se projevuje v celém rozsahu naměřených hodnot.

Rozdílné hodnoty napětí při nulovém proudu mohou být způsobeny tím, že jsou měřírny vzájemně propojeny (viz obrázek 2.2), a při chodu naprázdno se tak na měřené měřírny může objevit vyšší napětí měřírny sousední.

Další zkreslení při měření nastává, je-li dvanáctipulzní trakční usměrňovač překlenut R-C členem pro odfiltrování přepětiových špiček. Při nulovém odběru je kondenzátor R-C členu nabit na nejvyšší hodnotu usměrněného napětí, není vybíjen, a tudíž je měřena tato maximální hodnota napětí. Již při malém odběru se však kondenzátor dostatečně vybíjí a tento jev se přestává projevovat.

Při nulovém odběru může být příčinou nesrovnalostí také zvýšení napětí v trakčním vedení rekuperačně brzdícím vozidlem, pohybujícím se v daném úseku.

Pro zjištění vnitřního odporu by proto bylo ideální, aby měřírna pracovala nezávisle na sousedních měřírnách, a aby byla napájena ze zdroje konstantního napětí. Pak by bylo možno získat dosazením dvojice naměřených hodnot U a I do rovnice

$$U = U_0 - R_i \cdot I \quad (2.1)$$

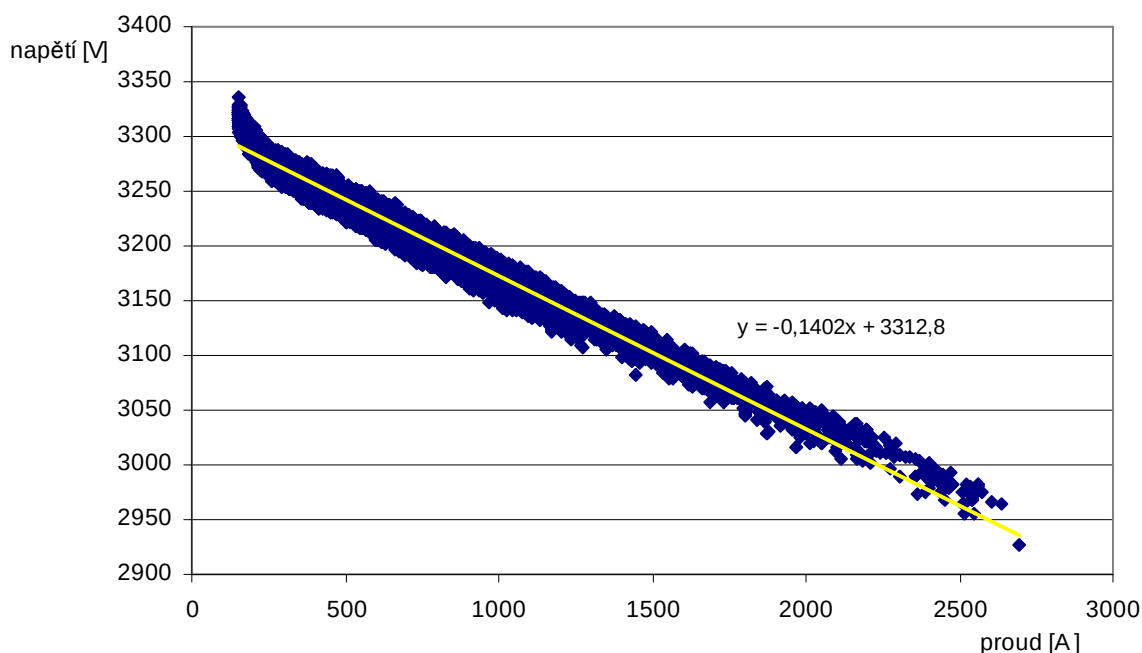
zatěžovací charakteristiku coby napětiového zdroje.

Tyto požadavky ovšem není možno prakticky realizovat, proto je třeba zvolit jiný postup. Bylo by vhodné nalézt co nejkratší časový úsek (kdy by snad bylo možno předpokládat zhruba konstantní napětí na přírodních linkách), ve kterém by nastalo co nejrozdílnější zatížení měřírny. Takové podmínky byly skutečně v několika případech nalezeny, a po dosazení do rovnice (2.1) vycházely hodnoty R_i v rozmezí 0,15 až 0,18 Ω . Ačkoliv se napětí přírodních linek také mění se zatížením měřírny, bylo by zřejmě možno považovat tyto hodnoty za dostatečně přesné.

Je však také možno použít graf z obrázku 2.4, do kterého by byly z výše uvedených důvodů zahrnuty jen hodnoty napětí, při kterých již protékal nějaký proud (viz obrátek 2.5). Proložení regresní přímky těmito hodnotami lze obdržet přímo hledaný vnitřní odpor měřírny coby její sklon, který nejlépe odpovídá naměřeným hodnotám proudu a napětí. V dané situaci vychází hodnota vnitřního odporu 0,14 Ω .

Vzhledem k předchozím výsledkům asi nebude velkou chybou dále uvažovat vnitřní odpor měřírny $R_i = 0,15 \Omega$.

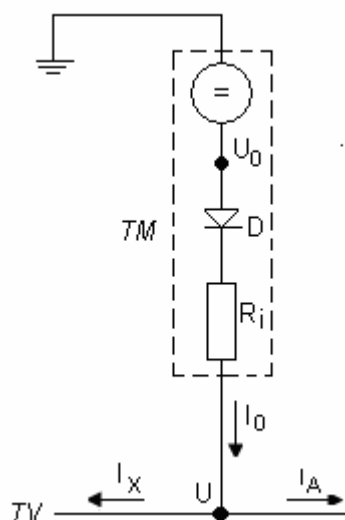
Průsečík zatěžovací přímky s napětovou osou by v tomto případě vycházel asi v hodnotě 3 313 V. Běžně se však napětí naprázdno U_0 nastavuje na pokud možno co nejvyšší hodnotu v rámci dovolených mezí, tedy s určitou rezervou co nejbližší maximálnímu dovolenému napětí, prakticky zhruba na 3 500 V. Při vyšším napětí U_0 by se charakteristika pouze vertikálně posunula, její sklon by se nezměnil.



Obr. 2.5 Upravená zatěžovací charakteristika měnírny pro účely získání hodnoty jejího vnitřního odporu (vynechání hodnot napětí při nulovém proudu)

2.2.2 Náhradní schéma trakční měnírny

V souladu s uvedenými charakteristikami lze nahradit trakční měnírnu coby napěťový zdroj sériovým zapojením ideálního zdroje napětí U_0 , ideální diody a odporu R_i , který nahrazuje vnitřní odpor měnírny. Reálná situace je vzhledem k indukčnosti usměrňovacího transformátoru, ne úplně dokonale vyhlazenému proudu, rychle se měnícímu zatížení a vstupnímu L-C členu moderních vozidel poněkud komplikovanější, nicméně pro účely této práce je uvedené přiblížení dostatečné.



Legenda:

- U_0 napětí ideálního stejnosměrného zdroje reprezentujícího napětí měřírny naprázdno
- U napětí na výstupu měřírny (na vstupu do TV)
- D ideální dioda znázorňující skutečnost, že nelze dodávat proud přes měřírnu zpět do distribuční sítě
- R_i vnitřní odpor měřírny
- I_0 celkový proud měřírny
- I_A, I_X proudy dodávané měřírnou do jednotlivých stop trakčního vedení

Obr. 2.6 Náhradní schéma trakční měřírny

2.3 Trakční vedení

Trakční vedení je na stejnosměrné trakci tvořeno nejčastěji měděným nosným lanem o průřezu 120 mm^2 a měděným trolejovým drátem o průřezu 150 mm^2 . Dále se kvůli zmenšení přenosových ztrát přidává paralelně zesilovací vedení tvořené AlFe nebo měděnými lany, jejichž průřez je dán energetickým výpočtem respektujícím zatížení tratě. Délky jednotlivých napájených úseků (stop) jsou dány rozmístěním napájecích stanic, na stejnosměrné trakci je jejich vzdálenost zhruba 20 km.

Úseky mezi napájecími stanicemi jsou tvořeny jednak stanicemi, ve kterých dochází k rozvětvení trakčního vedení a tím i ke změně jeho elektrických parametrů (paralelně řazené odpory), a jednak mezistaničními úseky (širou tratí), na kterých lze většinou uvažovat tyto parametry při stálé teplotě okolí konstantní.

Pro jednoduchost uvažujme dále celý napájený úsek jako širou trať s jediným parametrem, tedy jako vedení s konstantním měrným odporem.

Př. 2.1: Uvažujme tuto základní sestavu při teplotě 20 °C: trolejový drát o průřezu 150 mm², nosné lano o průřezu 120 mm² a zesilovací vedení AlFe 1 × 240 mm² s parametry uvedenými v tabulce 2.1.

Pro další výpočty je třeba zjistit zatížitelnost celé sestavy a její měrný odpor nebo vodivost.

Tabulka 2.1 Parametry vodičů trakčního vedení (ČSN 34 1530 Příloha „B“)

	nejmenší vodivost při 20 °C [S / km]	trvalé dovolené zatížení [A]	největší dovolený odpor při 20 °C [Ω / km]	úbytky při trvalém dovoleném zatížení [V / km]
trolejový drát Cu 150 mm ²	8,368	780	0,1195	93,212
nosné lano Cu 120 mm ²	6,667	675	0,1500	101,250
lano AlFe 240/39 mm ²	8,000	657	0,1250	82,125

Měrná vodivost g a měrný odpor ρ celé sestavy vycházejí

$$g_{TV} = \sum g_x = 8,368 + 6,667 + 8 = 23,035 \text{ S / km}$$

$$\rho_{TV} = 1/g_{TV} = 1/23,035 = 0,043 \Omega / \text{km}$$

Dále zjistíme úbytek napětí na 1 km $\Delta u_{1\text{km}}$ při maximálním dovoleném proudu pro každý vodič a vybereme nejmenší hodnotu (zde pro AlFe lano)

$$\Delta u_{1\text{km}} = \frac{I_{DOV}}{g_{AlFe}} = \frac{657}{8} = 82,125 \text{ V}$$

Jelikož jsou vodiče řazeny paralelně, bude tento úbytek napětí stejný pro všechny vodiče v sestavě.

Proudy v trolejovém drátu a nosném lanu jsou

$$I_{TD} = \Delta u_{1\text{km}} \cdot g_{TD} = 82,125 \cdot 8,368 = 687,222 \text{ A}$$

$$I_{NL} = \Delta u_{1\text{km}} \cdot g_{NL} = 82,125 \cdot 6,667 = 547,527 \text{ A}$$

což vyhovuje dovolenému trvalému zatížení dle tabulky 2.1.

Celkový proud sestavy (zatížitelnost) je dán součtem proudů v jednotlivých vodičích

$$I_{TV} = I_{AlFe} + I_{TD} + I_{NL} = 657 + 687,222 + 547,527 \approx 1892 \text{ A}$$

Př. 2.2: Uvažujme tuto sestavu při teplotě 20 °C: trolejový drát o průřezu 150 mm², nosné lano o průřezu 120 mm² a zesilovací vedení AlFe 2 × 240 mm² s parametry uvedenými v tabulce 2.1.

Měrná vodivost g a měrný odpor ρ celé sestavy vycházejí v tomto případě

$$g_{TV} = \sum g_x = 8,368 + 6,667 + 8 + 8 = 31,035 \text{ S / km}$$

$$\rho_{TV} = 1/g_{TV} = 1/31,035 = 0,032 \Omega / \text{km}$$

Stejným postupem jako v předchozím případě se zjistí zatížitelnost celé sestavy

$$I_{TV} = 2 \cdot I_{AlFe} + I_{TD} + I_{NL} = 2 \cdot 657 + 687,222 + 547,527 \approx 2549 \text{ A}$$

Poznámka: V obou případech se jedná o ideální stav, kdy není počítáno s opotřebením trolejového drátu.

2.4 Zpětná cesta

Zpětná cesta trakčního proudu je v ideálním případě tvořena kolejnicemi, na které je připojen záporný pól trakčních usměrňovačů. Odpor kolejnicového vedení je oproti odporu jednotlivých vodičů trakčního vedení řádově menší, v [8] se uvádí měrný odpor jednokolejné bezstykové trati pro všechny typy zmiňovaných kolejnic v rozmezí 0,010 až 0,015 Ω/km, v jiných pramenech lze najít mírně odlišné (vyšší) hodnoty.

Na výsledný odpor zpětné cesty mají však vliv i další skutečnosti. Vzhledem k tomu, že kolejnice nejsou ideálně odizolované od země (jsou více či méně uzemněné) se část zpětného proudu vrací i jinými cestami než právě jen jimi a měrný odpor zpětné cesty se tak zmenšuje. Na druhou stranu se negativně projevuje vliv špatného stavu kolejnicových styků a ojetí kolejnic. V obou případech se může jednat o změny až v desítkách procent. Do hry také v poslední době vstupují přísady použité v základním materiálu kolejnic pro zlepšení jejich mechanických vlastností, jejichž vlivem dochází většinou ke zhoršení vlastností elektrických (vodivosti).

Uvažujme tedy dále měrný odpor zpětné cesty $\rho_{ZC} = 0,015 \Omega/\text{km}$, o který se zvětší měrný odpor sestavy trakčního vedení vypočítaný v předchozí části.

Výsledný měrný odpor trakčního obvodu dle Př. 2.1 a Př. 2.2

$$\rho_{1 \times ZV} = \rho_{TV} + \rho_{ZC} = 0,043 + 0,015 = 0,058 \Omega / \text{km}$$

$$\rho_{2 \times ZV} = \rho_{TV} + \rho_{ZC} = 0,032 + 0,015 = 0,047 \Omega / \text{km}$$

2.5 Trakční vozidla

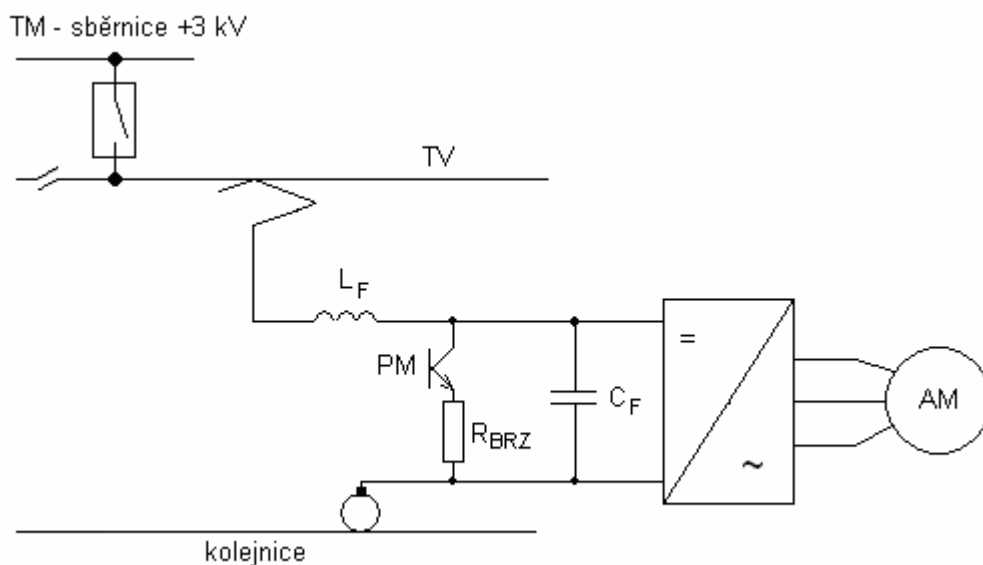
2.5.1 Typy a koncepce vozidel umožňujících rekuperační brzdění

Na českých železnicích se pohybuje mnoho typů vozidel elektrické trakce (lokomotiv i souprav), přičemž většina z nich rekuperační brzdění neumožňuje. Výjimkami jsou jen vozidla poslední generace, z nichž nejhojnější zastoupení mají tato:

- lokomotivy Siemens ES 64 U4 (Taurus)
- lokomotivy Škoda 109 E řady 380
- jednotky „City Elefant“ řady 471
- jednotky „Pendolino“ řady 680

Základní uspořádání těchto vozidel na stejnosměrné trakci je naznačeno na obrázku 2.6 a vyznačuje se:

- vstupním LC filtrem
- pohonem s asynchronními motory s kotvou nakrátko
- řízením motorů pomocí střídače napětového typu s proměnným 3~ výstupním napětím a frekvencí
- elektrodynamicou brzdou rekuperační, a odporovou řízenou pulzním měničem



Obr. 2.7 Zjednodušené schéma části trakčního obvodu a moderního vozidla se střídačem na stejnosměrné napájecí soustavě

2.5.2 Parametry moderních vozidel

Stejně tak jako uspořádání moderních vozidel jsou si velice blízké i jejich základní technické parametry, porovnání lokomotiv Škoda a Siemens je v následující tabulce.

Tabulka 2.2 Technické parametry moderních vozidel

Parametr	Škoda 109 E	Siemens ES 64 U4
hmotnost lokomotivy [t]	88	87
trvalý výkon [kW]	6 400	6 000
maximální rychlost	200	230
maximální tažná síla [kN]	275	300
maximální brzdná síla vyvozená dynamickou brzdou [kN]	226	240
trvalý výkon brzdového odporníku [kW]	4 400	2 000

Zdroj: Produktové katalogy firem

2.6 Vliv účinnosti jednotlivých komponent na efekt rekuperačního brzdění

Proces rekuperace je, stejně jako všechny procesy spojené s přeměnou energie, doprovázen určitými ztrátami. Tyto ztráty vznikají:

- na rekuperující lokomotivě – při přeměně mechanické energie na elektrickou
- na vedení – při přenosu na lokomotivu odebírající rekuperační energii
- na odebírající lokomotivě – při přeměně rekuperační energie zpět na mechanickou

Při pohledu na obrázek 2.6 je zřejmé, že rekuperační ztráty na lokomotivě jsou dány zejména:

- účinností motorů vozidla v generátorickém či motorickém chodu (η_{MOT})
- účinností měničů AC/DC (η_{MEN})

Rekuperační účinnost lokomotivy (η_{LOK}) je pak

$$\eta_{\text{LOK}} = \eta_{\text{MOT}} \cdot \eta_{\text{MEN}} \quad (2.2)$$

Účinnost přenosu rekuperační energie je dána velikostí ztrát ve vedení ΔP_v . Tyto ztráty závisí na parametrech vedení a velikosti proudu, kterým se výkon přenáší – zde především na podélném odporu vedení R_l daném vzdáleností vozidel a kvadrátu rekuperačního proudu I_{REK} podle vztahu

$$\Delta P_V = R_\ell \cdot I_{REK}^2 \quad [\text{kW}; \Omega, \text{kA}] \quad (2.3)$$

Parametry vedení byly popsány v části 2.3, velikost rekuperačního proudu je dána rekuperačním výkonem a napěťovými poměry v obvodu podle části 3.4.

Označíme-li elektrický rekuperační výkon na sběrači rekuperujícího vozidla $P_{REK,el}$ a výkon na sběrači vozidla odebírajícího proud $P_{Z,el}$, je účinnost přenosu (η_P)

$$\eta_P = \frac{P_{Z,el}}{P_{REK,el}} = 1 - \frac{\Delta P_V}{P_{REK,el}} \quad (2.4)$$

Celková účinnost rekuperace η_{REK} je pak

$$\eta_{REK} = \eta_{LOK} \cdot \eta_P \cdot \eta_{LOK} = \eta_{LOK}^2 \cdot \eta_P \quad (2.5)$$

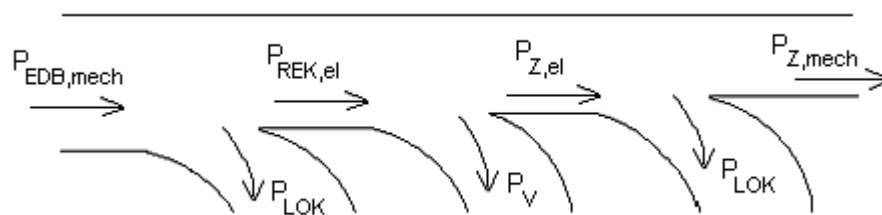
Z mechanického výkonu $P_{REK,mech}$, který se objeví na hřídeli motoru vozidla pracujícího v generátorickém chodu, se na hřídeli motoru vozidla odebírajícího objeví výkon $P_{Z,mech}$

$$P_{Z,mech} = P_{REK,mech} \cdot (\eta_{LOK}^2 \cdot \eta_P) \quad (2.6)$$

což lze po úpravách napsat jako

$$P_{Z,mech} = \eta_{LOK} \cdot (P_{REK,mech} \cdot \eta_{LOK} - R_\ell \cdot I_{REK}^2) \quad (2.7)$$

Celkový přehled ztrát vznikajících při rekuperaci je znázorněn na následujícím obrázku.



Legenda:

- $P_{EDB,mech}$ mechanický výkon na hřídeli generátoru rekuperujícího vozidla
- $P_{REK,el}$ elektrický rekuperační výkon na sběrači rekuperujícího vozidla
- ΔP_{LOK} výkon zmařený převážně v motorech a měničích vozidla při přeměně mechanického výkonu na elektrický (a naopak)
- $P_{Z,el}$ elektrický rekuperační výkon, který projde vedením a objeví se na sběrači vozidla odebírajícího proud
- $P_{Z,mech}$ mechanický výkon na hřídeli vozidla odebírajícího proud vytvořený $P_{Z,el}$
- ΔP_V výkon zmařený při přenosu na odporech vedení

Obr. 2.8 Diagram ztrát při rekuperaci

3 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V TRAKČNÍM VEDENÍ

3.1 Limitní hodnoty napětí, požadavky norem a předpisů

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, napětí na sběrači rekuperačně brzdícího vozidla (a tím i v TV) by mohlo při nulovém nebo malém odběru proudu ostatními vozidly v daném úseku vystoupat až nad limitní hodnotu, která je povolena předpisy a normami.

Jmenovité hodnoty napětí trakčního vedení jsou uvedeny v ČSN EN 50 163 *Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav*, výňatek je zde v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Dovolené hodnoty napětí v DC soustavě 3 kV podle ČSN EN 50 163 ed. 2

Napětí [V]	Jmenovité	Nejnižší krátkodobé	Nejnižší trvalé	Nejvyšší krátkodobé	Nejvyšší trvalé
	U_n	$U_{\min 2}$	$U_{\min 1}$	$U_{\max 1}$	$U_{\max 2}$
	3 000	2 000	2 000	3 600	3 900 ^{*)}

^{*)} V ČR je tato hodnota pokynem GŘ SŽDC 11/2009 „Zavedení provozu rekuperace elektrických hnacích vozidel na stejnosměrné trakční soustavě 3 kV“ omezena na 3 600 V. Hlavním důvodem je provozování vozidel starší konstrukce, která byla podle dřívějších předpisů dimenzována právě na toto napětí ($U_n + 20\%$).

V této normě jsou uvedeny i následující požadavky na doby trvání zmíněných napěťových úrovní:

- doba trvání napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ nesmí být delší než 5 minut
- napětí naprázdno na sběrnicích napájecí stanice musí být nižší nebo rovno $U_{\max 2}$ s tím, že na sběračích vozidel musí být napětí v souladu s těmito požadavky
- za normálních provozních podmínek musí být napětí v rozmezí $U_{\max 2} \geq U \geq U_{\min 1}$
- pokud je dosaženo hodnot napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$, musí na nestanovenou dobu následovat úroveň nižší nebo rovna $U_{\max 1}$
- hodnot napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ smí být dosahováno pouze při krátkodobých stavech, kterým je mimo jiné i rekuperační brzdění

Vozidlo tedy smí dodávat do trakčního vedení jen tak velký proud, aby nedošlo k překročení hodnoty $U_{\max 2}$.

Napěťové poměry v trakčním vedení závisí především na okamžité provozní situaci (zatížení) a na napětí přívodních linek měnících. Jelikož se provozní situace mění v reálném provozu poměrně rychle, trvá ustálený stav běžně jen několik sekund (viz zatížení měnící na obrázku 2.3).

3.2 Náhradní úsek

Uvažujme nyní náhradní úsek délky ℓ , napájený klasicky ze dvou stran měnírnami TM "A" a TM "B", pro který zavedme tyto zjednodušující předpoklady:

- úsek je jednokolejný a je tvořen jen širou tratí $\rightarrow$ konstantní měrný odpor trakčního vedení
- shodná a neměnná napětí naprázdno trakčních měníren ($U_{A0} = U_{B0}$) i jejich vnitřní odpor R_i (viz náhradní schéma měnírny na obrázku 2.5)
- vozidla odebírající proud uvažujeme jako místa s odběrem konstantního proudu
- rekuperující vozidlo uvažujeme jako zdroj výkonu

3.3 Situace bez rekuperace

3.3.1 V úseku není žádný odběr

Napětí v TV je v tomto případě dáno napětím napájecích stanic, které závisí na okamžitém napětí přívodní linky 22 (35) kV a na zatížení v sousedních úsecích.

3.3.2 V úseku je jediný odběr

Napětí v TV je rozloženo podle místa odběru a proud vozidla je tvořen příspěvkem z obou napájecích stanic. Tyto příspěvky závisí na velikosti odporů vedení $R_{\ell 1}$ a $R_{\ell 2}$ od napájecích stanic k vozidlu, tedy na aktuální poloze vozidla (viz obrázek 3.1). Pokud v sousedních úsecích X a Y nebudeme uvažovat odběr ($I_X = I_Y = 0$), bude platit dle Kirchhoffových zákonů:

$$I_A \cdot (R_i + R_{\ell 1}) = I_B \cdot (R_i + R_{\ell 2}) \quad (3.1)$$

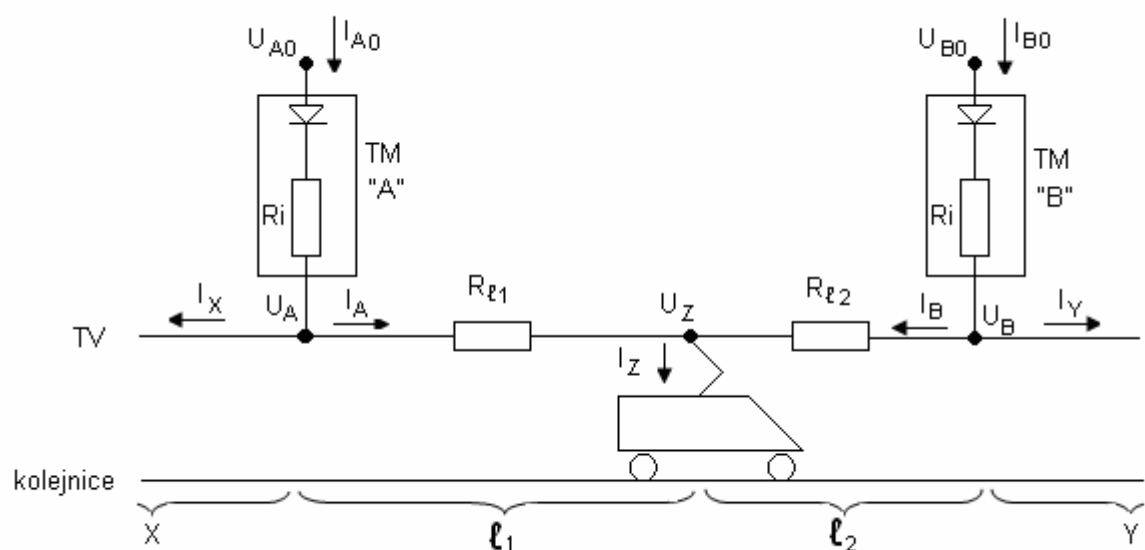
$$I_A + I_B = I_Z \quad (3.2)$$

Použitím metody proudových momentů nebo dosazením za I_A z (3.2) do (3.1) dostáváme

$$I_Z \cdot (R_i + R_{\ell 1}) = I_B \cdot (2 \cdot R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2}) \quad (3.3)$$

Bude-li v sousedních úsecích odběr ($I_X, I_Y > 0$), změní se tyto vztahy při použití metody proudových momentů na

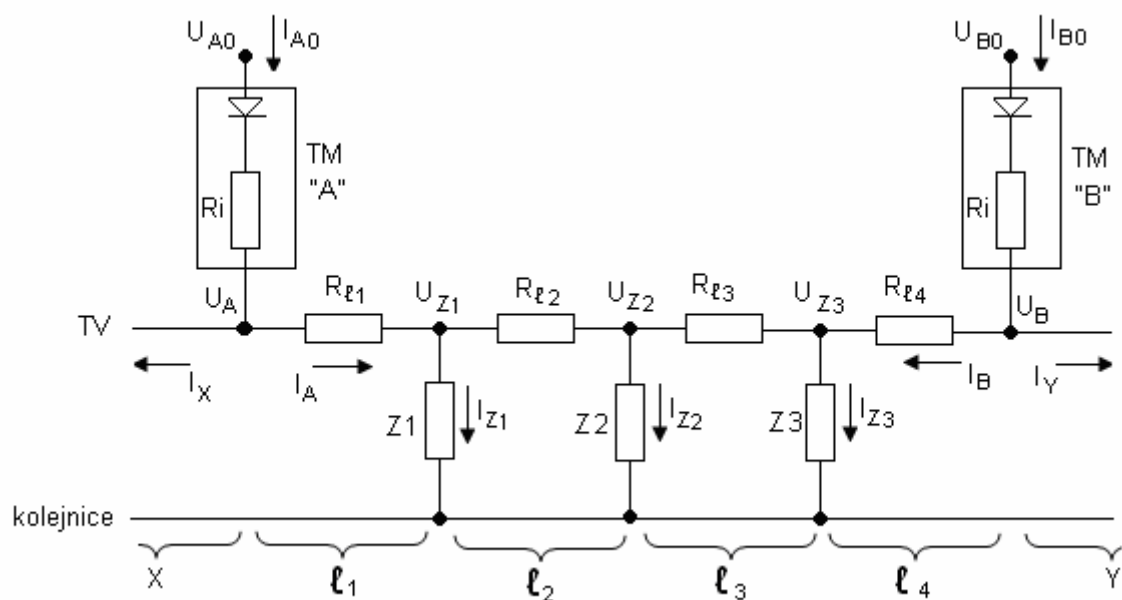
$$I_Z \cdot (R_i + R_{\ell 1}) + I_X \cdot R_i = I_B \cdot (2 \cdot R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2}) + I_Y \cdot R_i \quad (3.4)$$



Obr. 3.1 Jediný odběr

3.3.3 V úseku je více odběrů

Bude-li v úseku více vozidel (viz obrázek 3.2), proudy napájecích stanic a úbytky na TV se spočítají vhodnou metodou (např. proudové momenty, uzlová napětí).



Obr. 3.2 Více odběrů

Jestliže v sousedních úsecích X a Y není odběr ($I_X = I_Y = 0$), platí při využití metody proudových momentů

$$I_{Z1} \cdot (R_i + R_{\ell 1}) + I_{Z2} \cdot (R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2}) + I_{Z3} \cdot (R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3}) = I_B \cdot (2 \cdot R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3} + R_{\ell 4}) \quad (3.5)$$

Je-li v úsecích X a Y odběr, je třeba opět připočítat úbytky na odporech R_i způsobené proudy I_X a I_Y . Vztah (3.5) se změní na

$$I_{Z1} \cdot (R_i + R_{\ell 1}) + I_{Z2} \cdot (R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2}) + I_{Z3} \cdot (R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3}) + I_X \cdot R_i = I_B \cdot (2 \cdot R_i + R_{\ell 1} + R_{\ell 2} + R_{\ell 3} + R_{\ell 4}) + I_Y \cdot R_i \quad (3.6)$$

Pro n -vozidel by platilo obecně

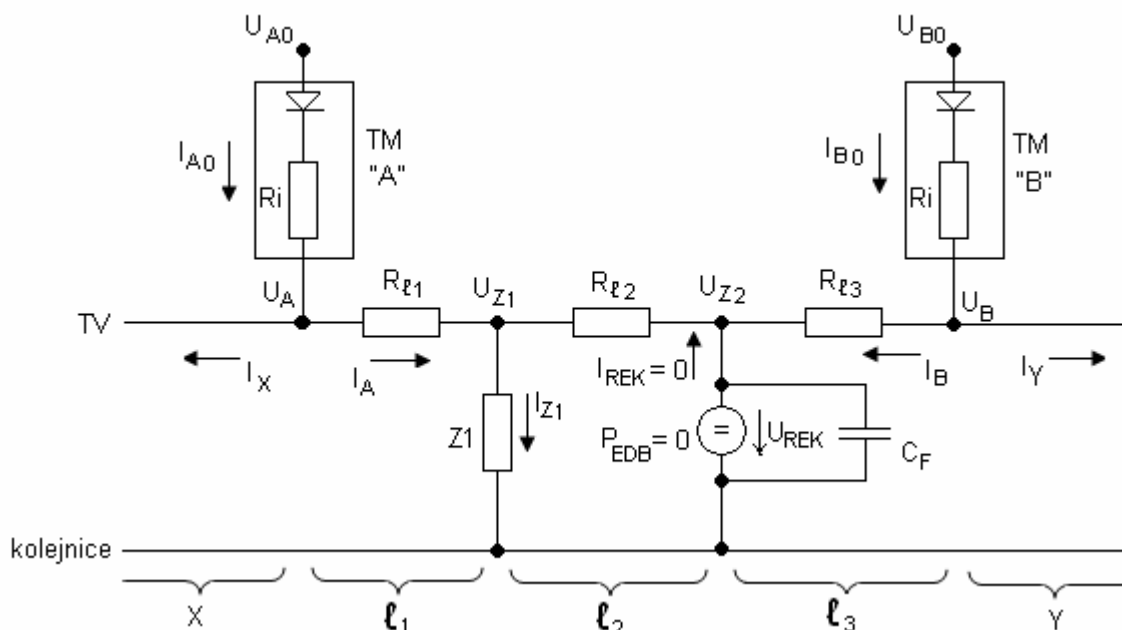
$$I_X \cdot R_i + \sum_{j=1}^n \left[I_{Zj} \cdot \left(R_i + \sum_{j=1}^n R_{\ell j} \right) \right] = I_Y \cdot R_i + I_B \cdot \left(2 \cdot R_i + \sum_{j=1}^{n+1} R_{\ell j} \right) \quad (3.7)$$

3.4 Situace při rekuperaci

3.4.1 V úseku je vozidlo rekuperačně brzdící

Uvažujme dvě vozidla v úseku, situace je naznačena na obrázku 3.3.

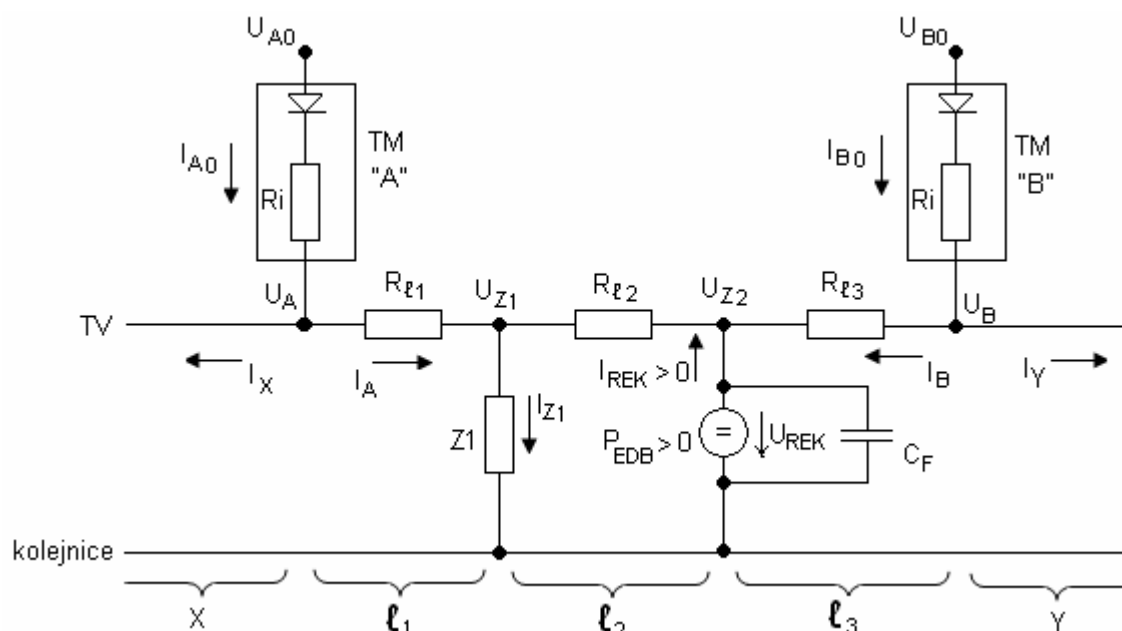
První vozidlo (Z1) odebírá proud I_{Z1} ve vzdálenosti ℓ_1 od měřírny TM "A". Druhé vozidlo (Z2) jedoucí výběhem (nulový odběr) je ve vzdálenosti ℓ_2 od něho směrem k měřírně TM "B". Do sousedních úseků X a Y dodávají měřírny TM "A" a TM "B" proudy I_X a I_Y , vzdálenost mezi měřírnami je $\ell = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3$ a jejich napětí naprázdno jsou $U_{A0} = U_{B0}$.



Obr. 3.3 Vozidlo Z1 odebírá proud, vozidlo Z2 ve výběhu

V tomto okamžiku začíná vozidlo Z2 brzdit elektrodynamickou brzdou výkonem P_{EDB} , viz obrázek 3.4. Aby mohlo toto vozidlo dodávat proud do trakčního vedení, musí napětí jeho stejnosměrného meziobvodu U_{REK} stoupnout nad hodnotu U_{Z2} , ovšem z druhé strany je velikost U_{REK} omezena maximálním dovoleným napětím v trakčním vedení U_{max2} ($U_{max2} \geq U_{REK} > U_{Z2}$) podle tabulky 3.1. Kromě toho bude velikost U_{REK} a I_{REK} dána momentálním výkonem EDB. Čím větší bude třeba nasadit napětí U_{REK} , aby se obvodem protlačil proud I_{REK} , tím menší tento proud bude ($P_{REK} = U_{REK} \cdot I_{REK}$).

Pokud dosáhne U_{REK} hodnoty U_B , zanikne proud I_B . Pokud U_{REK} vzroste natolik, že $U_{Z1} = U_A$, zanikne i proud I_A a odběr bude hrazen pouze rekuperujícím vozidlem Z2. V případě dostatečného U_{REK} a odběru v sousedních úsecích by proudy I_A či I_B nezankly, jejich směr by se otočil a bylo by možné rekuperovat přes sběrnice v TM do sousedních úseků X a Y, tzn. hradit z rekuperujícího vozidla také proudy I_X a I_Y .

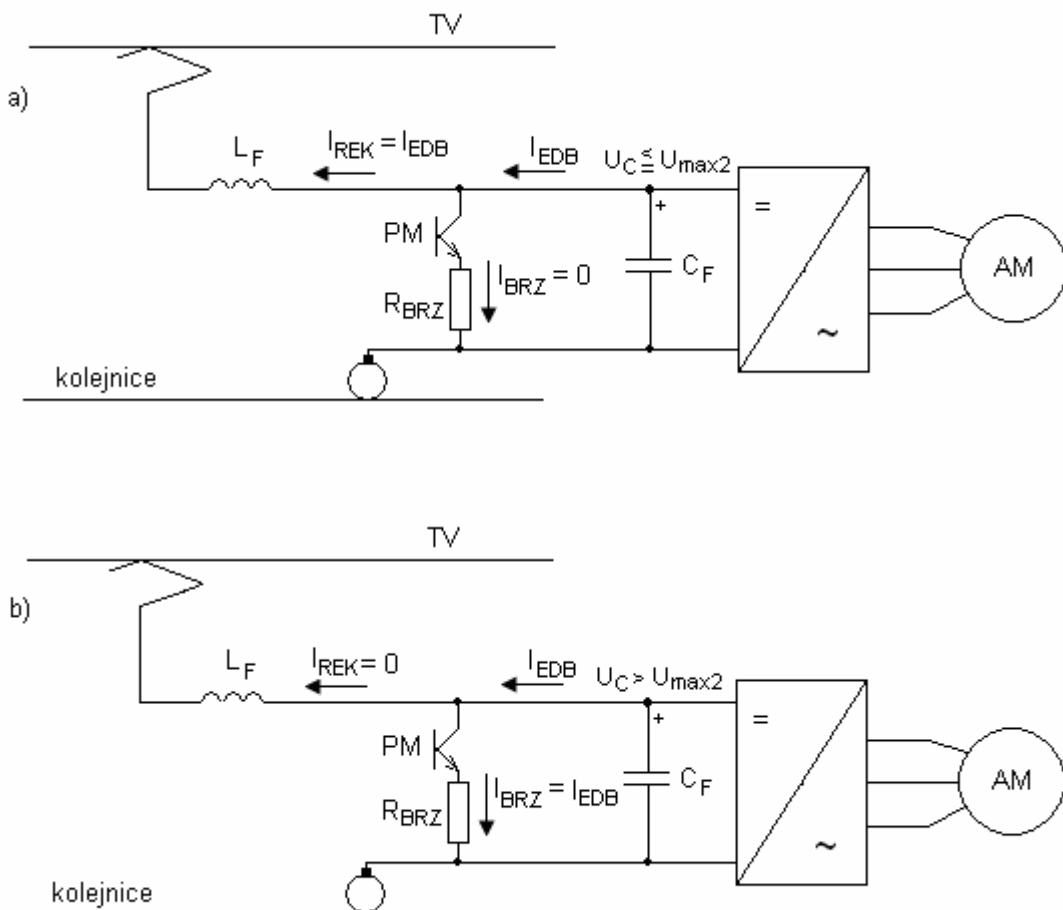


Obr. 3.4 Vozidlo Z1 odebírá proud, vozidlo Z2 rekuperuje

Existuje-li tedy v dosahu rekuperujícího vozidla odběr pro celou rekuperační energii, vozidlo uplatňuje výkon EDB v odebírajícím vozidle a v trakčním vedení. Rekuperační napětí je menší než je maximální dovolené napětí v trakčním obvodu U_{max2} a na brzdovém odporníku se nemaří žádná energie ($I_{EDB} = I_{REK}$, viz obrázek 3.5a).

Jestliže v dosahu rekuperujícího vozidla není odběr pro veškerou rekuperační energii, dochází k nabíjení kondenzátoru C_F , čímž se zvyšuje jeho napětí a také napětí v trakčním vedení. Když toto napětí přesáhne limitní hodnotu U_{max2} , spíná pulzní měnič PM ve větvi brzdového odporníku a výkon elektrodynamické brzdy se maří v tomto odporníku ($I_{EDB} = I_{BRZ}$, viz obrázek 3.5b). Otevřením pulzního měniče PM se však kondenzátor začne vybíjet, jeho napětí klesá a při dosažení určité úrovně (větší než je napětí v TV dané napětím napájecích

stanic) se brzdový měnič *PM* zcela zavírá. Kondenzátor C_f se začne znovu nabíjet a celý děj se opakuje. Jelikož brzdový odporník nebývá dimenzován na plný výkon rekuperační brzdy, mohl by při brzdění z vyšších rychlostí limitovat použití samotné EDB a požadovaný brzdicí účinek by musel být vyvolán také jinými brzdnými systémy.



Obr. 3.5 Dělení proudu elektrodynamické brzdy

Pro zjištění napěťových a proudových poměrů, které v obvodu při rekuperaci nastávají, je možno podle obrázku 3.4 sestavit základní rovnice, ze kterých bude možno vycházet.

$$I_{A0} = I_A + I_X \quad (3.8) \quad I_A = \frac{U_A - U_{Z1}}{R_{\ell_1}} \quad (3.12)$$

$$I_{B0} = I_B + I_Y \quad (3.9) \quad I_B = \frac{U_B - U_{REK}}{R_{\ell_3}} \quad (3.13)$$

$$I_{A0} + I_{B0} + I_{REK} = I_Z + I_X + I_Y \quad (3.10)$$

$$I_A + I_B + I_{REK} = I_Z \quad (3.11) \quad I_{A0} = \frac{U_{A0} - U_A}{R_i} \quad (3.14)$$

$$I_{B0} = \frac{U_{B0} - U_B}{R_i} \quad (3.15)$$

$$U_{Z1} = U_{REK} - R_{\ell 2} \cdot (I_B + I_{REK}) \quad (3.16)$$

$$U_{Z1} = U_A - R_{\ell 1} \cdot I_A \quad (3.17)$$

$$U_A = U_{A0} - R_i \cdot I_A - R_i \cdot I_X \quad (3.18)$$

$$U_B = U_{B0} - R_i \cdot I_B - R_i \cdot I_Y \quad (3.19)$$

$$P_{REK} = U_{REK} \cdot I_{REK} \quad (3.20)$$

$$U_{A0} - U_{Z1} = R_i \cdot I_A + R_i \cdot I_X + R_{\ell 1} \cdot I_A \quad (3.21)$$

$$U_{B0} - U_{REK} = R_i \cdot I_B + R_i \cdot I_Y + R_{\ell 3} \cdot I_B \quad (3.22)$$

3.4.2 Způsob výpočtu

Znamé veličiny jsou:

- napětí naprázdno obou měření U_{A0} , U_{B0}
- proudy I_X a I_Y dodávané měřícími TM“A“ a TM“B“ do sousedních úseků
- proud I_{Z1} , který je odebírán vozidlem Z1
- brzdný výkon elektrodynamické brzdy P_{EDB} vozidla Z2
- měrný odpor trakčního obvodu ρ
- délka úseku a poloha vozidel, čímž jsou dány hodnoty odporů vedení R_{t1} až R_{t3}

Neznámé jsou:

- napětí U_A a U_B na výstupech měření
- napětí U_{Z1} a U_{REK} na vozidlech Z1 a Z2
- celkové proudy měření I_{A0} a I_{B0}
- proudy I_A a I_B tekoucí do úseku ℓ
- rekuperační proud I_{REK} vozidla Z2
- proud brzdového odporníku I_{BRZ} vozidla Z2
- příkon a výkon měření, příkon vozidla Z1
- veškeré ztrátové výkony (měřírny, TV)

Ani jednu z rovnic (3.8) až (3.22) nelze řešit přímo, protože v každé se vyskytuje více než jedna neznámá. Navíc je při pohledu na obrázek 3.4 a v souvislosti s omezením maximálního napětí v obvodu zřejmé, že platnost těchto rovnic je omezena následujícími podmínkami:

Podmínky platnosti rovnic

- P1: proudy I_{A0} a I_{B0} nemohou být menší než 0, proto pokud vyjde proud I_A (I_B) menší než 0, může být v absolutní hodnotě nejvýše roven proudy I_X (I_Y)
- P2: napětí v obvodu nesmí překročit dovolené napětí U_{max2} podle tabulky 3.1

Lze tedy postupovat tímto způsobem:

Z rovnic (3.21) a (3.22) můžeme vyjádřit proudy I_A a I_B , z rovnice (3.20) proud I_{REK} a dosadit je do rovnice (3.11), která platí za všech okolností. Dostáváme

$$\frac{U_{A0} - R_i \cdot I_X - U_{Z1}}{R_i + R_{\ell 1}} + \frac{U_{B0} - R_i \cdot I_Y - U_{REK}}{R_i + R_{\ell 3}} + \frac{P_{REK}}{U_{REK}} = I_{Z1} \quad (3.23)$$

Odsud lze po úpravách vyjádřit napětí U_{Z1} , čímž po zavedení substitucí

$$M = R_i + R_{\ell 1} \quad (3.24)$$

$$N = R_i + R_{\ell 3} \quad (3.25)$$

dostáváme

$$U_{Z1} = \frac{M \cdot (U_{B0} - R_i \cdot I_Y - U_{REK}) + M \cdot N \cdot \left(\frac{P_{REK}}{U_{REK}} - I_{Z1} \right) + N \cdot (U_{A0} - R_i \cdot I_X)}{N} \quad (3.26)$$

Do rovnice (3.15) lze opět za I_B a I_{REK} dosadit ze (3.22) a (3.20), čímž dostáváme

$$U_{Z1} = U_{REK} - R_{\ell 2} \cdot \left(\frac{U_{B0} - R_i \cdot I_Y - U_{REK}}{N} + \frac{P_{REK}}{U_{REK}} \right) \quad (3.27)$$

Dosazením za U_{Z1} z rovnice (3.27) do rovnice (3.26) dostáváme po úpravách výraz pro výpočet U_{REK} jako kvadratickou rovnici

$$\begin{aligned} & (-M - N - R_{\ell 2}) \cdot U_{REK}^2 + [(M + R_{\ell 2}) \cdot (U_{B0} - R_i \cdot I_Y) + N \cdot (U_{A0} - R_i \cdot I_X) - M \cdot N \cdot I_{Z1}] \cdot U_{REK} + \\ & + (M + R_{\ell 2}) \cdot N \cdot P_{REK} = 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Řešením této rovnice jsou dvě hodnoty U_{REK} , použitelná je hodnota kladná.

Další postup:

- z rovnice (3.20) se získá rekuperační proud I_{REK}
- získané rekuperační napětí U_{REK} se dosadí do (3.22), čímž se získá proud I_B
- proud I_B se dosadí do (3.11), čímž se získá proud I_A
- dosazením proudu I_A do (3.18) se získá napětí U_A
- dosazením proudu I_B do (3.19) se získá napětí U_B
- napětí U_{Z1} lze vypočítat z rovnic (3.16) a pro kontrolu i z rovnice (3.17)
- z rovnic (3.8) a (3.9) lze dopočítat proudy měření I_{A0} a I_{B0}

Jsou-li po těchto výpočtech splněny podmínky $P1$ a $P2$, jsou vypočtené hodnoty správné, a dále lze vypočítat výkony měnících, příkon vozidla $Z1$ a ztráty v obvodu podle všeobecně známých vztahů $P = U \cdot I$ nebo $P = R \cdot I^2$.

Problémy s dodržением podmínek nastanou v situaci, kdy je brzdný výkon elektrodynamické brzdy natolik velký a celkový odběr tak malý, že napětí U_{REK} stoupne nad dovolenou hodnotu U_{max2} , nebo napětí U_A (U_B) stoupne nad hodnotu U_{A0} (U_{B0}), často však obojí zároveň. V tom případě se v uvedeném výpočtu otočí směr proudů I_{A0} (I_{B0}), čímž dojde k nesplnění omezujících podmínek a celý výpočet se stane nepoužitelným.

Protože je třeba dané podmínky do výpočtu nějakým způsobem zakomponovat, bylo řešení podstoupeno tabulkovému procesoru.

3.4.3 Výpočet pomocí tabulkového procesoru

Jelikož by se výše uvedený postup vzhledem k nastaveným podmínkám značně zkomplikoval, byla v tabulkovém procesoru *Excel* vytvořena aplikace (dále jen *Kalkulátor*), kde jsou napsány rovnice (3.8) až (3.22) i podmínky jejich platnosti, a celá soustava se řeší pomocí nástroje „Hledání řešení“. Hledá se řešení pro součet proudů $I_A + I_B + I_R$, který se musí rovnat proudu I_{Z1} podle rovnice (3.11), přičemž měněná hodnota je rekuperační napětí U_{REK} .

Postup řešení probíhá v těchto krocích:

1. zadání známých veličin do 1. tabulky
2. ve 2. tabulce se vypočtou napěťové a proudové poměry v obvodu bez rekuperace pomocí rovnice (3.4)
3. ve 3. tabulce se vypočtou poměry v obvodu při rekuperaci, přičemž se nebere v úvahu omezení maximálním dovoleným napětím U_{max2}
4. v poslední tabulce se výsledky přepočtou pro zadané maximální napětí U_{max2} , přičemž se vypočtou i výkonové poměry v obvodu včetně ztrát na jednotlivých částech obvodu (měnící, jednotlivé úseky TV, brzdový odpor rekuperující lokomotivy); v této tabulce je umožněno i porovnání poměrů v trakčním obvodu při dvou zadaných hodnotách maximálního dovoleného napětí U_{max2}

Kvůli přehlednosti a možnosti provést kontrolu jsou vypočtené hodnoty ve všech krocích stále zobrazeny v tabulkách.

Poznámka: V příloženém souboru „PytelkaJ_SpecifickéProblémy_LM_2012_2cast.xls“ je tento Kalkulátor na kartě „Kalkulátor“. Pro situace, ve kterých se neuplatní omezující podmínky je možno použít i výpočet pomocí soustavy rovnic, který je na kartě „Přímé řešení“.

4 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ VYUŽITÍ REKUPERACE

Jak bylo uvedeno v tabulce 3.1, maximální krátkodobá dovolená hodnota napětí v trakčním obvodu $U_{\max 2}$ (například při rekuperaci) je omezena normou ČSN EN 50 163 ed. 2 na 3 900 V, přičemž v České republice platí z důvodu provozu starších vozidel výjimka, kterou je $U_{\max 2}$ omezeno na 3 600 V. To je však stejná hodnota, jako je maximální dovolené trvalé napětí $U_{\max 1}$ v trakčním vedení, kterému se v provozu přibližuje napětí měření naprázdno. Když si při pohledu na obrázek 3.4 uvědomíme, že úspěšnost využití rekuperace je dána mimo jiné i spádem napětí mezi zdrojem a místy odběru, je zřejmé, že prostor pro využití rekuperace se na našich železnicích oproti většině evropských zemí poněkud zmenšuje.

Kromě zrušení výjimky a zvýšení $U_{\max 2}$ na úroveň 3 900 V by využití rekuperace bylo možno vylepšit snížením odporu vedení. Přínos této varianty by se projevil snížením ztrát ve vedení nejen při rekuperaci, ale i za ostatních provozních situací.

Další možností, jak vytvořit větší napěťový spád při zachování $U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, by mohlo být snížení napětí naprázdno na měřárnách. Tato varianta má však svá negativa, pro která je prakticky neproveditelná. Snížením napájecího napětí by se u starších vozidel omezil jejich výkon, u moderních vozidel by při dodržení požadovaného výkonu vznikly větší proudové nároky, což by znamenalo jak větší přenosové ztráty, tak i těžkosti při rozlišení zkratových proudů při vzdálených zkratech od proudů provozních. Při větších odběrech by zřejmě vznikly i problémy s dodržением dolní hranice napájecího napětí 2 000 V (viz tabulka 3.1).

Z výše uvedených důvodů porovnejme jen první dvě varianty (zvýšení $U_{\max 2}$ a snížení odporu vedení, přičemž se zaměříme především na situace, ve kterých by se možnost zvýšení $U_{\max 2}$ na 3 900 V mohla vůbec projevit. Přínosem jednotlivých variant by mělo být především snížení příkonu měření při zachování příkonu odběrných míst. Zajímavé bude proto sledovat využití výkonu EDB v trakčním obvodu (neboli jaká jeho část se využije v TV a jaká se zmaří v brzdovém odporu), a také ztráty v trakčním vedení.

4.1 Poměry při převažujícím odběru v úseku s rekuperujícím vozidlem

$$(I_X, I_Y < I_{Z1})$$

Uspořádání vozidel a výchozí hodnoty pro všechny uvažované situace v této kapitole jsou naznačeny na obrázku 4.1:

- napětí naprázdno obou měření v souladu s částí 2.2

$$U_{A0}, U_{B0} = 3\,500\text{ V}$$

- proudy I_X a I_Y dodávané měřáry TM“A“ a TM“B“ do sousedních úseků

$$I_X = 100\text{ A}, I_Y = 100\text{ A}$$

- proud I_{Z1} , který je odebírán vozidlem Z1

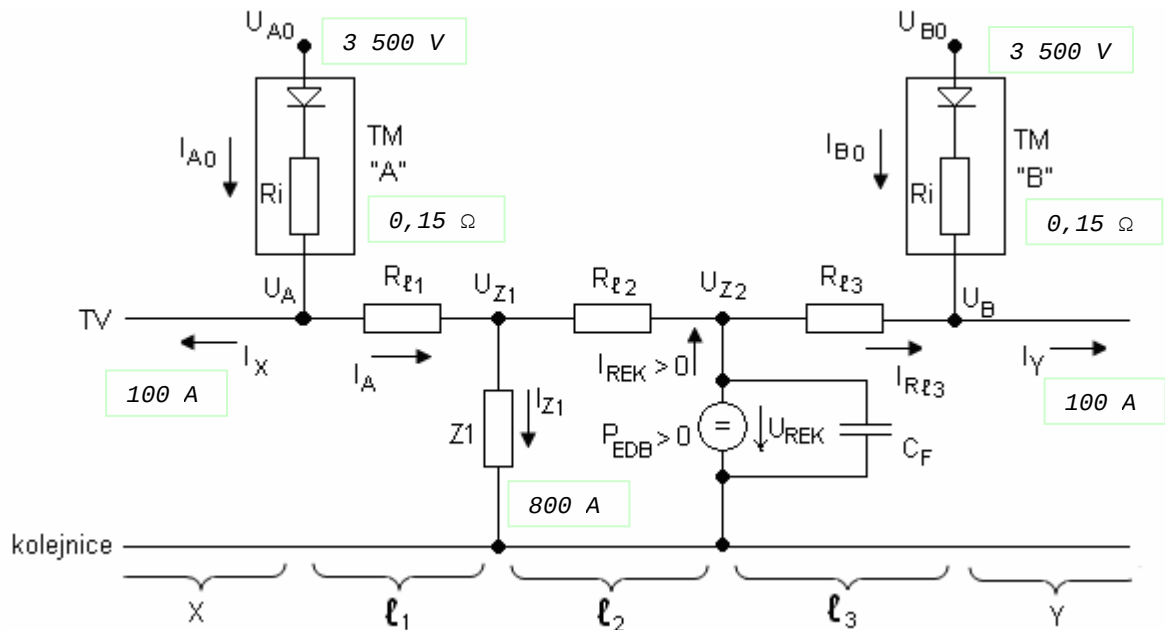
$$I_{Z1} = 800 \text{ A}$$

- vnitřní odpor měření R_i podle části 2.2 (provoz jedné usměrňovací jednotky 5 MW)

$$R_i = 0,15 \text{ } \Omega$$

- délka úseku

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 + \ell_3 = 20 \text{ km}$$



Obr. 4.1 Výchozí podmínky pro modelové situace v části 4.1

4.1.1 Výkonové poměry

Sledujme nyní, jak se budou měnit poměry v obvodu při uvažování neměnné vzdálenosti dvojice vozidel mezi sebou ($\ell_2 = \text{konst.}$) v různých polohách v úseku (mění se vzdálenosti ℓ_1 a ℓ_3). Příklady vypočteme pro základní sestavu TV podle PŘ. 2.1 (1× zesilovací vedení AIFe 240 mm²) při napětí $U_{\text{max}2} = 3600 \text{ V}$, dále pro základní sestavu při $U_{\text{max}2} = 3900 \text{ V}$, a nakonec pro sestavu podle PŘ. 2.2 (2× zesilovací vedení AIFe 240 mm²) při napětí $U_{\text{max}2} = 3600 \text{ V}$.

Celý tento cyklus výpočtů provedme pro počáteční mechanický brzdný výkon vozidla Z2 podle příkladu 1.1, tedy pro $P_{\text{EDB},0\text{mech}} = 2867 \text{ kW}$ (což je při účinnosti moderního vozidla 88 % elektrický výkon $P_{\text{EDB},0\text{el}} \approx 2523 \text{ kW}$), a také pro počáteční brzdný mechanický výkon podle příkladu 1.2, tedy pro $P_{\text{EDB},0\text{mech}} = 4300 \text{ kW}$ (což odpovídá elektrickému výkonu $P_{\text{EDB},0\text{el}} = 3784 \text{ kW}$).

Poznámka ke značení následujících Situací: Stejně číslo v označení Situací znamená stejnou vzdálenost (ℓ_1) vozidla Z1 od měřicího TM "A", stejná písmena pak označují stejný rozstup vozidel (ℓ_2)

Situace 1a $\ell_1 = 0,001 \text{ km}$, $\ell_2 = 5 \text{ km}$, $\ell_3 = 14,999 \text{ km}$

Tabulka 4.1 Výkonové poměry – Situace 1a

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} /$ $P_{\text{EDB,el}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 281	3 452	240	91	20	-	-	90
	3 900 V, 1× AlFe	3 627	1 065	3 463	0	112	14	215	83	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 597	1 045	3 462	0	92	13	236	82	100
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 281	3 452	1 501	91	20	-	-	60
	3 900 V, 1× AlFe	3 784	0	3 540	0	244	0	1 281	0	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	1 014	3 464	1 227	95	13	267	79	68

Legenda:

$U_{\text{max2, ZV}}$ max. dovolené napětí v TV, počet vodičů zesilovacího vedení

U_{REK} napětí na sběrači rekuperujícího vozidla Z2

P_{TM} celkový příkon měření

P celkový příkon odběrných míst (vozidla Z1 + úseků X a Y)

P_{BRZ} část výkonu EDB mařená na brzdovém odporu

ΔP_{TV} ztráty v TV

ΔP_{TM} ztráty na měnících

rozdíl P_{TM} úspora příkonů měření v jednotlivých variantách oproti základní sestavě

podíl P_{TM} procentuální podíl příkonů měření v jednotlivých variantách oproti základní sestavě

P_{REK} uplatněný výkon EDB v trakčním obvodu ($P_{\text{REK}} = P_{\text{EDB,el}} - P_{\text{BRZ}}$)

Poznámka: Případný rozdíl v součtech příkonů zdrojů ($P_{\text{EDB,el}} + P_{\text{TM}}$) a výkonů odběrů ($P + P_{\text{BRZ}} + \Delta P_{\text{TV}} + \Delta P_{\text{TM}}$) o ± 1 je dán zaokrouhlením přesnějších výsledků z Kalkulátoru

Situace 1b $\ell_1 = 7,5 \text{ km}$, $\ell_2 = 5 \text{ km}$, $\ell_3 = 7,5 \text{ km}$

Tabulka 4.2 Výkonové poměry – Situace 1b

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} /$ $P_{\text{EDB,el}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 551	1 013	3 396	0	128	13	-	-	100
	3 900 V, 1× AlFe	3 551	1 013	3 396	0	128	13	0	100	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 536	1 002	3 409	0	104	12	11	99	100
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	818	3 428	1 025	141	8	-	-	73
	3 900 V, 1× AlFe	3 801	15	3 558	0	241	0	803	2	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	696	3 452	900	122	6	122	85	76

Situace 1c $\ell_1 = 14,999 \text{ km}$, $\ell_2 = 5 \text{ km}$, $\ell_3 = 0,001 \text{ km}$

Tabulka 4.3 Výkonové poměry – Situace 1c

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} / P_{\text{EDB}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 498	976	3 348	0	140	11	-	-	100
	3 900 V, 1× AlFe	3 498	976	3 348	0	140	11	0	100	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 497	975	3 374	0	114	10	1	100	100
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	663	3 422	866	153	5	-	-	77
	3 900 V, 1× AlFe	3 832	44	3 592	0	235	0	619	7	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	584	3 450	785	129	4	78	88	79

Situace 2a $\ell_1 = 0,001 \text{ km}$, $\ell_2 = 12,5 \text{ km}$, $\ell_3 = 7,499 \text{ km}$

Tabulka 4.4 Výkonové poměry – Situace 2a

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} / P_{\text{EDB}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	2 210	3 420	1 196	57	60	-	-	53
	3 900 V, 1× AlFe	3 851	1 207	3 484	0	228	18	1 003	55	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	2 035	3 428	1 016	63	51	175	92	60
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	2 210	3 420	2 457	57	60	-	-	35
	3 900 V, 1× AlFe	3 900	1 010	3 497	1 009	275	12	1 200	46	73
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	2 035	3 428	2 277	63	51	175	92	40

Situace 2b $\ell_1 = 7,499 \text{ km}$, $\ell_2 = 12,5 \text{ km}$, $\ell_3 = 0,001 \text{ km}$

Tabulka 4.5 Výkonové poměry – Situace 2b

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} / P_{\text{EDB}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 592	3 325	561	198	31	-	-	78
	3 900 V, 1× AlFe	3 764	1 154	3 402	0	259	16	438	72	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	1 490	3 361	455	170	27	102	94	82
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 592	3 325	1 822	198	31	-	-	52
	3 900 V, 1× AlFe	3 900	791	3 466	765	336	8	802	50	80
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	1 490	3 361	1 717	170	27	102	94	55

Situace 3a $\ell_1 = 0,001 \text{ km}$, $\ell_2 = 19,998 \text{ km}$, $\ell_3 = 0,001 \text{ km}$

Tabulka 4.6 Výkonové poměry – Situace 3

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} / P_{\text{EDB}}$ [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	2 522	3 413	1 517	37	78	-	-	40
	3 900 V, 1× AlFe	3 900	1 720	3 474	540	194	36	802	68	79
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	2 395	3 418	1 387	44	70	127	95	45
3 784	3 600 V, 1× AlFe	3 600	2 522	3 413	2 778	37	78	-	-	27
	3 900 V, 1× AlFe	3 900	1 720	3 474	1 801	194	36	802	68	52
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	2 395	3 418	2 648	44	70	127	95	30

Co se týká úspor při snížení příkonu měníren, je možno z výsledků vyvodit tyto závěry:

- pokud by při rekuperaci mohlo dojít ke zvýšení U_{REK} nad dnes povolenou hodnotu 3 600 V, má převážný vliv na úspory právě možnost zvýšení dovolené hodnoty U_{max2} ; to se ve větší míře projevuje s růstem výkonu EDB, kdy U_{REK} stoupá výrazněji nad 3 600 V (viz např. *Situace 1a* při vyšším výkonu EDB, kdy vzrůst U_{REK} o 184 V způsobí úplné uzavření měníren a úsporu okamžitého výkonu 1 281 kW); úspory vlivem snížení měrného odporu vedení jsou zde několikanásobně menší
- pouze v případech, kdy by se U_{REK} pohybovalo jen těsně nad hranicí 3 600 V se projevují poněkud více úspory vlivem snížení odporu vedení, nicméně tento efekt není zdaleka tak výrazný, jako v předchozím případě (viz *Situace 1a* při nižším výkonu EDB); snížení odporu vedení se však samozřejmě kladně projevuje ve všech dalších provozních situacích, kdy této maximální hodnoty napětí dosaženo není

Co se týká využití výkonu EDB v trakčním obvodu (poměr $P_{\text{REK}} / P_{\text{EDB,el}}$) je možno říci:

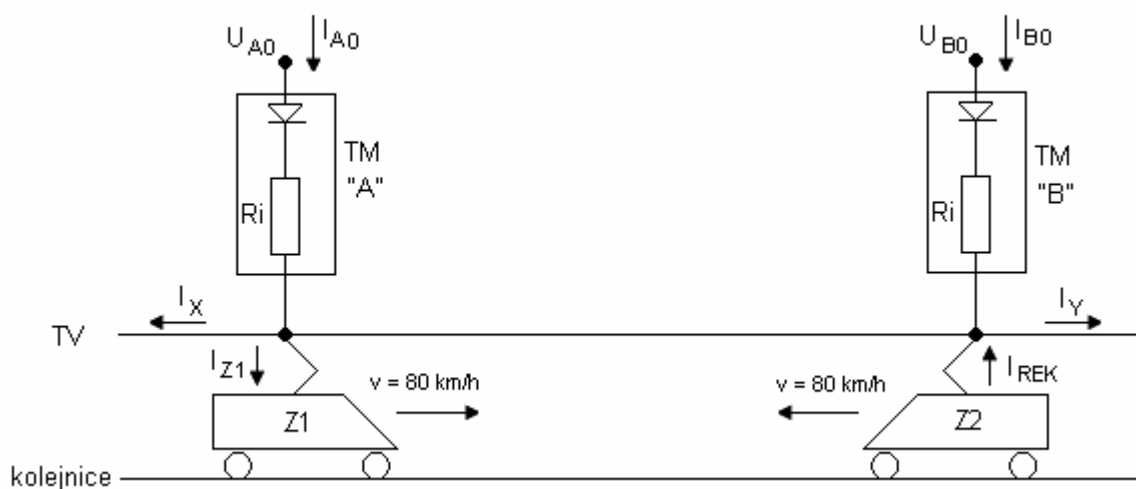
- při vyšším výkonu EDB umožňuje zvýšení hodnoty U_{REK} jeho lepší využití v trakčním obvodu, to ovšem nutně neznamená stejné zvýšení výkonu na odběrných místech nebo stejné snížení příkonu měníren – v mnoha případech se poměrně velká část rekuperačního výkonu maří v TV (v uvedených příkladech od 37 kW v *Situaci 3a* až po 336 kW v *Situaci 2b* při vyšším výkonu EDB), což je cena za jeho přenos na vzdálená odběrná místa; je však zřejmé, že i tak se tímto opatřením dosahuje významných úspor na příkonu měníren, viz výsledky v tabulkách

- efektivnější využití výkonu EDB je opět umožněno především zvýšením hodnoty $U_{\max 2}$ na 3 900 V; uvažované snížení odporu TV má na zlepšení situace pouze malý vliv (v uvedených příkladech maximálně několik procent)

4.1.2 Energetické poměry (Situace 4)

Aby bylo možno kvantitativně vyčíslit přínos obou variant, zkoumejme nyní situaci, kdy se vozidla společně pohybují v daném úseku. Zvolme situaci podle příkladu 1.3, tedy nákladní vlak o celkové hmotnosti 2 588 tun jedoucí rychlostí 80 km/h ze spádu 10,3 ‰ na dráze 20 km, odpor z oblouku je na celé délce trati 0,3 N/kN (výsledný $o_{obl} + o_{skl} = -10$ N/kN). Tento vlak je reprezentován rekuperujícím vozidlem Z2 podle obrázku 4.2, které se pohybuje od měřírny TM "B" k měřírně TM "A". Konstantní mechanický výkon jeho EDB je 2 867 kW, elektrický 2 523 kW. Vozidlo Z1 představující stálý odběr $I_{Z1} = 800$ A se pohybuje v opačném směru, tedy od měřírny TM "A" k měřírně TM "B". Jeho rychlost ve výchozím okamžiku bude také 80 km/h. Do sousedních úseků budou měřírny dodávat proudy $I_X, I_Y = 100$ A. Výchozím okamžikem sledování bude průjezd obou vozidel kolem příslušné měřírny (viz obrázek 4.2), konec sledování nastane při průjezdu kolem měřírny druhé. Výchozí okamžik odpovídá *Situaci 3* z minulé části. Pro jednoduchost uvažujme jednokolejnou trať, pro vykřížování vlaků je uprostřed dvoukolejný úsek, jenž má zanedbatelný vliv na parametry trakčního vedení.

Rozdělme vzdálenost mezi měřírnami na úseky dlouhé 1 km, což při rychlosti 80 km/h odpovídá času na projetí takového úseku 45 s, a zkoumejme všechny sledované hodnoty v těchto časových intervalech.



Obr. 4.2 Výchozí poměry při zkoumání energetických poměrů (Situace 4)

Předpoklad konstantního odebíraného proudu zde přináší mírné obtíže při dalších výpočtech. Jelikož se na sběrači vozidla Z1 bude při jízdě vlivem změny jeho polohy v úseku měnit napětí, při uvažovaném konstantním odběru proudu se bude měnit také jeho příkon.

Ve výchozím okamžiku je příkon vozidla $P_{Z1,0}$. Při účinnosti η tohoto vozidla se na obvodu kol objeví výkon $P_{Z1,0mech}$, čemuž při rychlosti 80 km/h odpovídá určitá tažná síla F_T .

$$F_T = \frac{3,6 \cdot P_{Z1,0} \cdot \eta}{V} \quad [\text{kN}; \text{kW}, \text{km/h}] \quad (4.1)$$

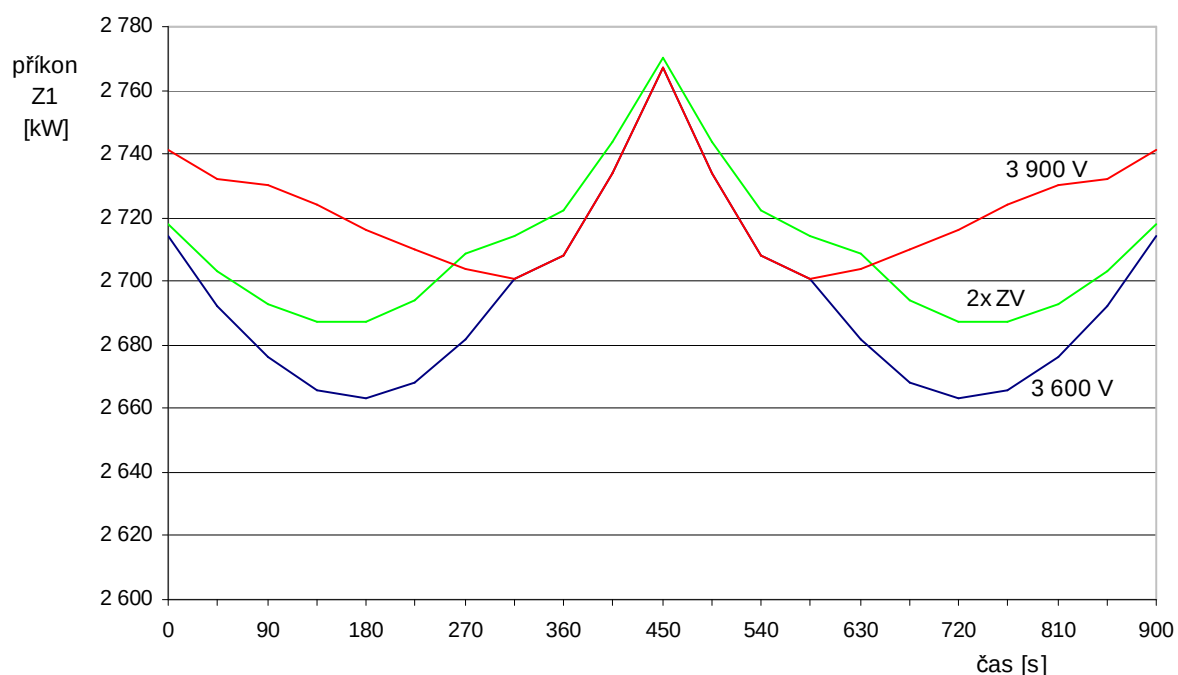
To je síla, která odpovídá proudu motorů, a lze ji proto považovat za konstantní po celou dobu jízdy v pozorovaném úseku. Po uplynutí 45 s (během kterých ujede rekuperující vozidlo 1 km), bude příkon vozidla Z1 $P_{Z1,1}$. Jeho okamžitá rychlost bude

$$V = \frac{3,6 \cdot P_{Z1,1} \cdot \eta}{F_T} = k \cdot P_{Z1,1} \quad [\text{km/h}; \text{kW}, \text{kN}] \quad (4.2)$$

Křivka rychlosti vozidla Z1 tedy bude kopírovat tvar křivky jeho příkonu, jehož průběh je zakreslen na obrázku 4.3. Na tomto obrázku je vidět, že se příkon oproti výchozímu okamžiku mění zhruba v rozmezí $\pm 2\%$. Ačkoliv se tyto změny oproti konstantní rychlosti zřejmě nijak zásadně neprojeví na celkových výsledcích, pokusme se je pro úplnost vyčíslit.

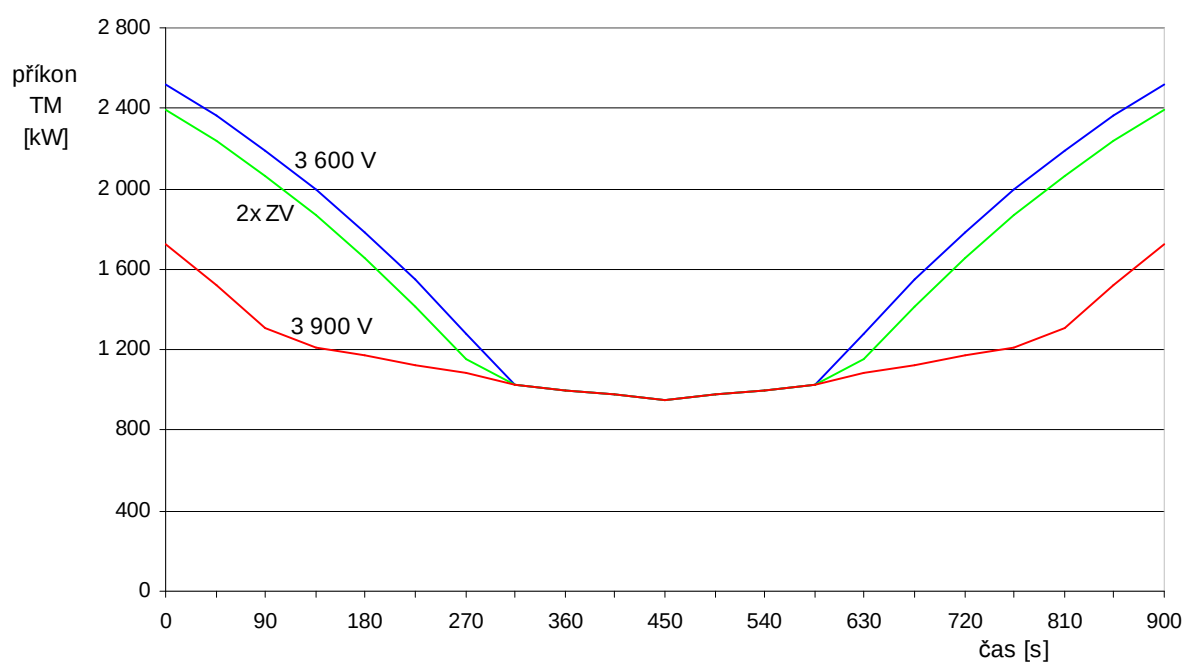
Při uvažování zhruba lineárního poklesu příkonu (a tím i rychlosti) během jízdy v jednotlivých 45 s úsecích by byla průměrná rychlost v prvních 45 s asi $V_p = 79,7$ km/h. Tomu odpovídá ujetá dráha 996 m. Rozdíl 4 m na dráze znamená rozdíl na celkovém příkonu měření v řádu desítek wattů, tudíž zcela zanedbatelný. V dalších úsecích by byla situace podobná, po dosažení konkrétních hodnot vychází celkový rozdíl na ujeté dráze mezi vozidly 153 m ($\ell_{Z2} = 20$ km, $\ell_{Z1} = 19,848$ km). To je z hlediska celkových energetických poměrů celkem bezvýznamné, a proto lze uvažovat rychlost vozidla Z1 také konstantní (80 km/h)⁸.

⁸ Nejjednodušší by bylo předpokládat konstantní výkon vozidla Z1, potom by byla konstantní i jeho rychlost. Protože však v minulých příkladech bylo počítáno vždy s konstantním proudovým odběrem a na tomto předpokladu je vytvořen i *Kalkulátor*, zachovejme tento postup i nyní.

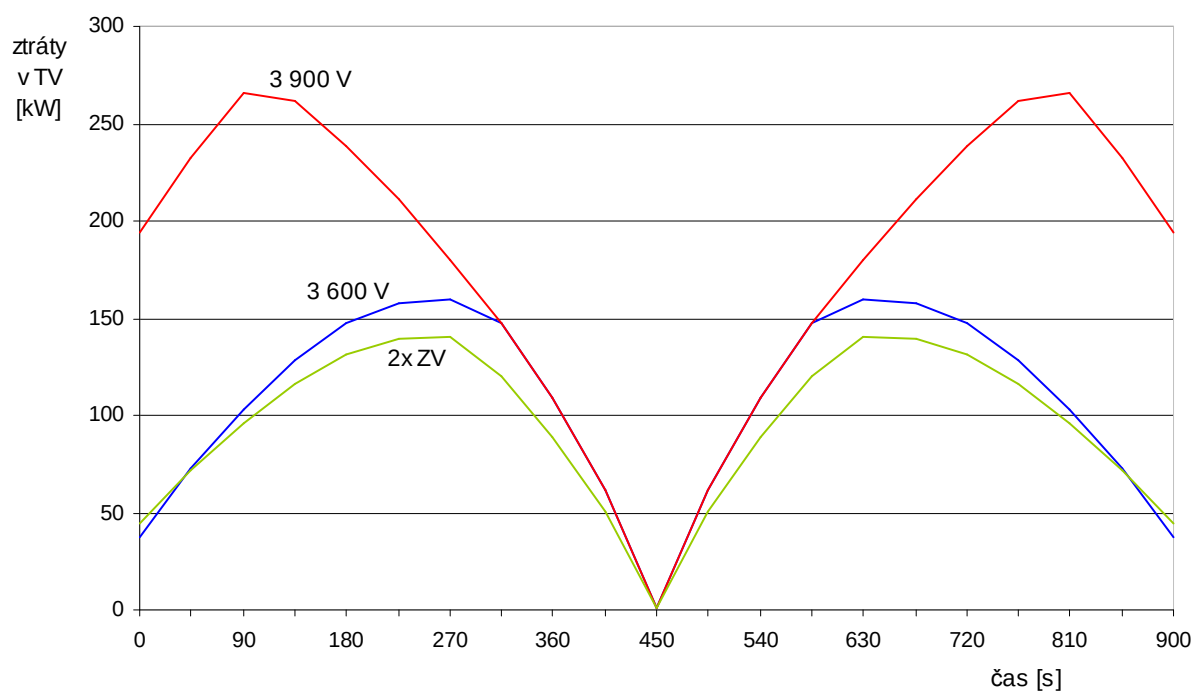


Obr. 4.3 Příkon vozidla Z1 při odběru konstantního proudu (Situace 4)

Na obrázku 4.4 je zachycen průběh zřejmě nejdůležitější veličiny z energetického hlediska, kterou je celkový příkon měníren. Plochy pod jednotlivými křivkami představují spotřebovanou energii pro dané uspořádání. Jelikož jsou křivky symetrické podle svislice v čase 450 s, lze tuto plochu například obdélníkovou metodou snadno spočítat. Na následujících obrázcích jsou uvedeny průběhy dalších sledovaných veličin, souhrnná tabulka výsledků je za posledním obrázkem.



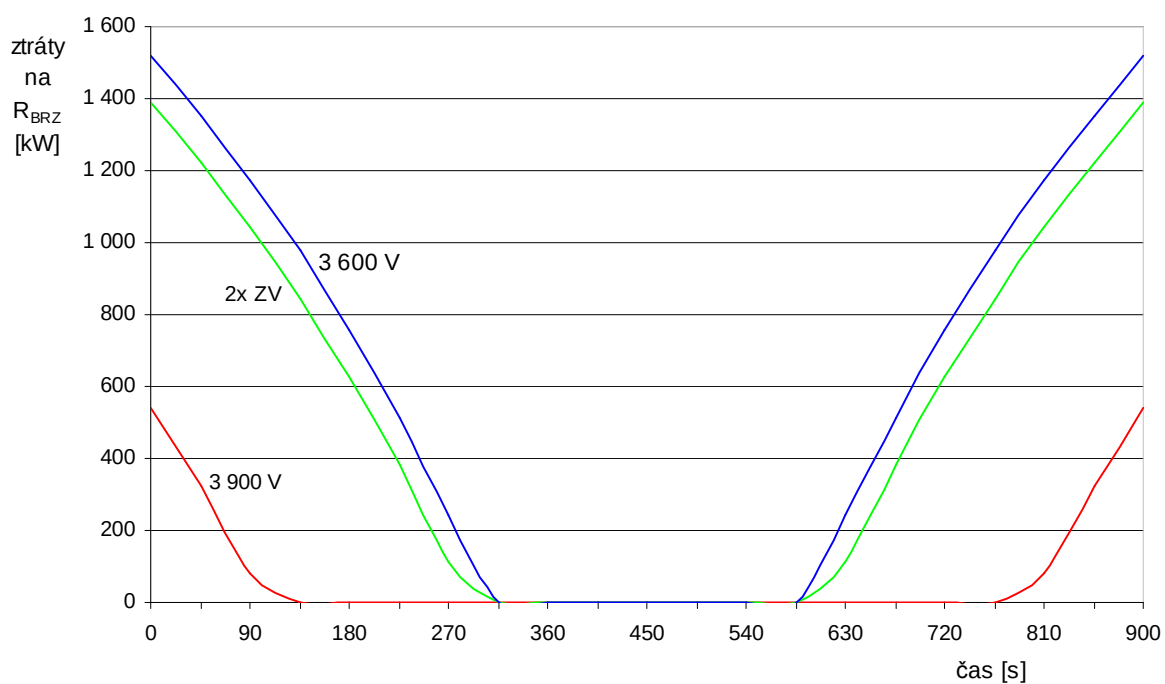
Obr. 4.4 Celkový příkon měníren TM "A" + TM "B" (Situace 4)



Legenda:

- 3 600 V základní varianta ($U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, TV s jedním AlFe lanem v zesilovacím vedení)
- 3 900 V zvýšení $U_{\max 2}$ ($U_{\max 2} = 3\,900\text{ V}$, TV s jedním lanem v zesilovacím vedení)
- 3 600 V snížení odporu vedení ($U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, TV se dvěma lany v zesilovacím vedení)

Obr. 4.5 Ztráty v trakčním vedení (Situace 4)



Obr. 4.6 Ztráty na brzdovém odporníku rekuperujícího vozidla Z2 (Situace 4)

Tabulka 4.7 Tabulka energetických poměrů – Situace 4

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	energie	3 600 V, 1× AlFe	3 900 V, 1× AlFe	3 600 V, 2× AlFe
2 523	E_{TM} [kWh]	398	294	376
	$E_{\Delta\text{TM}}$ [kWh]	8	4	7
	$E_{\Delta\text{TV}}$ [kWh]	28	45	24
	E_{BRZ} [kWh]	144	17	123
	$E_{\text{TM}} / E_{\text{TM}}$ [%]	100	74	95

Legenda:

- E_{TM} celková energie odebraná měřícími
- $E_{\Delta\text{TM}}$ celkové ztráty na měřících
- $E_{\Delta\text{TV}}$ energie zmařená v trakčním vedení
- E_{BRZ} energie zmařená na brzdovém odporu
- $E_{\text{TM}} / E_{\text{TM}}$ poměr celkové energie odebrané měřícími v jednotlivých variantách ku základní variantě ($U_{\text{max2}} = 3\,600\text{ V}$, sestava TV s jedním AlFe lanem 240 mm^2 jako zesilovacím vedením)

Výsledky potvrzují, že na energetické úspory během rekuperace by měla rozhodující vliv možnost zvýšení maximálního dovoleného napětí v TV na evropskou úroveň (3 900 V). V daném případě by se to projevilo úsporou zhruba čtvrtiny energie odebrané měřícími z distribuční sítě, což je zde zhruba 100 kWh. Jelikož nejsou volně k dispozici smlouvy mezi dodavatelem trakční energie a jejími odběrateli, je možno pouze odhadovat, že finanční úspora by se zde pohybovala v řádu stokorun.

Snížení měrného odporu TV přidáním jednoho (celkově druhého) lana AlFe 240 mm^2 by se projevilo podstatně méně, energetické úspory by činily asi 5 %, tedy zhruba 20 kWh.

Pro zajímavost byl ještě spočítán měrný odpor vedení, při jakém by se v tomto případě dosáhlo srovnatelných energetických úspor jako při zvýšení napětí U_{max2} na 3 900 V. Byla zjištěna hodnota zhruba $0,023\text{ }\Omega/\text{km}$, což by při odporu zpětné cesty $0,015\text{ }\Omega/\text{km}$ (podle části 2.4) odpovídalo sestavě TV s celkem čtrnácti lany AlFe 240 mm^2 v zesilovacím vedení (parametry vodičů viz tabulka 2.1 v části 2.3). Realizace tohoto opatření je samozřejmě z technické i ekonomické stránky nesmyslná.

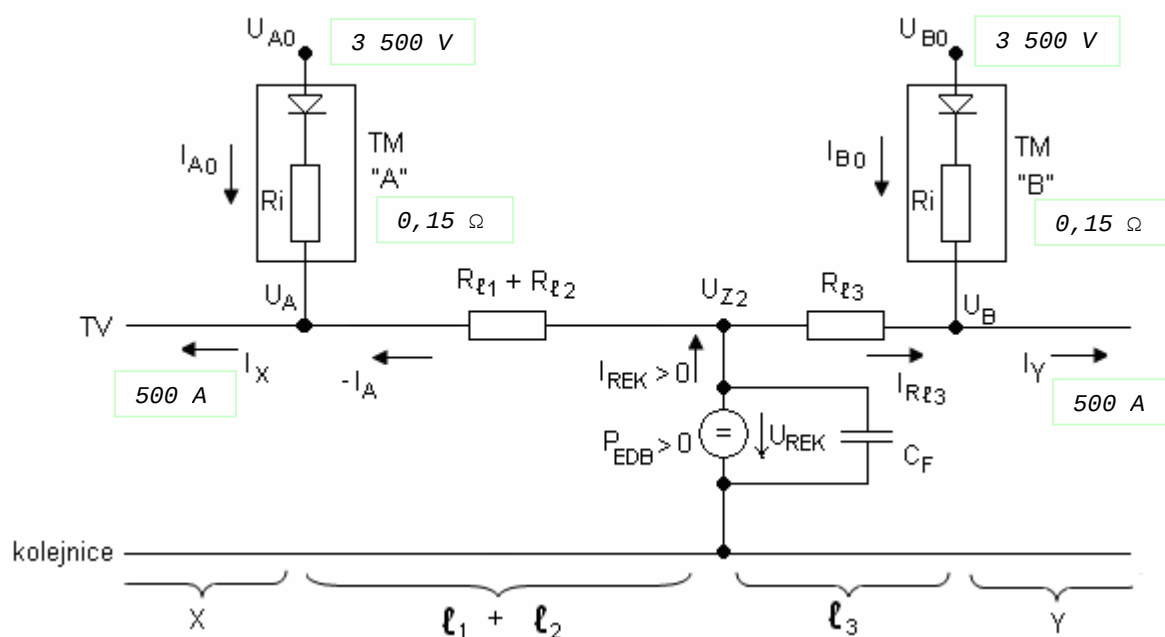
4.2 Poměry při převažujícím odběru v sousedních úsecích ($I_X, I_Y > I_{Z1}$)

Na dosud uvedených příkladech je ukázán vliv zlepšení podmínek pro využití rekuperace v témže úseku, kde se nachází rekuperující vozidlo (I_X a I_Y jsou malé). Alespoň na dvou příkladech by bylo vhodné ukázat také vliv zlepšení podmínek za převažujícího odběru v sousedních úsecích.

Zachovejme stejný celkový proudový odběr 1 000 A jako v minulých případech, takže změnou oproti předchozím příkladům jsou pouze

- zvětšené proudy I_X a I_Y dodávané měnírnami TM“A” a TM“B” do sousedních úseků $I_X = 500$ A, $I_Y = 500$ A
- nulový proud I_{Z1} odebíraný vozidlem Z1

Jelikož vozidlo Z1 neodebírá žádný proud, není třeba jej dále uvažovat, a proto je také možno sloučit například úseky ℓ_1 a ℓ_2 do jednoho. Výchozí situaci ukazuje obrázek 4.7.



Obr. 4.7 Výchozí podmínky pro modelové situace v části 4.2

4.2.1 Výkonové poměry

Zvolme zde výchozí situaci jen podle příkladu 1.1, tedy jen pro $P_{EDB0, mech} = 2\,867$ kW ($P_{EDB0, el} \approx 2\,523$ kW). Ve sledovaném úseku není ovšem nyní žádný odběr, proudy do sousedních úseků X a Y jsou I_X a $I_Y = 500$ A.

Situace 5 $\ell_1 + \ell_2 = 19,999 \text{ km}$, $\ell_3 = 0,001 \text{ km}$

Tabulka 4.8 Výkonové poměry – Situace 5

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} /$ P_{EDB} [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 282	3 523	242	21	20	-	-	90
	3 900 V, 1× AlFe	3 670	1 094	3 562	0	41	15	188	85	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	1 188	3 525	145	24	17	94	93	94

Situace 6 $\ell_1 + \ell_2 = 10 \text{ km}$, $\ell_3 = 10 \text{ km}$

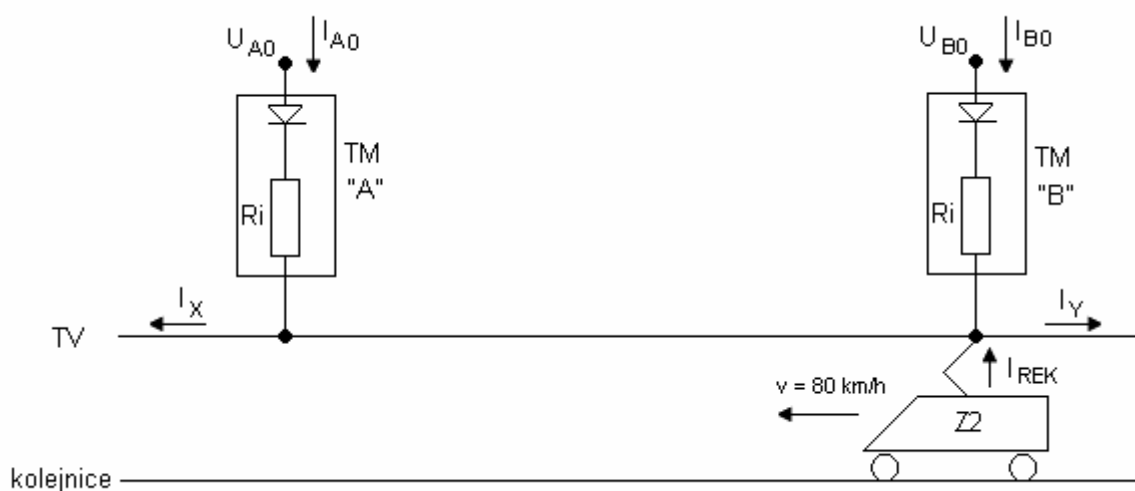
Tabulka 4.9 Výkonové poměry – Situace 6

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	$U_{\text{max2, ZV}}$	U_{REK} [V]	P_{TM} [kW]	P [kW]	P_{BRZ} [kW]	ΔP_{TV} [kW]	ΔP_{TM} [kW]	rozdíl P_{TM} [kW]	podíl P_{TM} [%]	$P_{\text{REK}} /$ P_{EDB} [%]
2 523	3 600 V, 1× AlFe	3 600	1 822	3 461	797	67	20	-	-	68
	3 900 V, 1× AlFe	3 676	1 098	3 476	0	137	7	724	60	100
	3 600 V, 2× AlFe	3 600	1 524	3 467	491	75	14	298	84	81

Co se týká úspor v odebrané energii z distribuční sítě, je možno v podstatě zopakovat závěr z odstavce 4.1.1, tedy že na výši úspor má vliv především možnost zvýšení napětí U_{max2} na hodnotu 3 900 V. *Situace 6* ukazuje, že mírné zvýšení U_{REK} nad hodnotu 3 600 V (o 76 V) znamená úsporu na okamžitém výkonu ve výši 40 %, což zde činí 724 kW. Snížení odporu vedení přidáním jednoho AlFe lana 240 mm² do zesilovacího vedení se projeví méně, i když rozdíly nejsou tak výrazné, jako v předešlých případech.

4.2.2 Energetické poměry

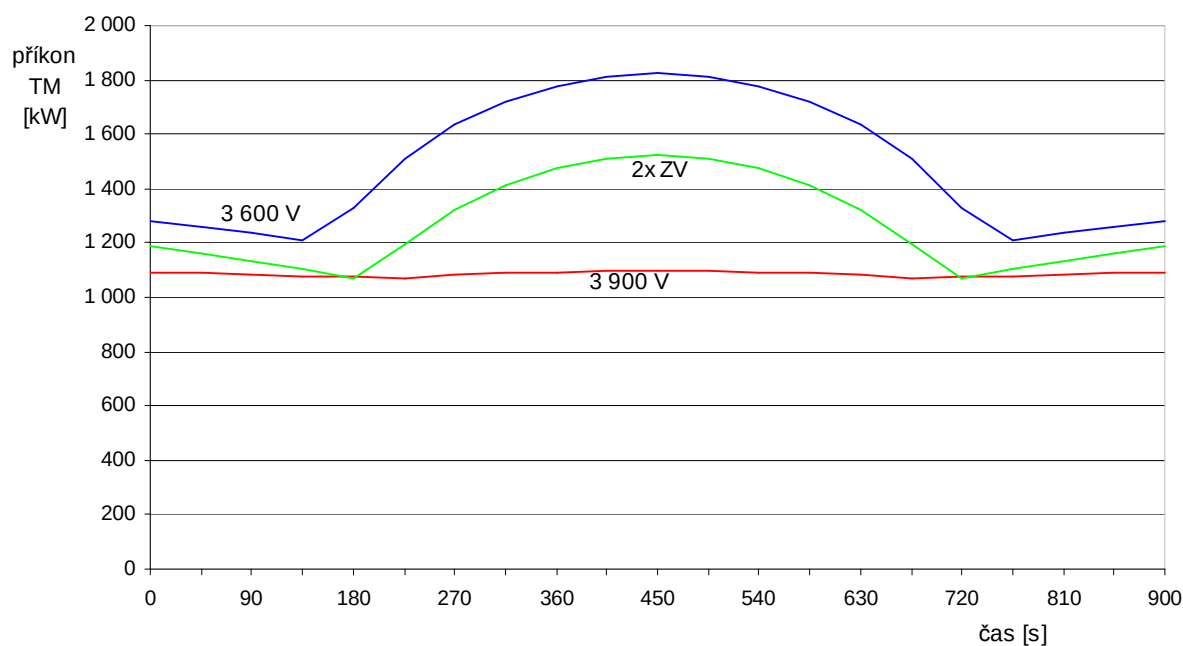
Zvolme opět situaci podle příkladu 1.3, tedy nákladní vlak o celkové hmotnosti 2 588 tun jedoucí rychlostí 80 km/h ze spádu 10,3 ‰ na dráze 20 km, odpor z oblouku je na celé délce trati 0,3 N/kN (výsledný $\sigma_{\text{obl}} + \sigma_{\text{skl}} = -10 \text{ N/kN}$). Tento vlak je reprezentován rekuperujícím vozidlem Z2 podle obrázku 4.9, které se pohybuje od měřírny TM “B” k měřírně TM “A” konstantní rychlostí 80 km/h. Mechanický výkon EDB je opět 2 867 kW, elektrický 2 523 kW. Do sousedních úseků budou měřírny dodávat proudy I_x a $I_y = 500 \text{ A}$. Výchozím okamžikem sledování bude průjezd vozidla Z2 kolem měřírny TM “B” (viz obrázek 4.8), konec sledování nastane při průjezdu kolem měřírny TM “A”. Výchozí okamžik odpovídá *Situaci 5* z minulého odstavce.



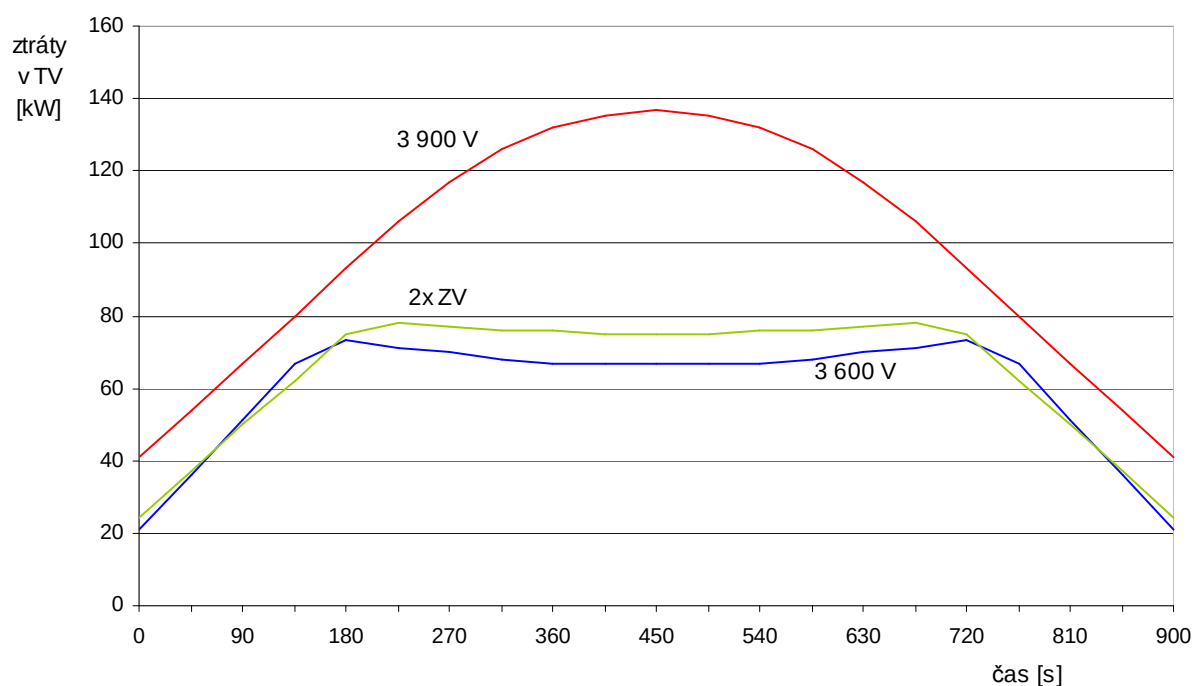
Obr. 4.8 Výchozí poměry při zkoumání energetických poměrů (Situace 7)

Postupujeme stejně jako v odstavci 4.4.1, tzn. rozdělíme vzdálenost na úseky o délce 1 km (ty odpovídají při rychlosti 80 km/h času jízdy 45 s) a sledujeme potřebné údaje právě v těchto časových intervalech.

Na obrázku 4.9 je zachycen průběh celkový příkon měněn jako zřejmě nejdůležitější veličiny z energetického hlediska. Plochy pod jednotlivými křivkami představují spotřebovanou energii pro dané uspořádání, kterou lze stejně jako v předchozím případě celkem jednoduše spočítat. Na následujících obrázcích jsou uvedeny průběhy dalších sledovaných veličin, souhrnná tabulka výsledků je opět za posledním obrázkem.



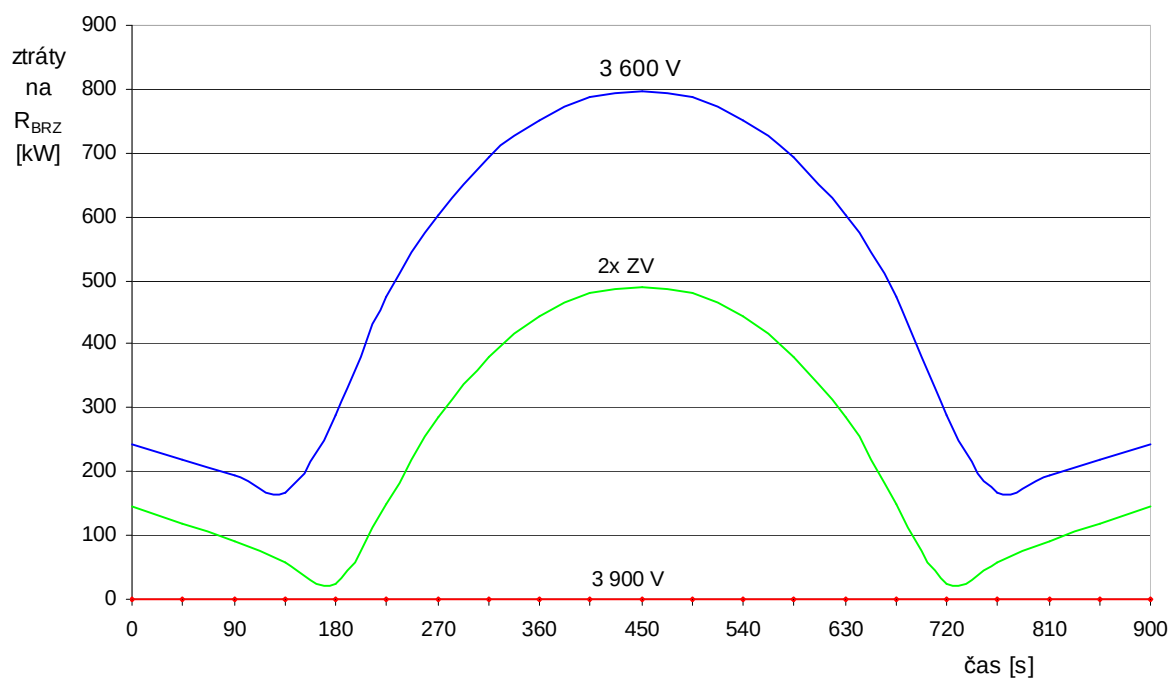
Obr. 4.9 Celkový příkon měněn TM "A" + TM "B" (Situace 7)



Legenda:

- 3 600 V základní varianta ($U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, TV s jedním AlFe lanem v zesilovacím vedení)
- 3 900 V zvýšení $U_{\max 2}$ ($U_{\max 2} = 3\,900\text{ V}$, TV s jedním lanem v zesilovacím vedení)
- 3 600 V snížení odporu vedení ($U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, TV se dvěma lany v zesilovacím vedení)

Obr. 4.10 Ztráty v trakčním vedení (Situace 7)



Obr. 4.11 Ztráty na brzdovém odporu rekuperujícího vozidla (Situace 7)

Tabulka 4.10 Tabulka energetických poměrů – Situace 7

$P_{\text{EDB,el}}$ [kW]	energie	3 600 V, 1× AlFe	3 900 V, 1× AlFe	3 600 V, 2× AlFe
2 523	E_{TM} [kWh]	376	271	319
	$E_{\Delta\text{TM}}$ [kWh]	5	3	4
	$E_{\Delta\text{TV}}$ [kWh]	15	25	16
	E_{BRZ} [kWh]	117	0	59
	$E_{\text{TM}} / E_{\text{TM}}$ [%]	100	72	85

Legenda:

E_{TM} celková energie odebraná měřícími

$E_{\Delta\text{TM}}$ celkové ztráty na měřících

$E_{\Delta\text{TV}}$ energie zmařená v trakčním vedení

E_{BRZ} energie zmařená na brzdovém odporu

$E_{\text{TM}} / E_{\text{TM}}$ poměr celkové energie odebrané měřícími v jednotlivých variantách ku základní variantě ($U_{\text{max2}} = 3\,600\text{ V}$, sestava TV s jedním AlFe lanem 240 mm² jako zesilovacím vedením)

Výsledky opět potvrzují, že na energetické úspory během rekuperace má rozhodující vliv možnost zvýšení maximálního dovoleného napětí v TV na evropskou úroveň (3 900 V). Celková energie odebraná měřícími z distribuční sítě při základní variantě sestavy TV je zhruba srovnatelná s minulým příkladem v části 4.1.2 (Situace 4), prakticky stejné jsou procentuální úspory energie odebrané měřícími, které opět činí zhruba 25 %, tj. 100 kWh. Z důvodů uvedených v předchozím případě je opět možno finanční úsporu pro uvedenou situaci pouze odhadovat (v řádu stokorun).

Snížení měrného odporu TV přidáním jednoho lana AlFe 240 mm² by se zde projevilo poněkud více než v minulém případě, zde by úspory činily asi 15 % (necelých 60 kW), což je o 10 % více než v předchozím případě.

Stejných energetických úspor jako při zvýšení napětí U_{max2} na 3 900 V by se v tomto případě dosáhlo při měrném odporu vedení 0,038 Ω/km, což by při uvažovaném odporu zpětné cesty (podle části 2.4) 0,015 Ω/km odpovídalo sestavě trakčního vedení s celkem čtyřmi lany AlFe 240 mm².

ZÁVĚR

Na příkladech uvedených v kapitole 1 je ukázáno, že kinetická (případně potenciální) energie jedoucích železničních vozidel je poměrně vysoká, pohybuje se podle druhu vlaku a rychlosti v řádech desítek až stovek kilowatthodin. Ačkoliv vlivem omezeného součinitele adheze a vlivem jízdních a traťových odporů lze do procesu rekuperace vložit pouze její část, je patrné, že využití rekuperačního brzdění a uplatnění této energie k další užitečné práci by pro dopravce mělo znamenat nezanedbatelný ekonomický přínos.

Rekuperační proces je limitován některými omezeními, v ČSN EN 50 163 ed. 2 je mimo jiné uvedeno maximální napětí $U_{\max 2}$, které se může během rekuperace objevit v trakčním vedení, jeho hodnota 3 900 V je však na tratích SŽDC opatřením GŘ SŽDC 11/2009 snížena na 3 600 V. Vzhledem k tomu, že se tomuto napětí blíží napětí naprázdno trakčních měření, má toto opatření za následek zmenšení prostoru pro využití rekuperace na našich železnicích.

Kromě zvýšení napětí $U_{\max 2}$ na hodnotu 3 900 V by se mohla situace vylepšit snížením měrného odporu vedení nebo i snížením napětí na měnících. Z důvodů, které jsou uvedeny na začátku kapitoly 4, jsou realizovatelná pouze první dvě opatření, tj. zvýšení $U_{\max 2}$ nebo snížení odporu vedení.

Cílem práce bylo především ukázat, jak by se vliv těchto opatření projevil v provozních situacích, kdy by se možnost zvýšení $U_{\max 2}$ mohla vůbec uplatnit, přičemž výsledným efektem zavedení jednoho či druhého opatření by mělo být především snížení příkonu měření při zachování příkonu odběrných míst.

Porovnávány tedy byly varianty:

- $U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, sestava TV s jedním lanem AlFe 240 mm² v zesilovacím vedení (základní)
- $U_{\max 2} = 3\,900\text{ V}$, sestava TV s jedním lanem AlFe 240 mm² v zesilovacím vedení (zvýšení $U_{\max 2}$)
- $U_{\max 2} = 3\,600\text{ V}$, sestava TV se dvěma lany AlFe 240 mm² v zesilovacím vedení (snížení odporu TV)

Vychází se z jednoduchého schématu uspořádání vozidel, naznačeném na obrázku 3.4. Ve sledovaném jednokolejném úseku, napájeném z trakčních měření TM "A" a TM "B", se pohybuje rekuperující vozidlo (Z2), které je nahrazeno zdrojem výkonu P_{EDB} , a vozidlo (Z1), reprezentované proudovým odběrem I_{Z1} . Dalšími odběrnými místy jsou sousední úseky X a Y, do kterých měřirny TM "A" a TM "B" dodávají proudy I_X a I_Y . Pro měřirny bylo pomocí získaného časového průběhu zatížení vytvořeno náhradní schéma (viz část 2.2), parametry trakčního vedení a zpětné cesty jsou uvedeny v částech 2.3 a 2.4.

Napětíové, proudové a výkonové poměry byly nejprve počítány pomocí rovnic odvozených z obrázku 3.4, kvůli problémům s jejich podmíněností byla nakonec vytvořena aplikace v tabulkovém procesoru (*Kalkulátor*), pomocí něhož jsou vypočteny veškeré veličiny v kapitole 4, a jako takový je i součástí této práce. Problematikou výpočtu trakčního obvodu se zabývá část 3.4.

Pro splnění cíle této práce byly nejprve sledovány poměry v trakčním vedení v několika situacích, pro něž byly podkladem hodnoty z příkladů vypočtených v 1. kapitole. Uvažovány byly situace jak při převažujícím odběru ve stejném úseku, kde se vyskytuje rekuperující vozidlo (viz část 4.1), tak situace, kdy je rekuperující vozidlo v úseku osamoceno a odběr je pouze v úsecích sousedních (viz část 4.2). V obou případech byly nejprve zkoumány výkonové poměry v trakčním obvodu při různé poloze vozidel vůči sobě i vůči měnícím, a dále především poměry energetické (viz *Situace 4* a *Situace 7*), jejichž výchozí podmínky jsou na obrázcích 4.2 a 4.8. Průběhy nejdůležitějších veličin z těchto *Situací* jsou zpracovány do grafů uvedených na obrázcích 4.3 až 4.6 a 4.9 až 4.11. Souhrnné výsledky z této části obsahují tabulky 4.7 a 4.10.

Z výsledků vyplývá, že ačkoliv každá z obou uvažovaných variant (zvýšení maximálního dovoleného napětí v TV versus snížení odporu TV) vykazuje jisté úspory, převažující vliv na využití efektu rekuperace má možnost zvýšení maximálního dovoleného napětí $U_{\max 2}$. V obou situacích (*Situace 4* a *Situace 7*) se zvýšení $U_{\max 2}$ na hodnotu 3 900 V (danou normou ČSN EN 50 163) projevilo více než čtvrtinovou úsporou trakční energie odebrané měnícími po dobu průjezdu vozidel sledovaným úsekem, což v obou případech činí úsporu zhruba 100 kWh během patnácti minut jízdy. Vzhledem k tomu, že smlouvy mezi dodavateli elektrické energie a jejich odběrateli nejsou běžně zveřejňovány, lze úsporu ve finanční rovině pouze odhadovat, v tomto jednom případě zhruba v řádu stokorun.

Úspory vlivem snížení odporu vedení jsou zde výrazně menší, podle situace 5 až 15 % a nelze technicky ani ekonomicky přijatelným způsobem docílit úspor srovnatelných se zvýšením napětí $U_{\max 2}$ (byla by nutná montáž mnoha dalších lan do zesilovacího vedení). Přínos tohoto opatření se však samozřejmě projevuje ve všech provozních situacích, kdy rekuperační napětí nedosahuje hodnoty $U_{\max 2}$.

Ze všech výsledků příkladů uvedených v kapitole 4 vyplývá, že zrušením omezení $U_{\max 2}$ na současných 3 600 V by v případech, kdy by mohlo docházet ke zvýšení rekuperačního napětí nad tuto hranici, vedlo k nezanedbatelné úspoře trakční energie. Otázkou samozřejmě zůstává, jak často takové případy v běžném provozu nastávají (to by zřejmě vyžadovalo rozsáhlá měření), je však možno říci, že s poklesem hustoty dopravy význam zvýšení $U_{\max 2}$ výrazně narůstá.

Závěrem bych k celé problematice podotknul, že výjimku z normy ČSN EN 50 163 ed. 2 pro snížení hodnoty $U_{\max 2}$ si, kvůli provozu starších vozidel dimenzovaných na napětí 3 600 V ($U_n + 20 \%$), vyžádala pouze Česká republika, a nikoliv některé další železnice (např. Slovensko, Polsko), kde se vyskytují stejná vozidla jako na železnicích našich, a kde by se tudíž mohly očekávat stejné problémy. Ve jmenované evropské normě lze v Příloze „C“ zjistit, že další výjimku mají jen železnice belgické (resp. belgická vozidla), kde je ale $U_{\max 2}$ omezeno na 3 800 V. Jelikož z dosažených výsledků (například v tabulce 4.9) vyplývá, že i zvýšení U_{REK} jen o několik desítek voltů nad současnou hodnotu $U_{\max 2}$ může způsobit úsporu na okamžitém výkonu měníren v řádu stovek kilowattů, stálo by jistě za úvahu, zda by se omezení maximálního dovoleného napětí na našich železnicích nedalo alespoň zmírnit.

Seznam informačních zdrojů

Tištěné:

- [1] JANSÁ, F. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. 1. vyd. Praha, NADAS, 1980. 312 s. OD-31-047-80-05-94.
- [2] ČSN EN 50 163 ed. 2 *Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav*. Praha, ČNI, 2005. 20 s.
- [3] ČSN EN 50 388 *Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanice) a drážními vozidly pro dosažení interoperability*. Praha, ČNI, 2006. 44 s.
- [4] ČSN 34 1530 *Drážní zařízení – Elektrická trakční vedení železničních drah celostátních, regionálních a vlečků*. Praha, ČNI, 2010. 32 s.
- [5] Předpis ČD V7 *Trakční výpočty*. Praha, NADAS, 1982. 58 s.
- [6] *Česká železnice 2010/2011*. Praha, Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2011. 240 s.
- [7] *Ročenka dopravy České republiky 2010*. Praha, Ministerstvo dopravy České republiky. ISSN 1801-3090
- [8] SŽDC (ČSD) SR 34 (E) *Služobná rukoväť – Nastavovanie, prevádzka a údržba reléových ochrán trakčného napájacieho obvodu*. Praha, NADAS, 1979. 50 s.

Elektronické:

- [9] GFEGORA, S., NOVÁK, J. *Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce* [online]. [cit. 2011-20-11], Dostupné z: <www.cdmail.cz/vts/CLANKY/1704.pdf>.
- [10] KONEČNÝ, J., ŠPALEK, P. *Nová třísystemová lokomotiva řady 380*. Vědeckotechnický sborník ČD č. 26/2008 [online]. [cit. 2012-23-02]. Dostupné z: <http://www.cdmail.cz/vts/CLANKY/vts26/2601.pdf>
- [11] ŠIROKÝ, J. *Mechanika v dopravě I – kolejová vozidla*. Skripta Technické Univerzity Ostrava [online]. [cit. 2012-01-02]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr_MvD.pdf>.
- [12] BELÁČ, J. *Akumulace elektrické energie* [online]. [cit. 2011-28-12]. Dostupné z: <<http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/akumulace.pdf>>.
- [13] ŠIMAN, P. *Možnosti úspory trakční elektrické energie a motorové nafty závislé na železniční infrastruktuře* [online]. [cit. 2011-20-11]. Dostupné z: <<http://www.cdmail.cz/vts/CLANKY/vts22/2202.pdf>>.

- [14] POHL, J. Externí přednášky pro obor DI-EZD Dopravní fakulty Univerzity Pardubice v letním semestru 2012
- [15] Stránky firmy Maxwell Dostupné z:
<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/datasheet_bmod0063_1014696.pdf>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1.1</i>	<i>Výsledky příkladů 1.1 až 1.4</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 1.2</i>	<i>Výsledky příkladů 2.1 a 2.2</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 2.1</i>	<i>Parametry vodičů trakčního vedení (ČSN 34 1530 Příloha „B“).....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 2.2</i>	<i>Technické parametry moderních vozidel</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3.1</i>	<i>Dovolené hodnoty napětí v DC soustavě 3 kV podle ČSN EN 50 163 ed. 2</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4.1</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 1a</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 4.2</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 1b</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 4.3</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 1c.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 4.4</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 2a</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 4.5</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 2b</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 4.6</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 3</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 4.7</i>	<i>Tabulka energetických poměrů – Situace 4.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 4.8</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 5</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 4.9</i>	<i>Výkonové poměry – Situace 6</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 4.10</i>	<i>Tabulka energetických poměrů – Situace 7.....</i>	<i>65</i>

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Brzdová charakteristika lokomotivy Škoda 109 E [10].....	16
Obr. 1.2	Výkonová charakteristika elektrodynamické brzdy lokomotivy Škoda 109 E při brzdění do odporníků.....	17
Obr. 1.3	Závislost celkové brzdné síly F_{Bcelk} , brzdné síly vyvozené vlakovými brzdami F_B a trakčního odporu O_{TRAK} na rychlosti pro PŘ. 1.1.....	18
Obr. 1.4	Závislost brzdné síly a výkonu na rychlosti v poslední fázi brzdění (z rychlosti 18 km/h na 5 km/h).....	21
Obr. 2.1	Zjednodušené schéma trakční měřírny.....	31
Obr. 2.2	Principiální schéma napájení při použití spínací stanice.....	32
Obr. 2.3	Časový průběh zatížení měřírny (interval měření 5 minut).....	33
Obr. 2.4	Zatěžovací charakteristika měřírny.....	33
Obr. 2.5	Upravená zatěžovací charakteristika měřírny pro účely získání hodnoty jejího vnitřního odporu (vynechání hodnot napětí při nulovém proudu).....	35
Obr. 2.6	Náhradní schéma trakční měřírny.....	36
Obr. 2.7	Zjednodušené schéma části trakčního obvodu a moderního vozidla se střídačem na stejnosměrné napájecí soustavě.....	39
Obr. 2.8	Diagram ztrát při rekuperaci.....	41
Obr. 3.1	Jediný odběr.....	44
Obr. 3.2	Více odběrů.....	44
Obr. 3.3	Vozidlo Z1 odebírá proud, vozidlo Z2 ve výběhu.....	45
Obr. 3.4	Vozidlo Z1 odebírá proud, vozidlo Z2 rekuperuje.....	46
Obr. 3.5	Dělení proudu elektrodynamické brzdy.....	47
Obr. 4.1	Výchozí podmínky pro modelové situace v části 4.1.....	52
Obr. 4.2	Výchozí poměry při zkoumání energetických poměrů (Situace 4).....	56
Obr. 4.3	Příkon vozidla Z1 při odběru konstantního proudu (Situace 4).....	58
Obr. 4.4	Celkový příkon měření TM "A" + TM "B" (Situace 4).....	58
Obr. 4.5	Ztráty v trakčním vedení (Situace 4).....	59
Obr. 4.6	Ztráty na brzdovém odporníku rekuperujícího vozidla Z2 (Situace 4).....	59
Obr. 4.7	Výchozí podmínky pro modelové situace v části 4.2.....	61
Obr. 4.8	Výchozí poměry při zkoumání energetických poměrů (Situace 7).....	63
Obr. 4.9	Celkový příkon měření TM "A" + TM "B" (Situace 7).....	63
Obr. 4.10	Ztráty v trakčním vedení (Situace 7).....	64
Obr. 4.11	Ztráty na brzdovém odporníku rekuperujícího vozidla (Situace 7).....	64

Seznam zkratk

EDB	elektrodynamická brzda
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
TM	trakční měnírna
TSI	Technické specifikace pro interoperabilitu
TV	trakční vedení
ZV	zesilovací vedení

Seznam příloh

1 CD-ROM