

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Měření účinnosti drážních vozidel elektrické trakce**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Robin VAIDIŠ**  
Osobní číslo: **E15N0078P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Měření účinnosti drážních vozidel elektrické trakce**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Proveďte teoretický rozbor drážního vozidla z hlediska účinnosti.
2. Identifikujte hlavní vozidlové celky z hlediska možných ztrát.
3. Stanovte režim měření.
4. Změřte účinnost na vozidle.
5. Vyhodnoťte výsledky a proveďte srovnání s jinými typy vozidel.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Škubal, Ph.D.**  
ŠKODA Transportation, Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na zjištění účinnosti lokomotivy. Nejprve jsou v práci popsány hlavní elektrické celky lokomotiv z hlediska elektrických ztrát. Dále je v práci popsáno měření trakčních charakteristik lokomotivy a z naměřených hodnot jsou vypočítané elektrické ztráty a účinnost lokomotivy.

## **Klíčová slova**

Účinnost, lokomotiva, elektrické ztráty, trakční charakteristiky, charakteristiky EDB

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the locomotive efficiency. First, the main electrical parts of the locomotive are described in terms of electrical losses. Next, the traction characteristics measurement of the locomotive is described and finally the electric losses and locomotive efficiency are calculated from the measured values.

## **Key words**

Efficiency, locomotive, electrical losses, traction characteristics, EDB characteristics

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Robin Vaidiš

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Škubalovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Jiřímu Ceplechovi za podklady a rady týkající se měření a v neposlední řadě bych rád poděkoval celému měřicímu týmu, za ochotu a rady v průběhu měření.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ÚVOD DO ELEKTRICKÉ TRAKCE.....</b>	<b>13</b>
<b>2 ELEKTRICKÉ ZTRÁTY NA TRAKČNÍCH VOZIDLECH.....</b>	<b>23</b>
2.1 ZTRÁTY V TRANSFORMÁTORU.....	23
2.1.1 Měření transformátoru naprázdno.....	23
2.1.2 Měření transformátoru nakrátko.....	24
2.1.3 Transformátory použité na vozidlech trakce.....	25
2.2 ZTRÁTY VE VÝKONOVÝCH POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTKÁCH.....	26
2.2.1 Ztráty způsobené propustným proudem.....	26
2.2.2 Spínací ztráty.....	28
2.2.3 Ostatní ztráty výkonových polovodičových součástek.....	28
2.2.4 Ztráty v diodovém usměrňovači.....	29
2.2.5 Ztráty v třífázovém napětovém střídači.....	29
2.3 TRAKČNÍ MOTOR.....	31
2.3.1 Ztráty ve stejnosměrném motoru.....	31
2.3.2 Ztráty v asynchronním motoru.....	32
2.4 POMOCNÉ POHONY.....	35
2.4.1 Ventilátory.....	36
2.4.2 Kompresory.....	37
2.5 ZTRÁTY ZPŮSOBENÉ REGULACÍ.....	38
2.5.1 Odporová regulace stejnosměrných sériových motorů.....	38
2.5.2 Pulzní regulace.....	38
2.5.3 Regulace asynchronních motorů pomocí napětových střídačů.....	39
<b>3 MĚŘENÍ NA VOZIDLE.....</b>	<b>39</b>
3.1 METODA MĚŘENÍ.....	39
3.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	42
3.2.1 Měření napětí.....	42
3.2.2 Měření proudu.....	43
3.2.3 Měření tažné síly na háku.....	44
3.2.4 Měřicí karta.....	45
3.3 CHYBA MĚŘENÍ.....	45
3.3.1 Vzorkování.....	45
3.3.2 Kvantování.....	47
3.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VÝPOČET ÚČINNOSTI.....	47
3.4.1 Naměřené hodnoty při 100 % tahu.....	50
3.4.2 Naměřené hodnoty při 80 % tahu.....	51
3.4.3 Naměřené hodnoty při 60 % tahu.....	52
3.4.4 Naměřené hodnoty při 40 % tahu.....	53
3.4.5 Naměřené hodnoty při 20 % tahu.....	54
3.4.6 Naměřené hodnoty při 100 % EDB.....	55
3.4.7 Naměřené hodnoty při 80 % EDB.....	56
3.4.8 Naměřené hodnoty při 60 % EDB.....	57
3.4.9 Naměřené hodnoty při 40 % EDB.....	58
3.4.10 Naměřené hodnoty při 20 % EDB.....	59
3.4.11 Celkové shrnutí naměřených a vypočítaných hodnot.....	60
<b>4 ÚČINNOSTI DRÁŽNÍCH VOZIDEL.....</b>	<b>63</b>



4.1	LOKOMOTIVA 51EM .....	63
4.2	LOKOMOTIVA 56E .....	64
4.3	LOKOMOTIVA 70E .....	65
4.4	LOKOMOTIVA 109E1 .....	65
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>68</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>		<b>70</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>		<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratk

DB	.....Německé dráhy (Deutsche Bahn)
ČD	.....České dráhy
Si	.....křemík
$\Delta P_J$	.....Jouleovy ztráty (W)
$\Delta P_{Fe}$	.....ztráty v magnetickém obvodu (W)
$\Delta P_d$	.....přídavné ztráty (W)
$\Delta P_{FeV}$	.....ztráty vířivými proudy (W)
$\Delta P_{FeH}$	.....ztráty hysterezní (W)
$\Delta P_0$	.....ztráty naprázdno (W)
$\Delta P_k$	.....ztráty nakrátko (W)
$I_0$	.....proud naprázdno (A)
$I_k$	.....proud nakrátko (A)
f	.....frekvence (Hz)
T	.....perioda (rad)
$p_v$	.....výkon na polovodičové součástce (W)
$u_v$	.....napětí na polovodičové součástce (V)
$i_v$	.....proud polovodičovou součástkou (A)
$R_v$	.....náhradní odpor polovodičové součástky ( $\Omega$ )
$U_{T0}$	.....prahové napětí polovodičové součástky (V)
$\Delta U_v$	.....rozdíl napětí na polovodičové součástce (V)
$\Delta I_v$	.....rozdíl proudu v polovodičové součástce (A)
$p_{con}$	.....vodivostní ztráty polovodičové součástky (W)
$P_{con}$	.....střední hodnota vodivostních ztrát polovodičové součástky (W)
$E_{on}$	.....ztrátová energie při sepnutí součástky (W)
$E_{off}$	.....ztrátová energie při vypnutí součástky (W)
$P_{on(AV)}$	.....střední spínací ztrátový výkon (W)
$P_{off(AV)}$	.....střední vypínací ztrátový výkon (W)
$V_{cc}$	.....napájecí napětí (V)
$V_{GE}$	.....napětí gate-emitor (V)
$R_G$	.....odpor řídicí elektrody ( $\Omega$ )
$L_\sigma$	.....rozptylová indukčnost (H)
$I_C$	.....kolektorový proudy (A)
$T_{vj}$	.....teplota součástky ( $^{\circ}C$ )
$P_T$	.....ztrátový výkon součástky (W)

$I_{FAV}$	.....střední hodnota propustného proudu (A)
$P_{tot}$	.....celkové ztráty napěťového střídače (W)
$P_{con(IGBT)}$	.....ztráty propustným proudem tranzistor (W)
$P_{con(D)}$	.....ztráty propustným proudem diody (W)
$P_{sw}$	.....spínací ztráty (W)
$P_{rec}$	.....zotavovací ztráty diod (W)
$I_L$	.....proud zátěže (A)
$I_{RRM}$	.....opakovatelný závěrný proud diody (Repetitive Reverse Current) (A)
SW	.....spínací součástka
$I_D$	.....proud diodou (A)
$t_A, t_b, t_R,$	.....časové úseky (s)
$\Delta P_a$	.....ztráty ve vinutí kotvy (W)
$\Delta P_b$	.....ztráty v budícím vinutí (W)
$\Delta P_{mech}$	.....ztráty mechanické (W)
B	.....magnetická indukce (T)
V	.....objem kotvy ( $m^3$ )
p	.....počet pólů (-)
n	.....otáčky rotoru (ot/min)
M	.....moment na hřídeli motoru (Nm)
$\eta$	.....účinnost (-; %)
THD	.....zkreslení sinusového signálu (Total harmonic distortion) (%)
v	.....rychlost (m/s; km/h)
EDB	.....elektrodynamická brzda (ElectroDynamic break)
4Q	.....čtyř kvadrantový měnič
k	.....koeficient tenzometru (-)
$f_{vzor}$	.....vzorkovací frekvence (Hz)
$f_{sig}$	.....frekvence signálu (Hz)
A/D	.....analog/digital
$F_t$	.....tažná síla lokomotivy
$P_p$	.....příkon (W)
$P_t$	.....trakční výkon (W)
$\Delta P$	.....ztráty lokomotivy (W)
$P_b$	.....brzdový výkon (W)
$P_R$	.....rekuperovaný výkon (W)

## Úvod

Problematikou účinnosti zařízení se zabývají již konstruktéři při návrhu zařízení. Hledají kompromis mezi splněním požadavků zadání, technickými možnostmi a dnes především cenou zařízení. Snaha je o to, aby zařízení bylo co nejefektivnější a nejekonomičtější. U lokomotiv toto platí o to více, protože se jedná o složité a drahé zařízení, které spotřebovává velké množství elektrické energie. Z tohoto důvodu by měl provozovatel lokomotiv požadovat po výrobcích co možná nejvyšší dosažitelné hodnoty účinnosti v závislosti na přijatelných výrobních nákladech.

Hlavním cílem této práce je zjistit účinnost lokomotivy 109E3, kterou vyrábí Škoda Transportation pro DB. Ke spočtení účinnosti jsou využity hodnoty, které byly získány v průběhu orientačního měření trakčních charakteristik této lokomotivy.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. První kapitola je úvod do elektrické trakce. V této kapitole je stručně popsán vývoj lokomotiv do současné doby a jsou zde zmíněny hlavní elektrické celky jednotlivých drážních vozidel. Druhá kapitola popisuje hlavní elektrické celky drážních vozidel z hlediska elektrických ztrát. Třetí kapitola je zaměřená na měření a zjištění účinnosti z měření. Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny účinnosti dalších lokomotiv.

# 1 Úvod do elektrické trakce

První elektrifikace trakčních vozidel se v Česku nejprve dotkla tramvajových vozidel. Jednalo se o Křižíkovu elektrickou dráhu na Letné. Vybudována byla v roce 1891, napájecí napětí bylo 250 V. První elektrifikovaná železniční trať byla v roce 1903 trať Tábor-Bechyně. Trať byla elektrifikována stejnosměrným systémem 1 500 V.

Hromadná elektrifikace Českých železničních tratí začala v 50. letech 20. století. Jako napájecí systém se využil stejnosměrný systém 3 kV. Pro pohon trakčních vozidel na tomto systému se zprvu využívaly stejnosměrné sériové motory s odporovou regulací. Jako příklad lze uvést lokomotivu ČD 140 (tovární označení Škoda 12E), na *obr. 1.2* jsou uvedeny trakční charakteristiky a na *obr. 1.1* je schéma této lokomotivy. Řízení rychlosti stejnosměrných sériových motorů na stejnosměrné síti je prováděno změnou řazení motorů, změnou odporu v obvodu kotvy a odbuzováním. Při rozjezdu jsou všechny čtyři motory řazeny do série a rozjezdové odporníky jsou zapojeny na maximální hodnotu. Během rozjezdu se rozjezdové odporníky postupně vyřazují, po úplném vyřazení lokomotiva dosáhne 1. hospodárného stupně. Poté se motory přepojí do paralelní skupiny po dvou a rozjezdové odporníky najedou na původní hodnotu. Rozjezdové odporníky se opět vyřazují, po jejich úplném vyřazení dosáhne lokomotiva 2. hospodárného stupně. Pro další zvyšování rychlosti se motory odbuzují.

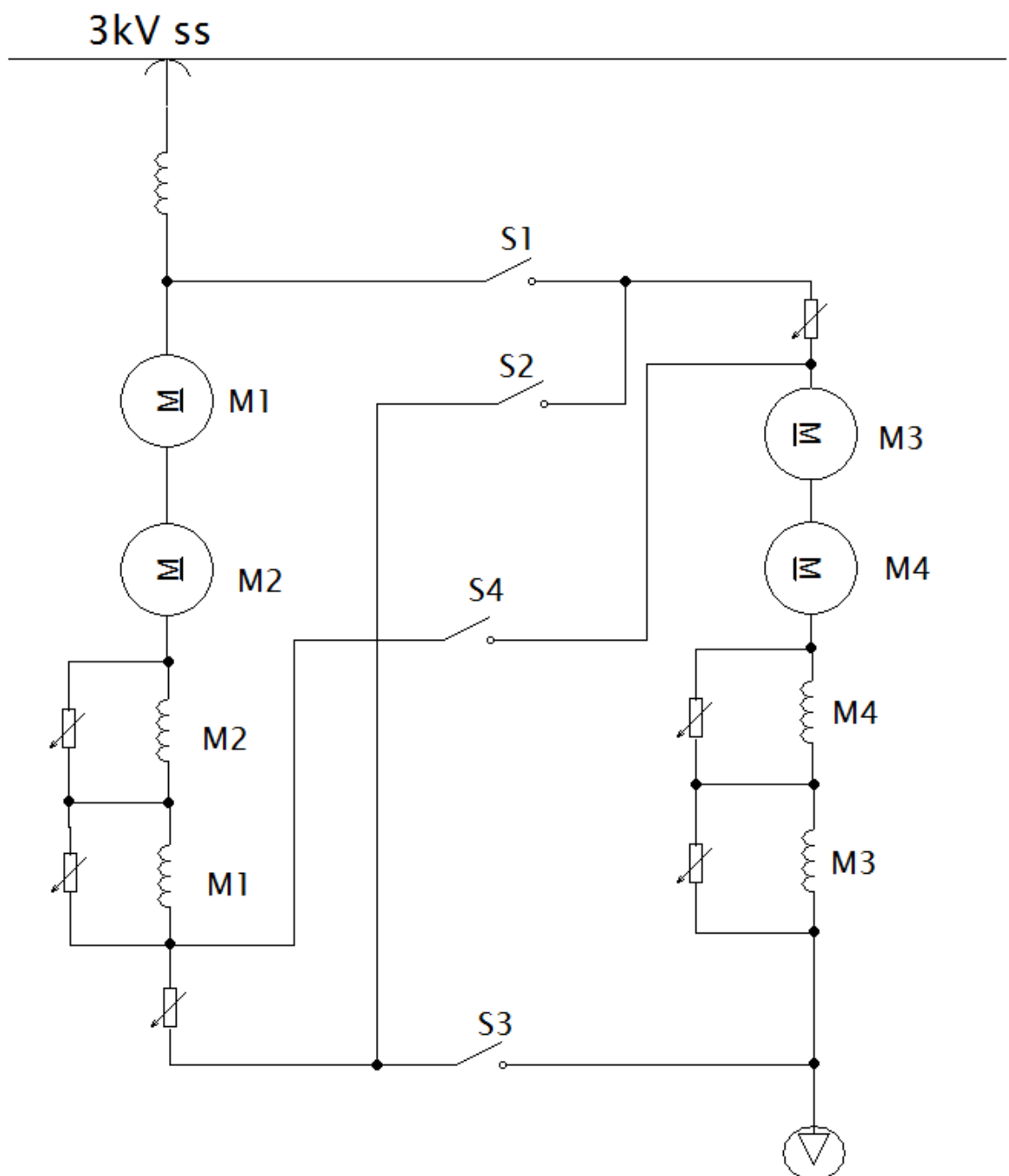
První železniční trať elektrifikována střídavým systémem 25 kV 50 Hz byla trať z Plzně do Blovic v roce 1962. Tento systém umožnil řídit stejnosměrné sériové motory přepínáním odboček trakčního transformátoru. Představitelem tohoto typu vozidel je lokomotiva řady ČD 240 (tovární označení Škoda 47E), trakční obvody jsou na *obr. 1.3*, a na *obr. 1.4* jsou zobrazeny trakční charakteristiky. U těchto lokomotiv se využívá přepínání odboček na straně vyššího napětí z důvodu přepínání menších proudů, než na straně napětí nižšího. K usměrnění se využívá dvou diodových můstkových usměrňovačů. Motory jsou zapojeny po dvou na jeden usměrňovač v paralelním zapojení. Opět pro další zvyšování rychlosti se motoru odbuzují.

S vývojem výkonové elektroniky a to zejména tyristorů, se začalo využívat stejnosměrných cize buzených motorů s pulzní regulací. Hlavním představitelem této skupiny vozidel je lokomotiva řady ČD 363 (tovární označení Škoda 69E), schéma trakčních obvodů je na *obr. 1.5* a trakční charakteristiky na *obr. 1.6*. Na střídavé soustavě lokomotiva využívala

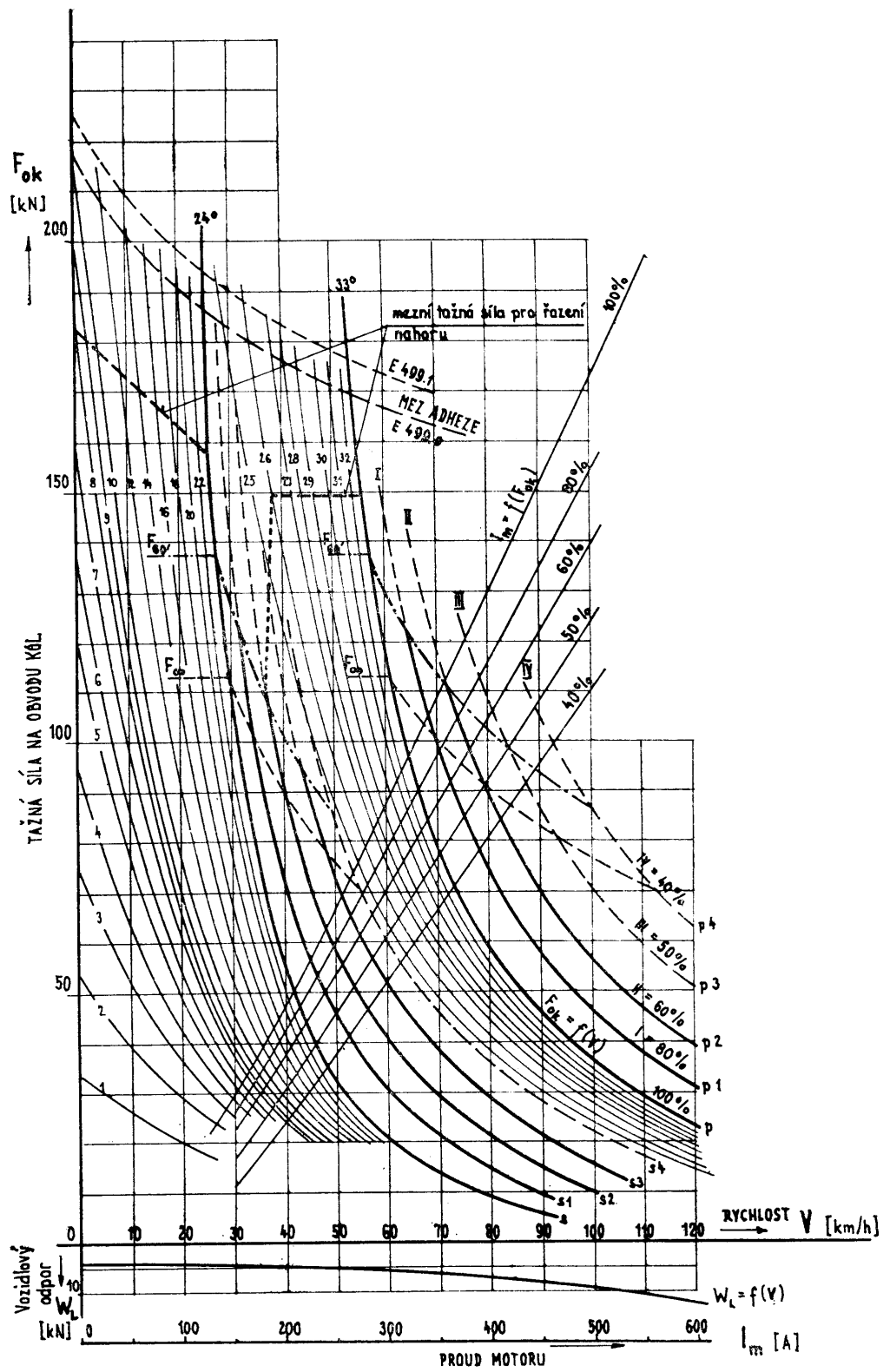
transformátoru a diodových usměrňovačů, na stejnosměrné soustavě je trakční napětí připojeno na stejnosměrný obvod. Pomocí pulzního měniče se reguluje velikost napětí na kotvě motoru. Motory jsou zapojeny do série po dvou. Po dosažení maximálního napětí na kotvě motorů se motory začnou odbuzovat.

Dnešním trendem je použití asynchronních motorů a napěťových střídačů na lokomotivách. Představitelem tohoto typu vozidel je lokomotiva řady ČD 380 (tovární označení Škoda 109E1). Na *obr. 1.7* je schéma lokomotivy a na *obr. 1.8* jsou trakční charakteristiky. Jedná se o tří systémovou lokomotivu. Pro usměrnění střídavého proudu za transformátorem se používá pulzní usměrňovač, který je schopen odebírat proud z troleje ve fázi s trolejovým napětím. Za pulzním usměrňovačem je stejnosměrný meziobvod, do kterého je i zapojeno napájení ze stejnosměrného systému. Dále je napěťový střídač, který vytvoří požadované střídavé napětí pro asynchronní motor.

Současný výzkum v oblasti trakčních vozidel je převážně závislý na vývoji nových polovodičových součástek s lepšími vlastnostmi. Například polovodičovým součástkám typu SiC (silicon carbide) se předpovídá velké využití, zejména díky vyšším hodnotám závěrného napětí a větší tepelné odolnosti. Dále se uvažuje o využívání středofrekvenčního transformátoru na vozidlech. Jednalo by se o transformátor na vysoké frekvence, což znamená, že by se značně snížily jeho rozměry. Dále firma Škoda Transportation nasadila do tramvaji Škoda FORCITY ALFA synchronní motory s permanentními magnety, které jsou oproti motorům asynchronním menší při stejném výkonu.

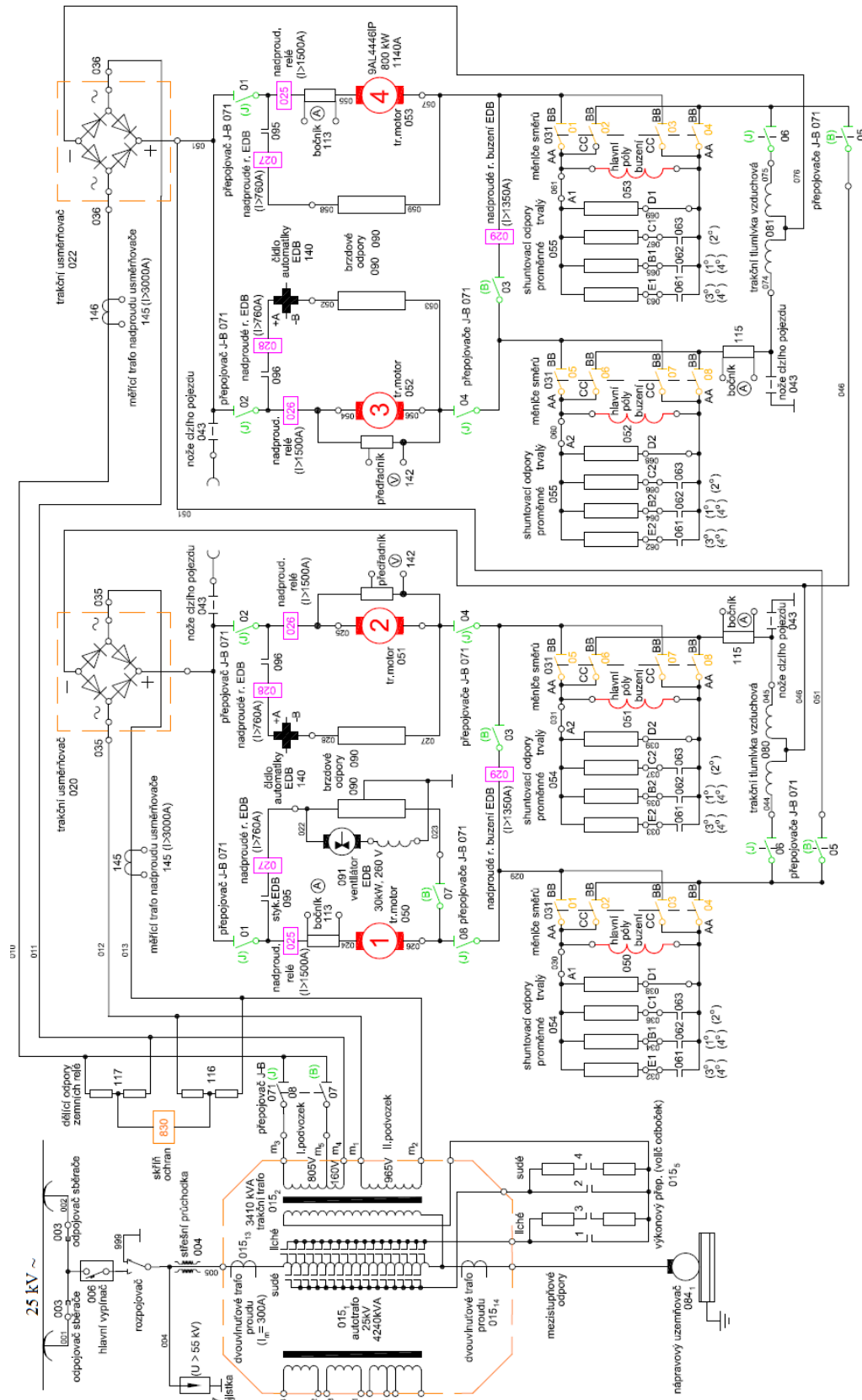


Obr. 1.1 Schéma lokomotivy ČD 140

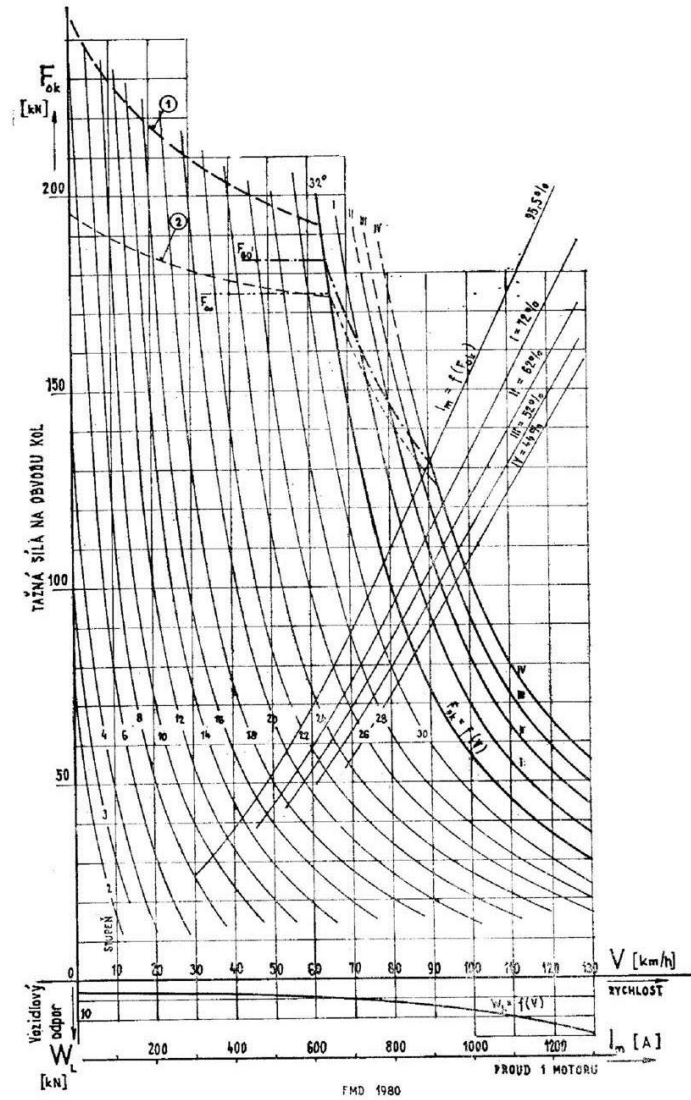


Obr. 1.2 Trakční charakteristiky lokomotivy ČD 140

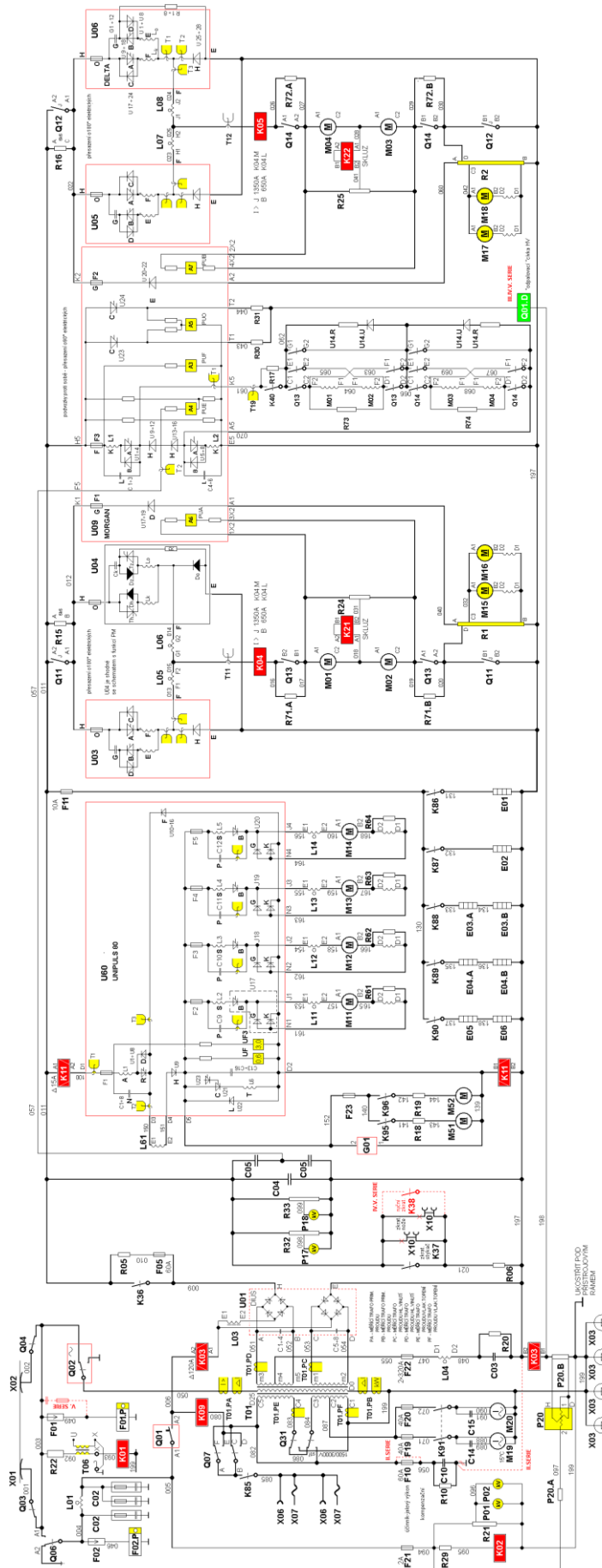




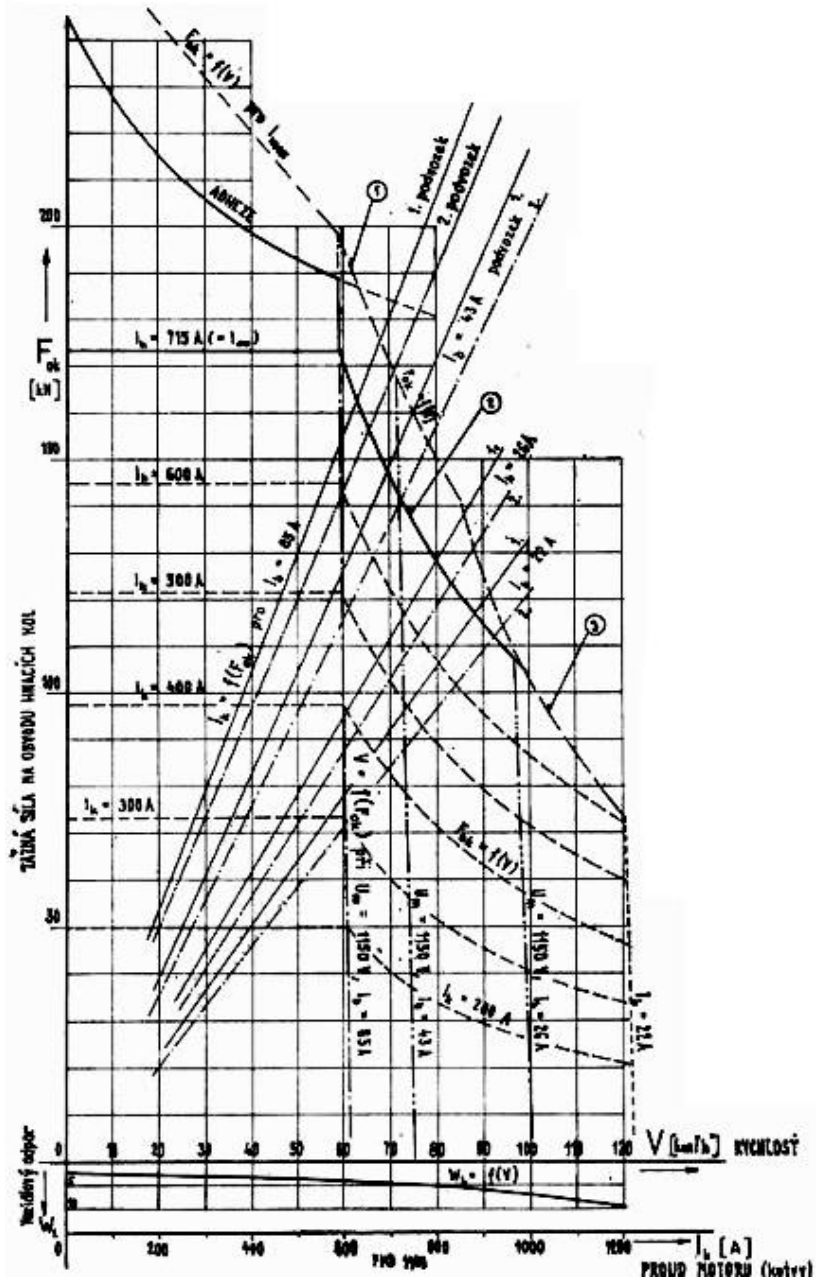
Obr. 1.3 Schéma hlavních obvodů lokomotivy ČD 240 [15]



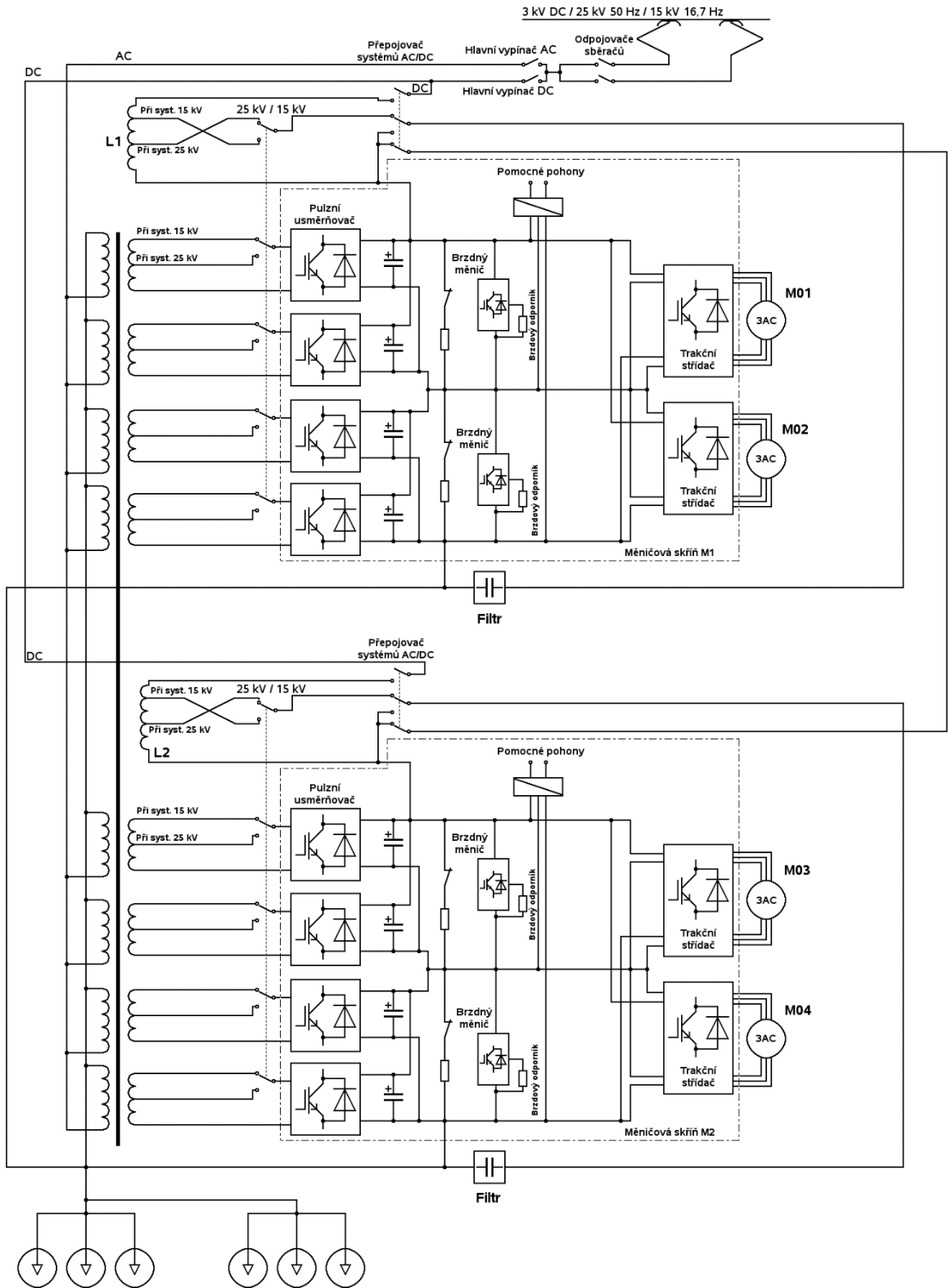
Obr. 1.4 Trakční charakteristiky lokomotivy ČD 240



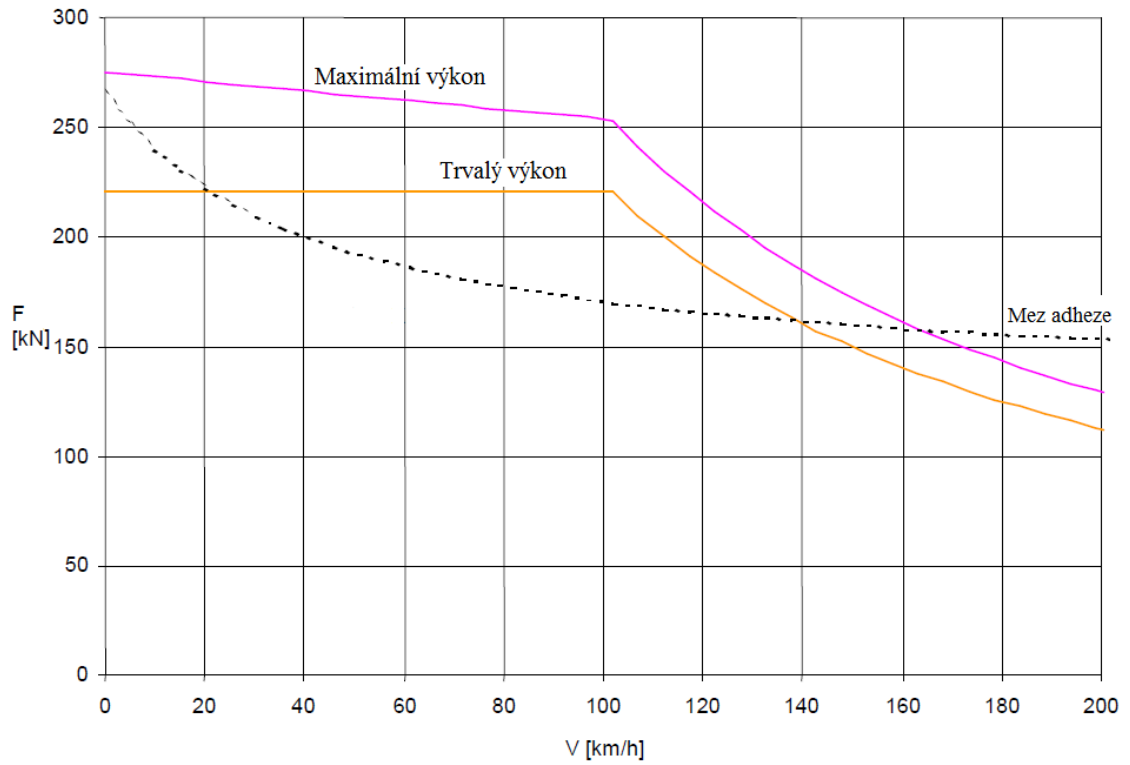
Obr. 1.5 Schéma hlavních obvodů lokomotivy ČD 363 [15]



Obr. 1.6 Trakční charakteristiky lokomotivy ČD 363



Obr. 1.7 Schéma hlavních obvodů lokomotivy ČD 380 [13]



Obr. 1.8 Trakční charakteristiky lokomotivy ČD 380 [13]

## 2 Elektrické ztráty na trakčních vozidlech

### 2.1 Ztráty v transformátoru

Ztráty v transformátoru můžeme rozdělit do několika základních skupin: ztráty v elektrickém obvodu (ztráty v mědi), ztráty v magnetickém obvodu (ztráty v železe) a ztráty přídatné  $\Delta P_d$ . Ztráty v elektrickém obvodu, nebo také ztráty Jouleovy  $\Delta P_j$ , jsou úměrné odporu jednotlivých vinutí a kvadrátu protékajícího proudu. Ztráty v magnetickém obvodu dále rozdělujeme na ztráty vířivými proudy  $\Delta P_{FeV}$  a ztráty hysterezní  $\Delta P_{FeH}$ .

Všechny tyto ztráty se snaží výrobci minimalizovat, aby zvýšili účinnost transformátoru. Jouleovy ztráty lze zmenšit použitím vodičů s menším odporem, ztráty vířivými proudy lze snížit zvětšením odporu magnetického obvodu např. legováním Si a složením magnetického obvodu z izolovaných plechů, ztráty hysterezní, které jsou úměrné ploše magnetizační křivky, lze redukovat použitím vhodného materiálu. Abychom mohli určit ztráty transformátoru, provádí se měření naprázdno a měření nakrátko.

#### 2.1.1 Měření transformátoru naprázdno

Při měření naprázdno je sekundární strana transformátoru rozpojená, tzn. naprázdno. V průběhu měření napájíme transformátor střídavým napětím o různé velikosti až od 1,2 násobku jmenovitého napětí. Ve stavu naprázdno veškerý příkon transformátoru je využit na krytí ztrát naprázdno, které se skládají ze ztrát v magnetickém obvodu  $\Delta P_{Fe}$  a ztrát ve vinutí  $\Delta P_{j0}$ . Platí tedy rovnice:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} \text{ [W]}. \quad (2.1)$$

Jouleovy ztráty lze vypočítat:

$$\Delta P_{j0} = R_1 \cdot I_0^2 \text{ [W; } \Omega, \text{ A]}, \quad (2.2)$$

kde  $R_1$  je odpor primárního vinutí a  $I_0$  je magnetizační proud. Magnetizační proud je řádově několik procent jmenovitého proudu, a proto jsou Jouleovy ztráty při chodu naprázdno malé.

Větší podíl ztrát při měření naprázdno mají ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \text{ [W]}. \quad (2.3)$$

Pro ztráty vířivými proudy platí úměra:

$$\Delta P_{FeV} \approx U^2, f^2. \quad (2.4)$$

Ztráty hysterezní jsou úměrné ploše hysterezní smyčky magnetického materiálu a platí úměra:

$$\Delta P_{FeH} \approx U^2, f. \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Měření transformátoru nakrátko

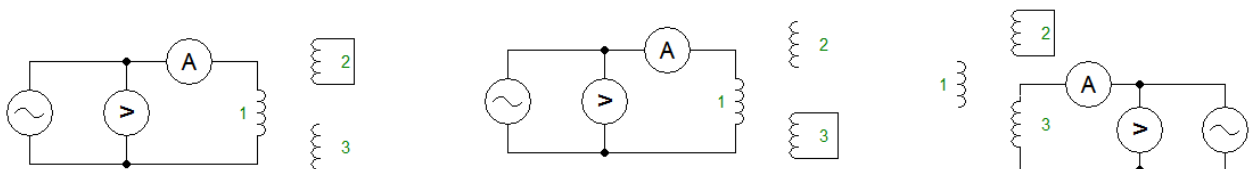
Při měření nakrátko je sekundární strana transformátoru (strana nižšího napětí) spojena dokrátko pomocí bezdoporových spojek. Na primární straně nastavíme takové napětí, aby oběma vinutími protékal jmenovitý proud. Tomuto napětí říkáme napětí nakrátko. Poté napětí postupně snižujeme a odečítáme hodnoty proudů. Na *obr 2.1* je znázorněno měření trojvinutového transformátoru. V průběhu tohoto měření není železo transformátoru nasyceno, což znamená, že při tomto měření nedochází ke ztrátám magnetizačním. Ztráty nakrátko můžeme vyjádřit rovnicí:

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \text{ [W]}. \quad (2.6)$$

Jouleovy ztráty nakrátko můžeme vypočítat z naměřených veličin pomocí vzorce:

$$\Delta P_{jk} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \text{ [W]}. \quad (2.7)$$

Po odečtení Jouleových ztrát nakrátko od naměřených celkových ztrát nakrátko dostaneme ztráty přídatné  $\Delta P_d$ . Tyto ztráty jsou závislé na napájecím kmitočtu. [4]



Obr. 2.1 Měření trojvinutového transformátoru nakrátko [4]



### 2.1.3 Transformátory použité na vozidlech trakce

S příchodem střídavé trakční soustavy se stal transformátor součástí elektrické výbroje trakčních vozidel. Trakční transformátory jsou jednofázové, musí být schopné zvládnout kolísání vstupního napětí, mají více sekundárních vinutí (napájení pomocných pohonů apod.) a kvůli nárokům na velikost a hmotnost mají nižší účinnost, než běžné transformátory. V průběhu let se používaly různé typy transformátorů, které se volily podle použitého typu trakčního motoru a jeho typu regulace.

Pro vozidla se stejnosměrnými sériovými motory se používaly transformátory, které umožňovaly změnu výstupního napětí. Při použití těchto transformátorů je regulace stejnosměrných sériových motorů bezeztrátová (oproti regulaci odporové). Dále transformátor na vozidle umožňuje optimální volbu jmenovitého napětí trakčních motorů, tzn. lze snížit velikost a hmotnost trakčních motorů. Velikost výstupního napětí lze měnit odbočkami na straně nízkého napětí, nebo autotransformátorem na straně vysokého napětí (např. lokomotivy řady ČD 242).

U vozidel se stejnosměrnými cize buzenými motory je užito plynulé regulace. Regulaci zajišťují řízené usměrňovače, nebo pulzní měniče. Proto oproti vozidlům se stejnosměrnými sériovými motory jsou použity transformátory bez přepínání odboček. To znamená, že transformátory jsou jednodušší. Obvykle je na vozech toho typu použit trakční transformátor s více sekundárními vinutími (např. více systémová lokomotiva řady ČD 363).

Dnes se na trakčních vozidlech používají převážně asynchronní motory. Pro usměrnění střídavého proudu se využívají pulzní usměrňovače. Tyto usměrňovače jsou napájené z transformátoru, který má úmyslně vyšší rozptylovou reaktanci, aby se omezily harmonické proudy v napájecí síti (např. vícesystémová lokomotiva řady ČD 380).

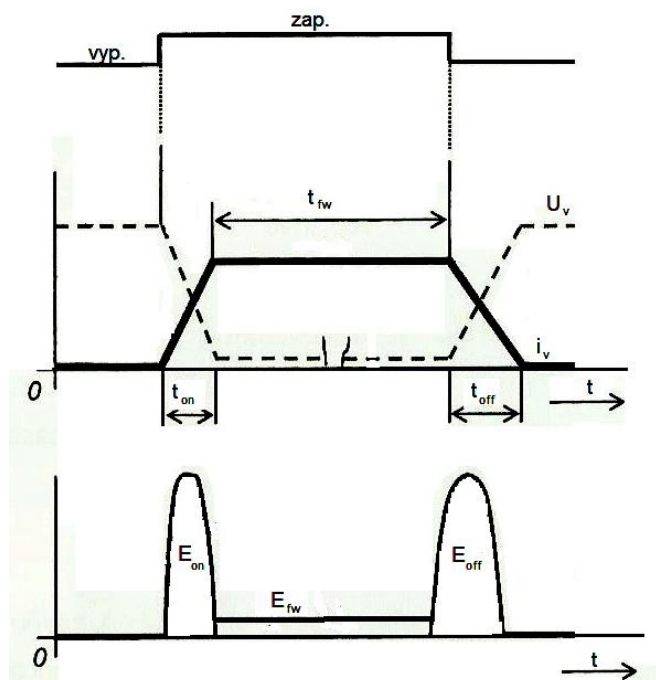
U vícesystémových vozidel, která jezdí na více střídavých napájecích systémech o různých frekvencích, je potřeba přepínat vinutí transformátoru (např. lokomotiva řady ČD 380). V těchto případech je pro transformátor rozhodující poměr napětí a frekvence. Obecně platí, čím nižší frekvence, tím větší magnetický obvod musí být. O využití opačného efektu (vyšší frekvence, menší transformátor) se v dnešní době usiluje v řadě studií o lokomotivách se středofrekvenčním transformátorem.

## 2.2 Ztráty ve výkonových polovodičových součástkách

Pokud chceme jednoduše určit ztrátový výkon na polovodičové součástce, můžeme použít vztah:

$$p_v = u_v \cdot i_v \text{ [W; V, A]}, \quad (2.8)$$

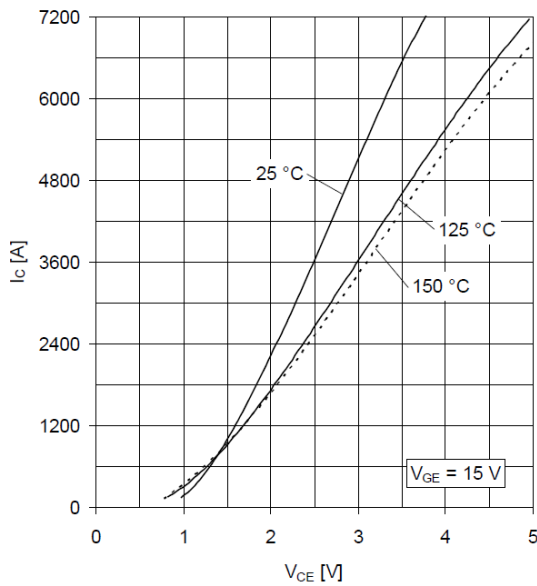
kde  $u_v$  je napětí na součástce v sepnutém stavu a  $i_v$  je proud procházející součástkou v sepnutém stavu. Pro detailnější zjištění ztrát v polovodičových součástkách je zapotřebí tyto ztráty rozdělit podle způsobu vzniku na ztráty způsobené propustným proudem a ztráty spínací. Průběh ztrát je na *obr. 2.2.* [6]



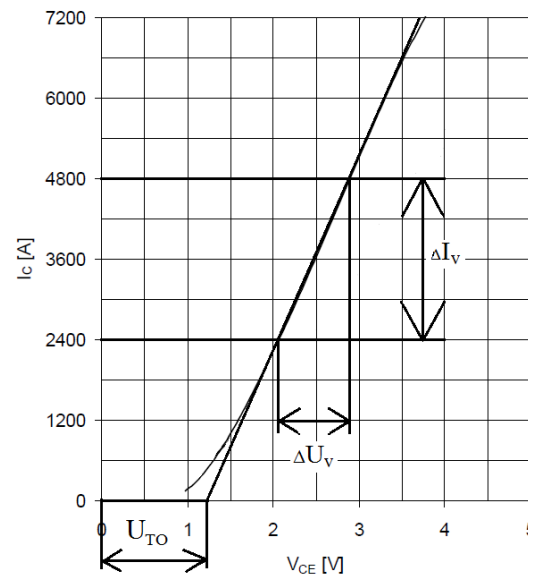
Obr. 2.2 Ztráty v polovodičové součástce [6]

### 2.2.1 Ztráty způsobené propustným proudem

Jak název napovídá, tyto ztráty jsou způsobeny průchodem proudu polovodičovou součástkou, která má i v sepnutém stavu svůj odpor. Chceme-li zjistit odpor součástky v sepnutém stavu, je zapotřebí mít k dispozici charakteristiku součástky v sepnutém stavu (obvykle výrobce uvádí). Na *obr. 2.3* je uvedena charakteristika součástky IGBT 5SNA 3600E170300 od firmy ABB. Pro výpočet je zapotřebí charakteristiku aproximovat pomocí dvou přímek. Linearizace je zobrazena na *obr. 2.4*.



Obr. 2.3 Charakteristika IGBT v sepnutém stavu [9]



Obr. 2.4 Linearizace charakteristiky IGBT v sepnutém stavu

Po aproximaci dostaneme dvě základní hodnoty: prahové napětí  $U_{TO}$  a hodnotu  $R_V$ , kterou lze spočítat:

$$R_V = \frac{\Delta U_V}{\Delta I_V} [\Omega; V, A]. \quad (2.9)$$

Ze získaných hodnot lze vypočítat vodivostní ztráty na polovodičové součástce podle vzorce:

$$p_{con} = i_V \cdot U_{TO} + R_V \cdot I_V^2 [W; A, V, \Omega]. \quad (2.10)$$

Tímto vztahem získáme okamžitou hodnotu vodivostních ztrát. Chceme-li vypočítat střední hodnotu, lze použít vzorec:

$$P_{con(AV)} = I_{V(AV)} \cdot U_{TO} + R_V \cdot I_{Vef}^2 [W; A, V, \Omega], \quad (2.11)$$

$I_{V(AV)}$  je střední hodnota proudu a  $I_{Vef}$  je efektivní hodnota proudu procházejícího součástkou. [6]

## 2.2.2 Spínací ztráty

Spínací ztráty vznikají, když během zapínání nebo vypínání je na součástce napětí a součástkou prochází proud. energii, která se ztratí při spínání součástky, lze vypočítat ze vztahů:

$$E_{\text{on}} = \int_0^{t_{\text{on}}} i_v \cdot u_v dt \text{ [J; A, V]}, \quad (2.12)$$

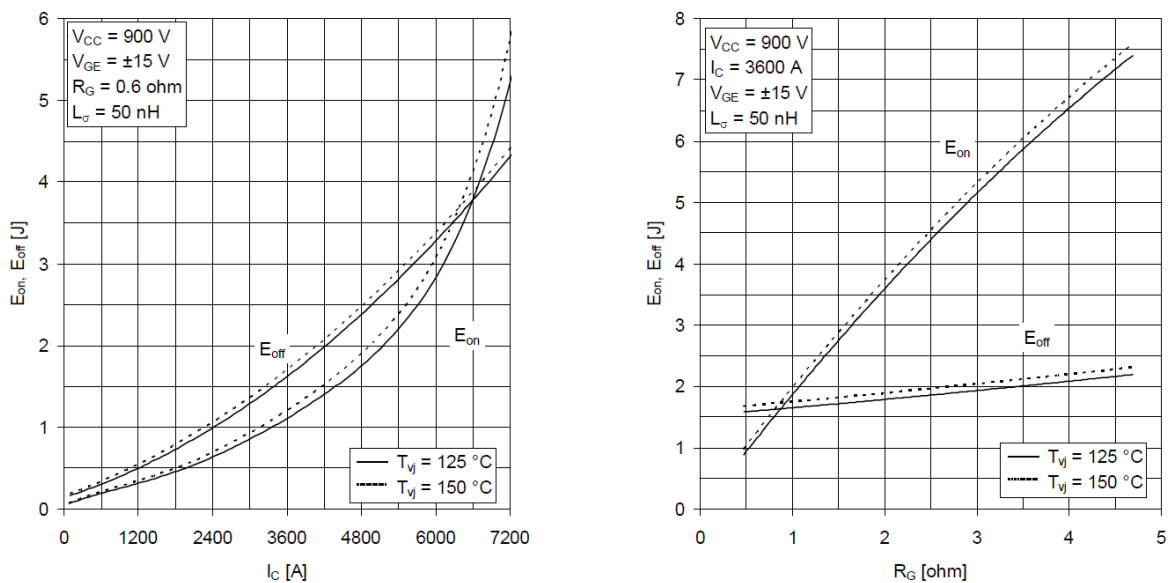
$$E_{\text{off}} = \int_0^{t_{\text{off}}} i_v \cdot u_v dt \text{ [J; A, V]}. \quad (2.13)$$

Ze ztrátové energie poté můžeme vypočítat střední ztrátový výkon:

$$P_{\text{on(AV)}} = \frac{1}{T} \cdot E_{\text{on}} = f \cdot E_{\text{on}} \text{ [W; s, Hz, J]}, \quad (2.14)$$

$$P_{\text{off(AV)}} = \frac{1}{T} \cdot E_{\text{off}} = f \cdot E_{\text{off}} \text{ [W; s, Hz, J]}, \quad (2.15)$$

kde  $f$  je frekvence spínání součástky a platí tedy  $f = \frac{1}{T}$ . Spínací ztráty uváděné výrobcem v katalogu jsou na *obr. 2.5*. [6]



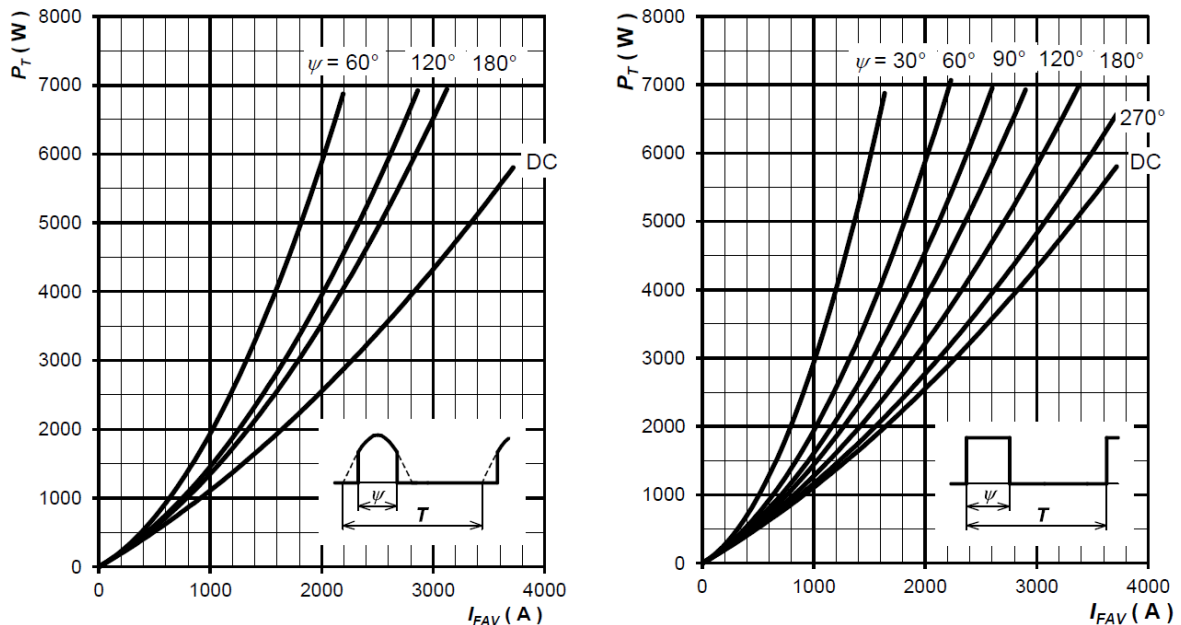
Obr. 2.5 Spínací ztráty IGBT uváděné v katalogu pro součástku 5SNA 3600E170300 od firmy ABB [9]

## 2.2.3 Ostatní ztráty výkonových polovodičových součástek

Do této kategorie spadají ztráty způsobené blokovacím proudem, závěrným proudem a řídicím proudem. Tyto ztráty tvoří dohromady jednotky procent celkových ztrát, a proto jsou většinou zanedbávány.

## 2.2.4 Ztráty v diodovém usměrňovači

Diodový usměrňovač pracuje na frekvenci napájecí sítě, tzn. pro trakci 50 Hz nebo 16,7 Hz. Z toho plyne, že spínací kmitočty diodového usměrňovače jsou malé. Z tohoto důvodu jsou zde spínací ztráty podstatně menší, a proto jsou u těchto usměrňovačů nejpodstatnější ztráty propustným proudem, které jsou uváděny výrobcí. Jak je vidět na *obr. 2.6*, výrobci uvádějí ztráty propustným proudem závislé na procházejícím proudu a na šířce proudového pulzu  $\psi$ .



*Obr. 2.6 Ztráty propustným proudem na diodě 5SDD 31K6000 od firmy ABB, vlevo závislost propustných ztrát na proudu sinusového průběhu 50 Hz, vpravo závislost propustných ztrát na proudu obdélníkového průběhu [11]*

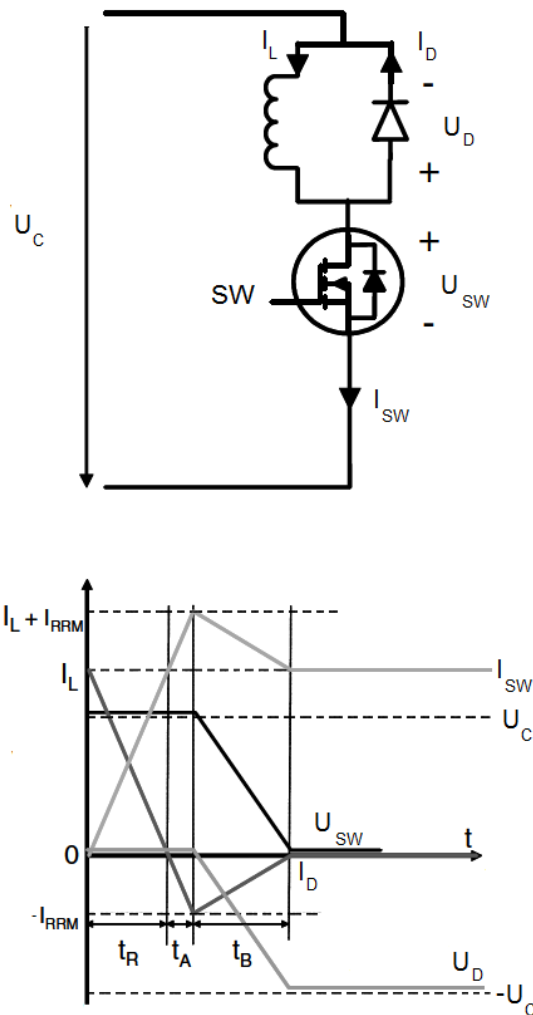
## 2.2.5 Ztráty v třífázovém napěťovém střídači

Napěťový střídač pracuje s vyšší spínací frekvencí než usměrňovač a proto zde zanedbávat spínací ztráty nelze. V závislosti na spínací frekvenci tvoří spínací ztráty až polovinu ztrát celkových. Celkové ztráty napěťového střídače se skládají ze čtyř částí: ztráty propustným proudem tranzistoru a diody ( $P_{\text{con(IGBT)}}$ ,  $P_{\text{con(D)}}$ ), spínací ztráty ( $P_{\text{sw}}$ ) a zotavovací ztráty diod ( $P_{\text{rec}}$ ). Celkový ztrátový výkon napěťového střídače získáme součtem těchto ztrát, tzn.:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{con(IGBT)}} + P_{\text{con(D)}} + P_{\text{sw}} + P_{\text{rec}} \text{ [W]}. \quad (2.16)$$

Zotavovací ztráty diod (anglicky reverse recovery losses of diodes) jsou ztráty, které vznikají, když dioda přechází z vodivostního stavu do blokovacího stavu. Ke změně těchto stavů je zapotřebí proud procházející diodou v závěrném směru. Výrobci uvádějí maximální velikost tohoto proudu v katalogu jako  $I_{\text{RRM}}$  (Repetitive Reverse Current). Na *obr. 2.7*

je zobrazen princip vzniku zotavovacích ztrát. Diodou nejprve prochází proud zátěže o velikosti  $I_L$ . Jakmile začneme spodní součástka SW zapínat, její proud  $I_{SW}$  začne lineárně narůstat a zároveň proud diodou  $I_D$  začne lineárně klesat. Proud součástkou  $I_{SW}$  narůstá až do hodnoty  $I_L + I_{RRM}$ . Proud diodou  $I_D$  klesne na hodnotu  $-I_{RRM}$ . V tento okamžik začne narůstat napětí na diodě  $U_D$ , proud diodou a součástkou se začnou lineárně dostávat do ustálených hodnot. V časovém intervalu  $t_A + t_B$  je proud součástkou vyšší, než požaduje zátěž a tím jsou způsobeny přídatné ztráty na součástce. Velikost proudu  $I_{RRM}$ , a tím i velikost zotavovacích ztrát, závisí na teplotě (vyšší teplota, vyšší ztráty). Dále zotavovací ztráty závisí na rychlosti změny proudu a jeho velikosti. [10]



Obr. 2.7 Princip vzniku zotavovacích ztrát [10]

## 2.3 Trakční motor

### 2.3.1 Ztráty ve stejnosměrném motoru

Ztráty ve stejnosměrném motoru rozdělujeme do tří základních skupin: Jouleovy ztráty v mědi, ztráty v železe a ztráty mechanické.

#### Jouleovy ztráty v mědi

Jouleovy ztráty můžeme dále rozdělit na ztráty ve vinutí kotvy (rotoru), v budícím vinutí a ztráty způsobené odporem styku komutátor-kartáč. Ztráty ve vinutí kotvy se dají vypočítat ze vztahu:

$$\Delta P_a = R_a \cdot I_a^2 \text{ [W; } \Omega, \text{ A]}, \quad (2.17)$$

kde  $R_a$  je odpor vinutí kotvy a  $I_a$  je proud kotvy. Tyto ztráty jsou závislé na zatížení motoru a obvykle při plném zatížení tvoří 30 až 40 procent celkových ztrát při plném zatížení motoru.

Ztráty v budícím vinutí můžeme získat ze vztahu:

$$\Delta P_b = R_b \cdot I_b^2 \text{ [W; } \Omega, \text{ A]}, \quad (2.18)$$

kde  $R_b$  je odpor budícího vinutí a  $I_b$  je proud budícího vinutí. Oproti ztrátám ve vinutí kotvy jsou tyto ztráty převážně konstantní a tvoří 20 až 30 procent celkových ztrát při plném zatížení motoru.

Ztráty způsobené odporem styku komutátor-kartáč závisí na dokonalosti styku těchto dvou částí. Jsou to proměnné ztráty, které závisí i na technickém stavu motoru (na opotřebení kartáčů), a proto je nelze jednoznačně určit. Pro zjednodušení je lze uvažovat jako součást ztrát ve vinutí kotvy.

### Ztráty v železe

Tento typ ztrát můžeme rozdělit na ztráty hysterezní a ztráty způsobené vířivými proudy. Hysterezní ztráty vznikají v kotvě a jsou způsobené přemagnetizováním jádra. Lze je vypočítat pomocí Steinmetzova vzorce:

$$\Delta P_h = \eta \cdot B_{\max}^{1,6} \cdot f \cdot V \text{ [W; -, T, Hz, m}^3\text{]}, \quad (2.19)$$

kde  $\eta$  je Steinholzův hysterezní součinitel,  $B_{\max}$  je maximální magnetická indukce v kotvě,  $f$  je frekvence přemagnetování a  $V$  je objem kotvy. Frekvenci přemagnetování získáme ze vzorce:

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \text{ [Hz; -, ot/min]}, \quad (2.20)$$

$p$  je počet pólů a  $n$  jsou otáčky rotoru za minutu.

Ztráty způsobené vířivými proudy vznikají v jádru kotvy. Rotací kotvy v magnetickém poli se do jádra kotvy indukuje elektromagnetické pole. I když je toto pole malé, způsobuje díky nízkému odporu jádra kotvy značné úbytky. Tyto ztráty jsou závislé na magnetické indukci, na materiálu a tloušťce izolovaných plechů.

### Mechanické ztráty

Do této kategorie spadají ztráty způsobené třením ložisek, ztráty způsobené setrvačností kotvy, ztráty ventilační a ztráty způsobené nedokonalostí výroby. Jedná se například o nedokonalé vyvážení kotvy motoru, tzv. házení rotoru.

#### 2.3.2 Ztráty v asynchronním motoru

U asynchronního motoru lze ztráty rozdělit do několika skupin: Jouleovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru  $\Delta P_j$ , ztráty v železe statoru i rotoru  $\Delta P_{Fe}$ , mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$  a přídatné ztráty  $\Delta P_d$ . Ztráty mechanické a ztráty v železe lze určit z měření naprázdno, zbylé ztráty se dopočítávají.



## Měření naprázdno

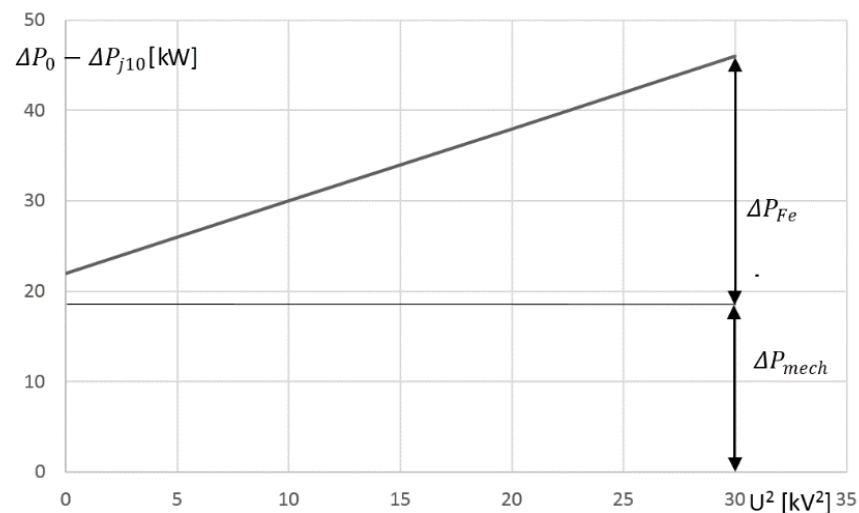
Při měření naprázdno je motor nezatížen, je napájen souměrným sinusovým napětím  $U_1$ , skluz motoru se blíží svou velikostí k nule. Měří se proud ve fázích  $I_0$  a příkon  $P_0$  při několika hodnotách  $U_1$ . Aby se dosáhlo tepelné ustálenosti a ustálení mechanických ztrát, doporučuje se nejprve nechat motor běžet bez zatížení po určitou dobu, odpovídající jeho velikosti (např. motory do 100 kW cca 1 hodinu, motory nad 1 000 kW déle než 4 hodiny). Jouleovy ztráty ve vinutí statoru naprázdno se spočítají:

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \text{ [W; } \Omega, \text{ A] ,} \quad (2.21)$$

kde  $R_1$  je odpor fáze vinutí statorů, který se změří stejnosměrným proudem a přepočítá se na referenční hodnotu (obvykle odpor při  $75^\circ\text{C}$ ). Jelikož motor běží bez zatížení, můžeme uvažovat, že ztráty naprázdno se rovnají měřenému příkonu. Po odečtení Jouleových ztrát od měřeného příkonu, dostaneme součet ztrát v železe a mechanických ztrát. Platí tedy vztah:

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j10} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} \text{ [W].} \quad (2.22)$$

Mechanické ztráty a ztráty v železe lze poté rozdělit, jak je zobrazeno na *obr. 2.8*.



Obr. 2.8 Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe

## Výpočet účinnosti asynchronního motoru

Účinnost u asynchronních motorů můžeme určit buď přímo, nebo nepřímo. Přímá metoda spočívá v měření příkonu  $P_p$ , momentu na hřídeli  $M$  a otáček rotoru  $n$ . Výkon motoru spočteme ze vztahu:

$$P = 0,10472 \cdot M \cdot n \text{ [W; Nm, ot/min]}. \quad (2.23)$$

Účinnost získáme pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100 \text{ [%]}. \quad (2.24)$$

Přímá metoda se využívá spíše pro určení účinnosti u menších motorů, u velkých motorů je vhodnější vypočítat účinnost ze vztahu:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_p}\right) \cdot 100 \text{ [%]}. \quad (2.25)$$

Celkové ztráty  $\Delta P$  získáme ze vztahu:

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \text{ [W]}, \quad (2.26)$$

kde ztráty v železe statoru i rotoru  $\Delta P_{Fe}$ , mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$  získáme z měření naprázdno. Dále pro výpočet je potřeba znát odpor vinutí statoru  $R_1$ . Příkon  $P_p$ , proud  $I_1$  a skluz  $s$  se měří při daném zatížení stroje nebo je lze určit z kruhového diagramu asynchronního motoru. Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru vypočteme:

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \text{ [W; } \Omega, \text{ A]}, \quad (2.27)$$

z následujícího vztahu získáme vnitřní výkon ve vzduchové mezeře:

$$P_i = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} \text{ [W]}. \quad (2.28)$$

Jouleovy ztráty v rotoru jsou:

$$\Delta P_{j2} = P_i \cdot s \text{ [W; W, -]}. \quad (2.29)$$

Přídavné ztráty, které jsou obtížně zjistitelné, jsou způsobeny např. vířivými proudy ve vinutích statoru a rotoru, ztrátami na povrchu statoru a rotoru atd. Kvůli obtížnosti zjištění

těchto ztrát, se uvažuje, že jejich velikost je rovna 0,5 % z příkonu. Pro přesnější zjištění velikosti přídatných ztrát se používá vzorec:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_p \left( \frac{I_1 - I_0}{I_{1n} - I_0} \right)^2 [W; W, A], \quad (2.30)$$

kde  $I_1$  je proud statoru při daném zatížení,  $I_{1n}$  je jmenovitý proud statoru a  $I_0$  proud naprázdno. Celkové ztráty a účinnost se vypočítá ze vzorců uvedených výše. [5]

## 2.4 Pomocné pohony

Na lokomotivě je kromě hlavních trakčních zařízení spousta elektrických zařízení, které zajišťují chlazení, spolehlivý provoz, osvětlení, pohodlné prostředí pro strojvedoucího a jiné. Jelikož jejich funkce není přímo spojená s přeměnou elektrické energie na tažnou sílu, musíme příkon těchto zařízení uvažovat jako ztrátový výkon lokomotivy. Jedná se o elektrická zařízení o různých příkonech, od jednotek W až po desítky kW. Jsou to například: ventilátory pro chlazení trakčních zařízení, kompresory pro brzdové systémy, topení, klimatizace stanoviště strojvedoucího, nabíječe baterií, čerpadla pro chladicí obvody (např. chlazení transformátorů, napěťových střídačů aj.), rozmrazovač, osvětlení stanoviště, světlomety, řídicí počítač, napájení řídicích obvodů spínacích součástí, napájení zabezpečovacích zařízení atd. Mezi elektrická zařízení způsobující největší odběr energie patří ventilátory, kompresory, topení/klimatizace stanoviště a nabíjení baterií. V tabulce 2.1 jsou uvedeny příkony základních elektrických zařízení používaných pro pomocné pohony.

Tab. 2.1 Vybraná zařízení pomocných pohonů a jejich typický příkon [2]

Zařízení	Příkon [kW]
Ventilátory	4÷50
Kompresory	5÷25
Topení/klimatizace stanoviště	3÷10
Nabíjení baterie	5÷10
Čerpadla (chladicí kapaliny)	0,5÷3
Pomocný kompresor	1÷2
Rozmrazovač	0,5÷2
Elektronická zařízení	0,1÷1

### 2.4.1 Ventilátory

Ventilátory slouží k chlazení elektrických zařízení. Potřeba jejich využití souvisí se zatížením elektrických zařízení v průběhu jízdy trakčního vozidla. Kdyby po celou dobu provozu trakčního vozidla běžely všechny ventilátory na 100 % výkonu, spotřeba energie vozidla by značně stoupla. Proto je snaha ventilátory zapínat a řídit jejich výkon dle potřeby chlazení.

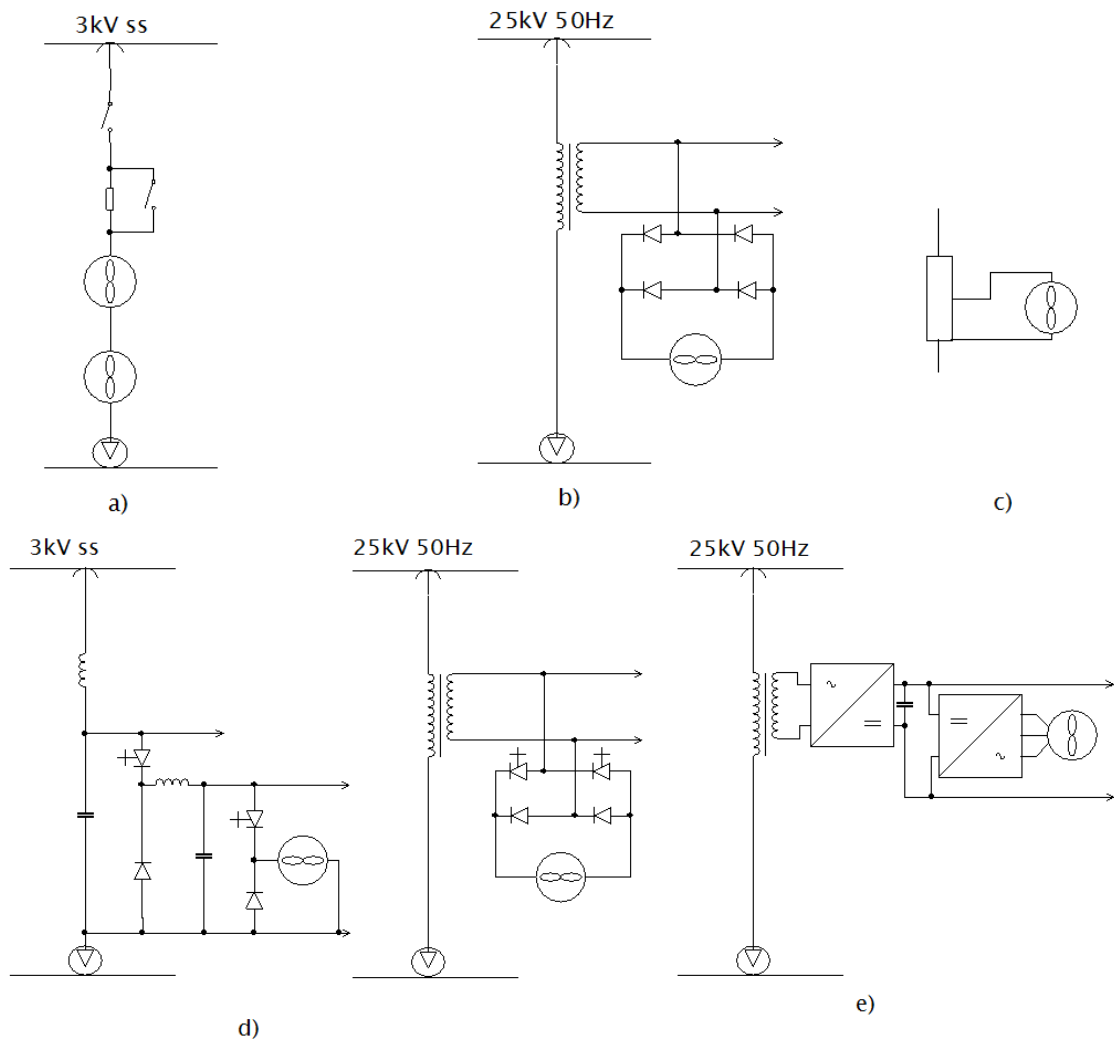
U vozidel s trakčními stejnosměrnými sériovými motory a odporovou regulací se využívají pro pohánění ventilátorů stejnosměrné sériové motory řazené do skupin. Skupiny motorů jsou spouštěny podle proudových a momentových rázů, viz *obr. 2.9 a*).

Vozidla s trakčními stejnosměrnými sériovými motory a regulací pomocí odbočkového transformátoru (vozidla pro střídavé napájecí systémy) využívají taktéž stejnosměrné sériové motory pro pohánění ventilátorů. Napájení pro motory je zajištěno pomocí samostatné odbočky z transformátoru a můstkového usměrňovače, znázorněno na *obr. 2.9 b*). Ventilátory se dají pomocí stykačů libovolně vypínat.

Při chlazení odporníků lze využít systému, kdy je motor ventilátoru připojen na odbočku z odporníku, viz *obr. 2.9 c*). Při průchodu proudu odporníkem vznikne paralelní zapojení odporník-motor, tím se motor spustí a chladí odporník. Jestliže odporníkem neteče proud, motor ventilátoru je v klidu.

Vozidla s pulzní regulací a trakčními stejnosměrnými cize buzenými motory využívají pro řízení pohonů ventilátorů pulzní měniče, na *obr. 2.9 d*) je znázorněno zapojení pro napájení pohonu ventilátoru na stejnosměrném a střídavém systému. Jelikož se jedná o plynulou regulaci otáček, mohou být ventilátory řízeny přesně na požadované otáčky.

Pro dnešní vozy s asynchronními motory se jako pohon pro ventilátory využívají asynchronní motory, *obr. 2.9 e*). Díky menším rozměrům oproti motorům stejnosměrným umožnily asynchronní motory individuální ventilaci. Malé asynchronní motory lze napájet z jednoho napěťového střídače, který má svoje řízení velikosti výstupního napětí a frekvence.



Obr. 2.9 Zapojení motorů pro pohon ventilátorů na vozidle:  
 a) Skupinové zapojení  
 b) Odbočka z transformátoru a diodový usměrňovač  
 c) Chlazení odporů  
 d) Pulzní regulace  
 e) Asynchronní motory s napěťovým střídačem

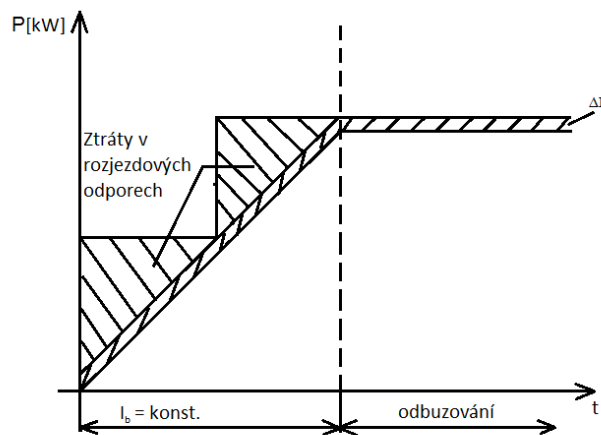
## 2.4.2 Kompresory

Kompresory slouží k vytváření stlačeného vzduchu pro ovládání mechanických brzd, sběračů, stykačů, a dalších zařízení. V zásadě se na trakčních vozidlech používá pístový nebo rotační kompresor. Pístový kompresor se obvykle zapíná a vypíná v závislosti na tlaku vzduchu ve vzduchojemu. Rotační kompresor je výhodnější provozovat v trvalém provozu a tlak řídit pomocí škrcení dodávky vzduchu, nebo jej provozovat v režimech plného zatížení a volnoběhu. Způsob napájení kompresorových motorů je podobný způsobu napájení motorů ventilátorů s tím rozdílem, že napájení více kompresorových motorů musí být dostatečně nezávislé z důvodu vzájemného zálohování. To znamená, že např. při použití stejnosměrných sériových motorů pro pohon kompresoru na stejnosměrné trakci se nesmí dva motory zapojit do série nebo při použití asynchronních motorů je každý motor napájen z jiného střídače. [2]

## 2.5 Ztráty způsobené regulací

### 2.5.1 Odporová regulace stejnosměrných sériových motorů

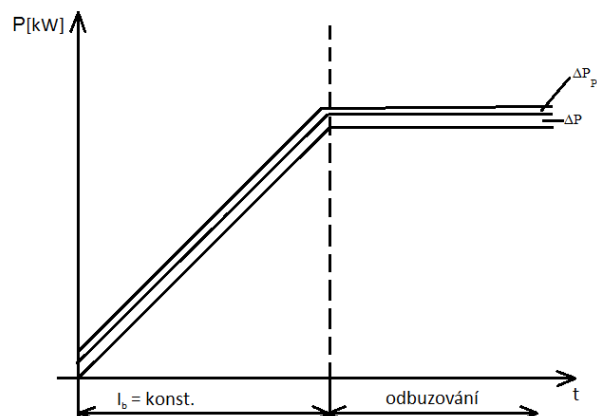
U tohoto druhu regulace motorů jsou ztráty způsobené regulací pouze při rozjezdu. Jedná se o energii, která je zmařena v rozjezdových odpornících. S jejich postupným vyřazováním ztrátová energie klesá, až se vyřadí úplně – hospodárny stupeň. Na hospodárném stupni a během odbuzování motorů jsou ztráty na vozidle tvořeny pouze ztrátami jednotlivých zařízení, ztráty způsobené regulací jsou nulové, viz *obr. 2.10*.



Obr. 2.10 Ztráty při odporové regulaci

### 2.5.2 Pulzní regulace

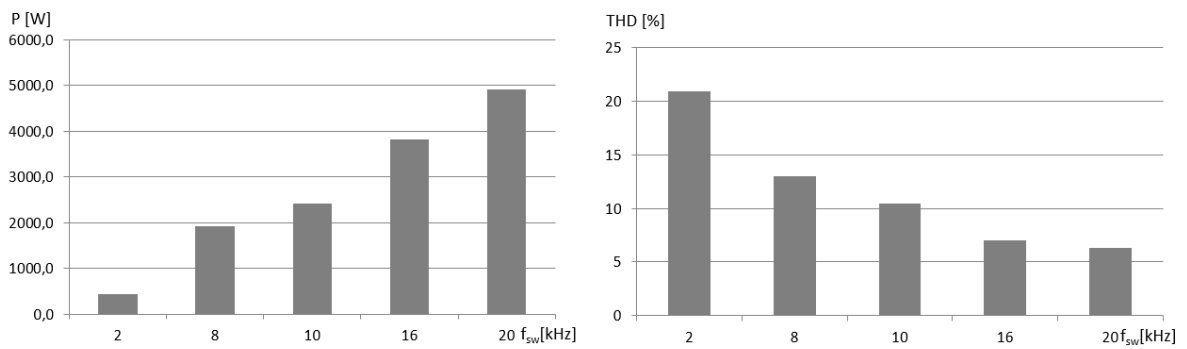
Při použití pulzních měničů sice nedochází ke ztrátě energie v rozjezdových odpornících, ale oproti odporové regulaci vnášíme do systému spínací ztráty. Průběh ztrát je znázorněn na *obr. 2.11*. Tyto ztráty jsou závislé na spínací frekvenci polovodičových prvků. Spínací frekvence se musí volit tak, aby průběh proudu v motoru nebyl příliš zvlňný.



Obr. 2.11 Ztráty při regulaci pulzními měniči

### 2.5.3 Regulace asynchronních motorů pomocí napěťových střídačů

Ztráty v napěťových střídačích jsou popisovány v kapitole 2.2.5. Způsobem regulace můžeme ovlivnit spínací ztráty. Jsou základní dva typy řízení asynchronního motoru: vektorové řízení a přímé řízení momentu. U vektorového řízení volíme spínací frekvenci přímo. O velikosti spínací frekvence rozhoduje požadavek na zvlnění proudu v motoru a velikost spínacích ztrát. Spínací frekvence nemusí být přes celý regulační rozsah stejná. U přímého řízení momentu rozhoduje o velikosti spínací frekvence nastavená šířka hysterezního pásma. Spínací frekvence tak není konstantní. Šířka hysterezního pásma nemusí být v celém regulačním rozsahu stejná. Na *obr. 2.12* je znázorněna závislost spínacích ztrát (vlevo) a THD (vpravo) na spínací frekvenci u vektorového řízení.



Obr. 2.12 Závislost spínacích ztrát a THD na spínací frekvenci u vektorového řízení

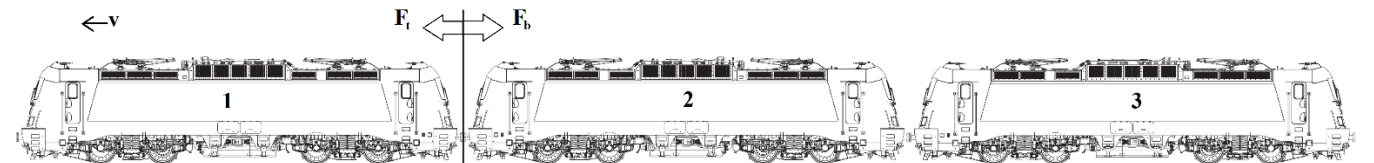
## 3 Měření na vozidle

### 3.1 Metoda měření

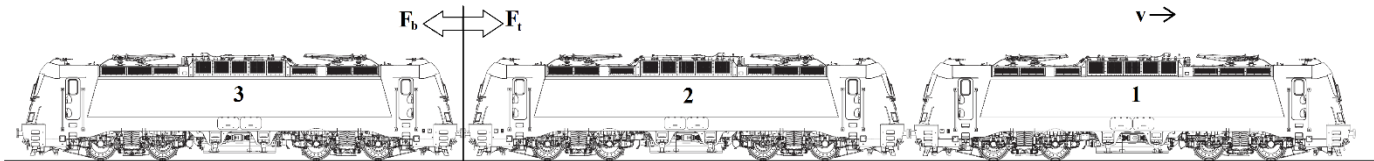
Měření probíhalo na lokomotivách 109E3 pro DB a jednalo se o orientační měření. Tyto lokomotivy jsou určeny pro provoz na německém drážním systému 15 kV 16,7 Hz jako tažná vozidla pro vlaky typu push-pull. Technické parametry lokomotivy jsou v tabulce 3.1. V soupravě byly zapojeny lokomotivy číslo 102 001, 102 002 a 102 003.

Tab. 3.1 Základní technické parametry lokomotivy 109E3 [14]

Trolejové napětí	15 kV 16,7 Hz
Uspořádání pojezdu	B'o B'o
Rozchod koleje	1 435 mm
Maximální rychlost	200 km/h
Výkon trakčních motorů	6 400 kW
Výkon EDB (při rekuperaci)	4 700 kW
Maximální tažná síla	275 kN
Maximální brzdná síla EDB	130 kN



Obr. 3.1 Měření trakčních charakteristik



Obr. 3.2 Měření charakteristik EDB

Primárním cílem měření je změřit trakční charakteristiky vozidla (charakteristiky EDB), tzn. změřením závislosti tažné síly na rychlosti při daném procentuálním tahu (brzdě). Při měření se užívá spřažení několika lokomotiv. Měříme-li trakční charakteristiky, první lokomotiva ve směru jízdy je měřená lokomotiva. Měřená lokomotiva je připojená ke zbylým lokomotivám pomocí šroubovky s tenzometrickým můstkem, z tohoto zařízení získáme tažnou sílu na háku. Rychlost se měří pomocí GPS, anténa GPS je umístěná vně vozidla. Dále se měří velikost trolejového napětí přes měřicí transformátor napětí. Vstupní proud se měří pomocí proudové sondy. Schéma zapojení měření je na *obr. 3.3*.

Měření probíhá následovně: nejprve se souprava odbrzdí a zkalibruje se měření tažné síly na háku. Poté souprava zrychlí na 200 km/h, na první lokomotivě se nastaví 100 % tah a na poslední lokomotivě se nastaví automatická regulace rychlosti na 200 km/h, tzn., první lokomotiva táhne, poslední brzdí (znázorněno na *obr. 3.1*). Jakmile se rychlost soupravy nemění a zároveň je ustálená tažná síla, uloží se naměřené hodnoty (minimálně deset). Poté souprava zpomalí na 180 km/h a opět se opakuje stejný postup. Takto se rychlost postupně snižuje po 20 km/h až do 20 km/h. Na druhé lokomotivě (prostřední) se nastavují brzdňá procenta tak, aby souprava nezrychlovala, tzn. v případě, kdy poslední lokomotiva není schopná sama ubrzdit táhnoucí lokomotivu. Jakmile se změří body trakční charakteristiky pro 100 % tah, tak se, zrychlí se na 200 km/h, sníží tah na 80 % a postup měření se opakuje. Takto se změří body trakčních charakteristik pro 100 % tah, 80 % tah, 60 % tah, 40 % tah a 20 % tah. Měření při 100 % tahu se provádělo pouze do rychlosti 60 km/h z toho důvodu, že táhnoucí lokomotiva měla větší tažnou sílu, než byl součet brzdňých sil dvou zapřažených lokomotiv. Pokud by byl požadavek měřit i při 100 % tahu do rychlosti 20 km/h bylo by zapotřebí více lokomotiv pro brzdění.

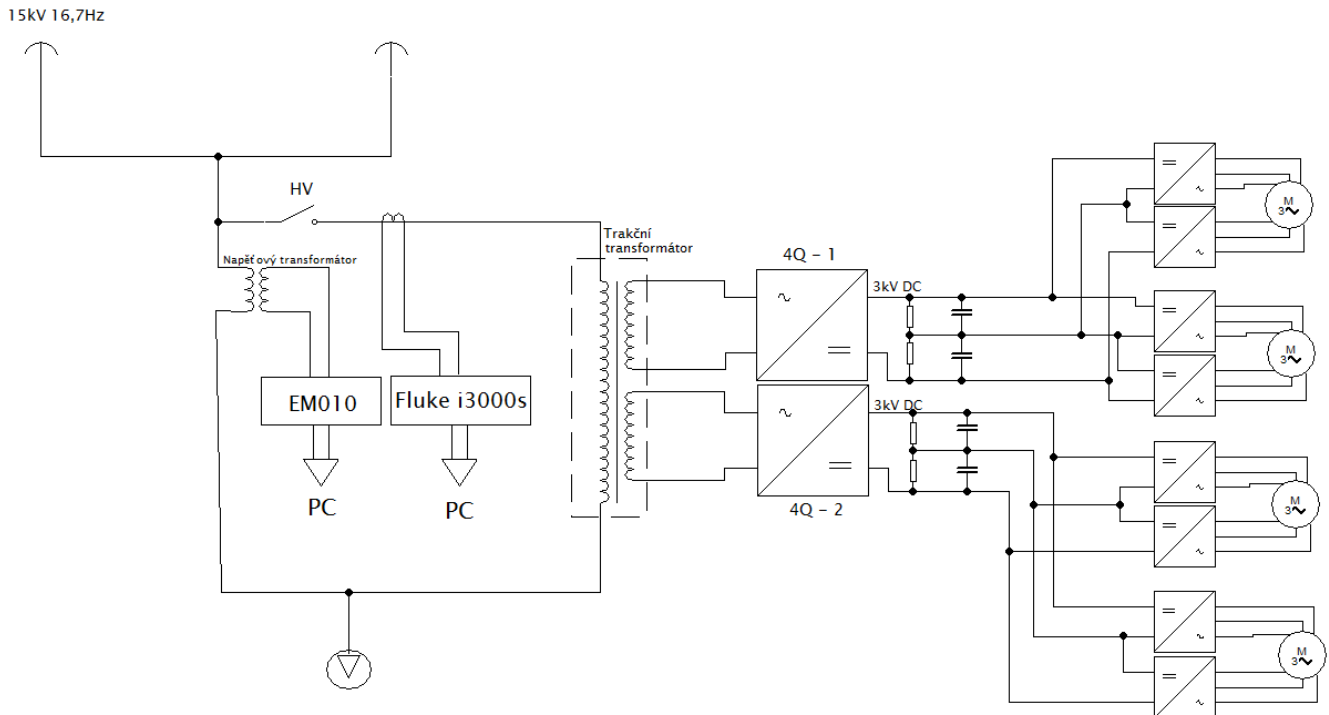


Pro měření charakteristik EDB je postup shodný, s tím rozdílem, že souprava jede na opačnou stranu a na měřené lokomotivě (v tomto případě poslední, viz *obr. 3.2*) se nastavují brzdná procenta a na první lokomotivě ve směru jízdy se nastavuje požadovaná hodnota rychlosti do automatické regulace. Takto se opět změří body charakteristik EDB pro brzdná procenta 100 %, 80 %, 60 %, 40 % a 20 %.

V průběhu měření jsou vypnuté mechanické brzdy. Pokud by mechanické brzdy zůstaly zapnuté, lokomotiva by sice více brzdila, ale došlo by díky dlouhé době měření k jejich poškození a zvýšenému opotřebením kolejnic. Pozornost je také zapotřebí věnovat prokluzu v průběhu měření. Když se ukládají naměřené hodnoty, lokomotiva nesmí prokluzovat.

Při měření se ukládají hodnoty trolejového napětí a proudu, tažené síly na háku a rychlosti. Tyto hodnoty jsou následně použity pro výpočet účinnosti lokomotivy.

Z měření získáme tažnou sílu na háku, ale u trakčních charakteristik se obvykle uvažuje tažná síla na obvodu hnacích dvojkolí. Rozdíl je takový, že tažná síla na obvodu hnacích dvojkolí se skládá ze dvou částí. První část síly je spotřebována na pohyb samotného hnacího vozidla. Druhá část síly se spotřebuje na pohyb zátěže, kterou podle místa působení označujeme jako tažnou sílu na háku. Rozdíl tedy tvoří síla spotřebovaná na pohyb trakčního vozidla, která je závislá na jízdních odporech (sklon a oblouk trati, odpor vzduchu). V této práci se tažná síla na obvodu hnacích dvojkolí v souvislosti s výsledky měření neuvažuje.

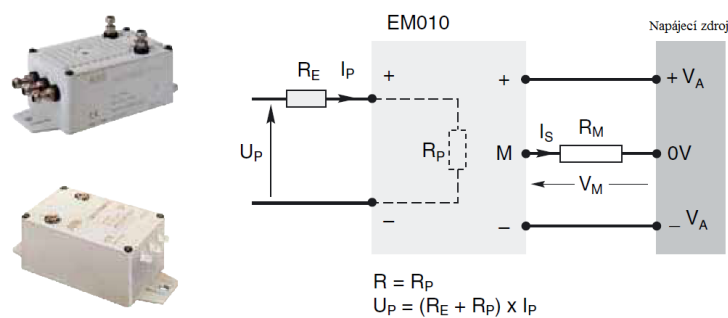


Obr. 3.3 Schéma měřené lokomotivy 109E3 se zapojenými měřicími prvky

## 3.2 Měřicí přístroje

### 3.2.1 Měření napětí

Pro měření napětí byl použit převodník ABB EM010 trakční napěťový senzor. Základní technické parametry jsou vypsány v tabulce 3.2 a obr. 3.4 je zobrazen převodník a zapojení jeho vstupů a výstupů. Převodník je zapojen na napěťový transformátor, který převádí trolejové napětí 15 kV na napětí 100 V. Převodník převádí proudy a galvanicky odděluje primární a sekundární stranu.



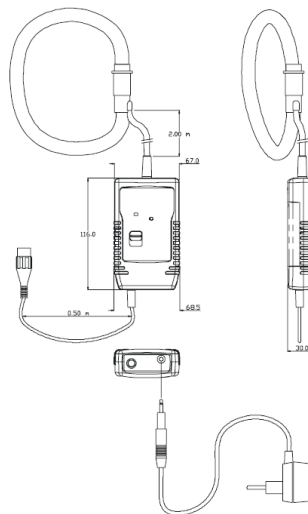
Obr. 3.4 Převodník ABB EM010BBFHP1N [17]

Tab. 3.2 Základní technické parametry převodníku ABB EM010BBFHP1N [17]

Jmenovitý primární proud	10 mA r.m.s.
Měřicí rozsah	20 mA Peak
Přesnost (+25°C)	<±1 %
Proudový offset (+25°C)	<±0.3 mA
Linearita	<±0.1 %
Teplotní proudový drift (-25 ÷ +70°C)	<±5 µA / °C
Časové zpoždění	<100 µs
Spotřeba nezatíženého převodníku	<25 mA
Primární odpor (+25°C)	1,5 kΩ
Sekundární odpor (+70°C)	60 Ω
Dielektrická odolnost (50Hz, 1min)	6 kV
Napájecí napětí	±15 V ÷ ±24 V

### 3.2.2 Měření proudu

Proud byl měřen pomocí proudové sondy Fluke i3000s Flex, zobrazené na obr. 3.5. Toto zařízení ze změny magnetického pole ve vzduchové mezeře cívky vyhodnocuje hodnotu proudu v měřeném vodiči. Vybrané technické specifikace proudové sondy jsou v tabulce 3.3.



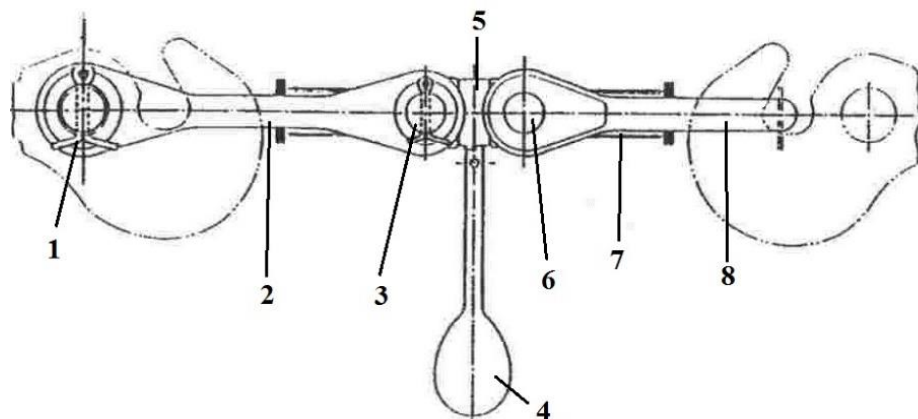
Obr. 3.5 Proudová sonda Fluke i3000s Flex [18]

Tab. 3.3 Základní technické údaje proudové sondy Fluke i3000s Flex [18]

Proudové rozsahy (r.m.s.)	30 A, 300 A, 3000 A
Výstupní citlivost (na jeden ampér)	100 mV, 10 mV, 1 mV
Přesnost (+25°C)	±1 % na rozsahu 45÷65 Hz
Linearita	±0,2 % z rozsahu
Šum (AC r.m.s.)	8 mV (30 A), 2 mV (300 A, 3000 A)
Frekvenční rozsah (-3dB)	10 Hz÷50 kHz
Fázová chyba	<±1° (10 Hz÷65 Hz), ±10° (20 kHz)
Teplotní koeficient	±0,08 % z rozsahu na °C

### 3.2.3 Měření tažné síly na háku

Pro přenos tažných sil mezi jednotlivými železničními vozy se využívá táhlového ústrojí. Hlavní části táhlového ústrojí jsou táhlový hák, šroubovka a vypružovací zařízení. Na obr. 3.6 je šroubovka s očíslovanými hlavními částmi. Hlavní části šroubovky jsou: svorník (obr. 3.6, číslo 1), závěsnice (obr. 3.6, číslo 2), matice závěsnice (obr. 3.6, číslo 3), rukojeť objímky (obr. 3.6, číslo 4), objímka (obr. 3.6, číslo 5), matice třmenu (obr. 3.6, číslo 6), vřeteno (obr. 3.6, číslo 7), třmen (obr. 3.6, číslo 8).



Obr. 3.6 Šroubovka

Pro měření tažné síly na háku byla použita měrná šroubovka polepená tenzometrickým můstkem. Tenzometrický můstek je nalepen na vřeteni šroubovky. Rozdíl mezi klasickou šroubovkou popisovanou výše a měrnou šroubovkou je takový, že měrná šroubovka má dva třmeny. Šroubovka použitá k měření byla vyrobena ve firmě Škoda Transportation a má rozsah do 300 kN.

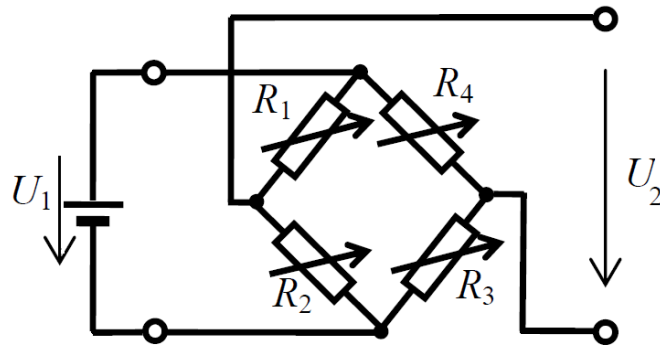
Odporový tenzometr slouží k měření sil. Při mechanickém namáhání (natažení) u něj dochází ke změně elektrického odporu. Změnu odporu můžeme vyjádřit vztahem:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} [\Omega; m], \quad (3.1)$$

kde  $k$  je charakteristický koeficient tenzometru, pro kovové tenzometry je roven přibližně 2.

Protože změna odporu u tenzometru je velmi malá, využívá se nejčastěji Wheatstonova můstkového zapojení zobrazeného na *obr. 3.7*. Jsou-li všechny odpory přibližně stejně velké, platí:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) [V; \Omega]. \quad (3.2)$$



*Obr. 3.7* Wheatstonovo můstkové zapojení tenzometrů

### 3.2.4 Měřicí karta

Signál, který vychází z jednotlivých měřicích přístrojů, se následně upraví na napěťový signál vyhovující vstupním požadavkům měřicí karty. Při tomto měření je použita měřicí karta NI 9205. Základní parametry měřicí karty jsou v tabulce 3.4.

*Tab. 3.4* Základní parametry měřicí karty NI 9205 [19]

Počet měřicích kanálů	32 single 16 differential
Programovatelné úrovně vstupních signálů	±200 mV, ±1 V, ±5 V, ±10 V
Vzorkovací rychlost	250 kS/s
Rozlišení	16-Bit

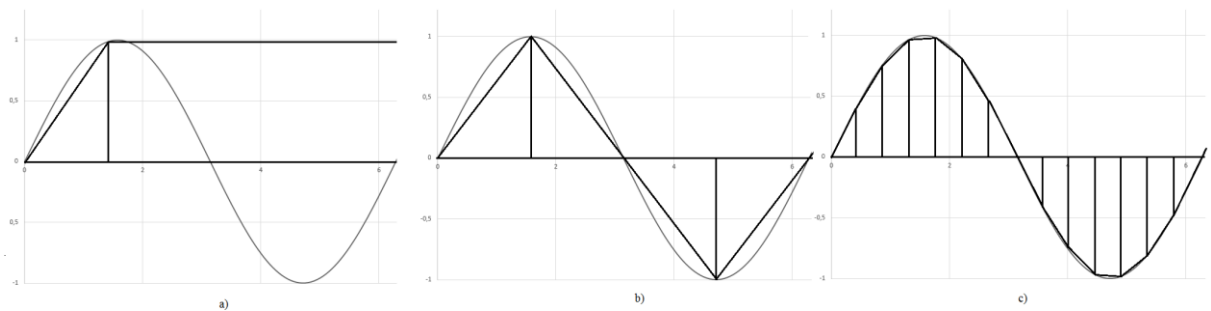
## 3.3 Chyba měření

Převodem analogového signálu na digitální signál vznikají chyby v měření. Mezi tyto chyby patří chyba způsobená vzorkováním a chyba způsobená kvantováním.

### 3.3.1 Vzorkování

Chceme-li převést analogový signál na digitální, je důležité při převodu vhodně zvolit vzorkovací frekvenci. Vzorkovací frekvence udává, kolik vzorků z analogového signálu převedeme na digitální signál za jednotku času nebo také za jednu periodu analogového signálu. Problematika volby vzorkovací frekvence je na *obr. 3.8*. Podle Whittaker–Nyquist–Kotelnikov–Shannon vzorkovacího kritéria by měla být vzorkovací frekvence minimálně

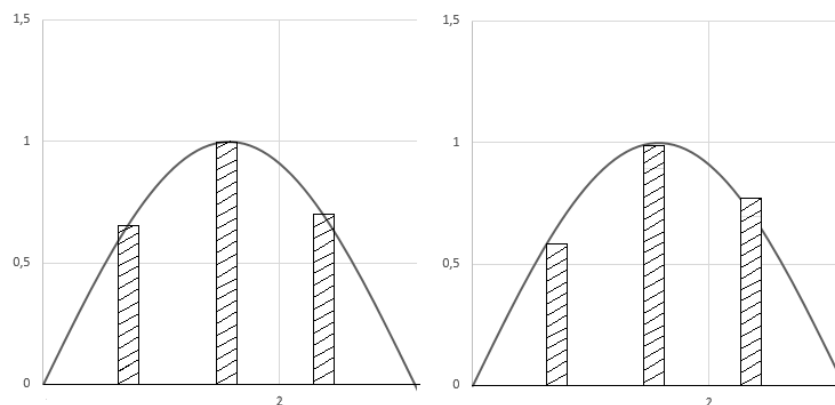
dvakrát větší, než frekvence vzorkovaného signálu. Za tohoto předpokladu neztratíme informaci o frekvenci, ale informace o podobě signálu nebude ve většině případů dostačující. Z tohoto důvodu se volí vzorkovací frekvence několikanásobně větší, než je frekvence převáděného signálu. Čím vyšší je vzorkovací frekvence, tím je větší nárok na zpracování navzorkovaných dat. Vzorkovací frekvence se volí tak, aby se signál převedl s dostatečnou přesností a zároveň aby nebyly kladeny příliš velké nároky na hardware.



Obr. 3.8 Problematika vzorkovací frekvence

- a)  $f_{vzor} = f_{sig}$
- b)  $f_{vzor} = 2 \cdot f_{sig}$
- c)  $f_{vzor} = 12 \cdot f_{sig}$

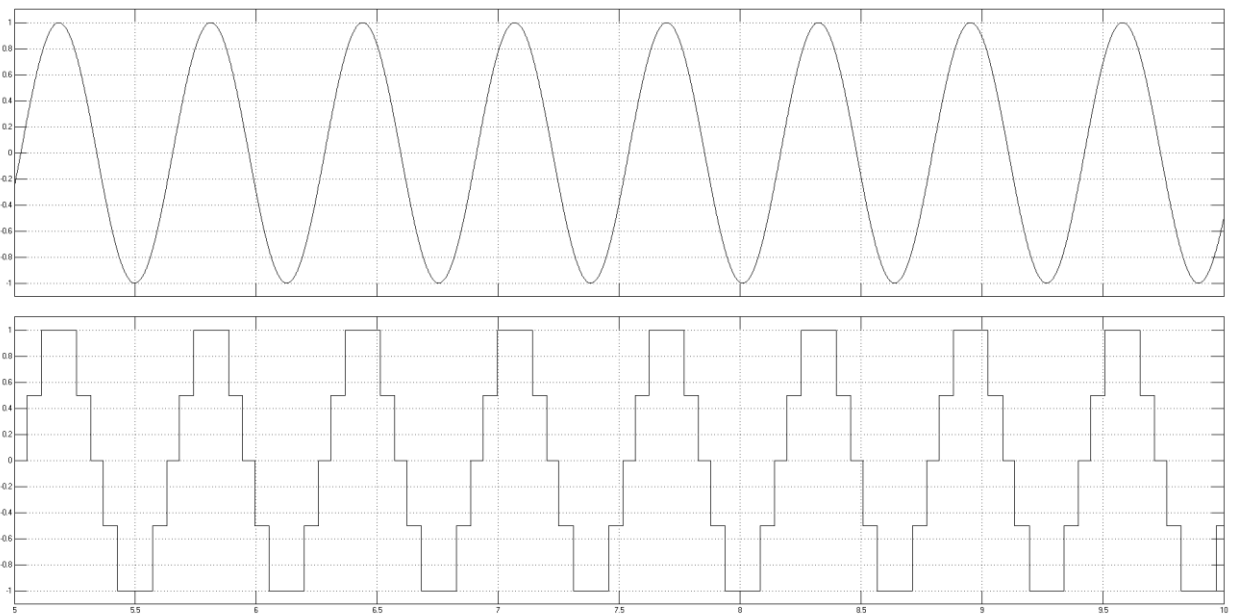
Další problematika vlivu vzorkování na měření se zabývá délkou vzorkovacího impulsu. Jedná se o krátkou dobu, kdy se vzorkovaný signál může měnit. Existují dva hlavní druhy vzorkování. V prvním případě se signál vzorkuje po celou dobu vzorkovacího impulsu a poté se určí střední hodnota (obr. 3.9 vlevo). V druhém případě se jako výsledek vzorkování bere hodnota navzorkovaná na začátku vzorkovacího impulsu (obr. 3.9 vpravo).



Obr. 3.9 Způsoby vzorkování

### 3.3.2 Kvantování

Kvantování je přiřazování digitálních hodnot jednotlivým hodnotám navzorkovaného analogového signálu. V podstatě se jedná o zaokrouhlení, protože A/D převodník má pouze omezený počet možných vyjádření informace, tzn. omezenou přesnost. Přesnost A/D převodníku závisí na rozsahu kvantované veličiny a na počtu bitů A/D převodníku. Například, máme-li kvantovat napětí v rozmezí -10 V až +10 V pomocí 10ti bitového převodníku máme k dispozici 1 024 úrovní, tzn. rozdíl mezi jednotlivými úrovněmi je 0,0195 V. Na *obr. 3.10* je ukázka kvantování sinusového signálu.



Obr. 3.10 Ukázka kvantování sinusového signálu

### 3.4 Výsledky měření a výpočet účinnosti

Jak již bylo zmíněno, z měření se získají hodnoty vstupního trolejového napětí  $U_t$ , vstupního proudu  $I_{in}$ , rychlost soupravy  $v$  a tažné síly na háku  $F_t$ . K určení účinnosti je zapotřebí znát příkon a trakční výkon. Příkon lze získat ze vztahu:

$$P_p = \frac{U_t \cdot I_{in}}{1000} \text{ [kW; V, A]}. \quad (3.3)$$

Trakční výkon lze vypočítat pomocí vzorce:

$$P_t = \frac{F_t \cdot v}{1000} \text{ [kW; N, m/s]}. \quad (3.4)$$

Ztráty se poté spočítají jako rozdíl těchto dvou výkonů:

$$\Delta P = P_p - P_t [\text{kW}; \text{kW}]. \quad (3.5)$$

Účinnost se získá vydělením příkonu a trakčního výkonu:

$$\eta = \frac{P_t}{P_p} [-; \text{kW}]. \quad (3.6)$$

Při měření charakteristik EDB se měří stejné veličiny jako u měření trakčních charakteristik, ale pro přehlednost je lze označit měřenou tažnou sílu na háku jako sílu brzdou  $F_b$ . Z této síly spočteme brzdový výkon:

$$P_b = \frac{F_b \cdot v}{1000} [\text{kW}; \text{N}, \text{m/s}]. \quad (3.7)$$

Výkon, který se spočte z měřeného trolejového napětí a proudu, označíme jako rekuperovaný výkon:

$$P_R = \frac{U_t \cdot I_{in}}{1000} [\text{kW}; \text{V}, \text{A}]. \quad (3.8)$$

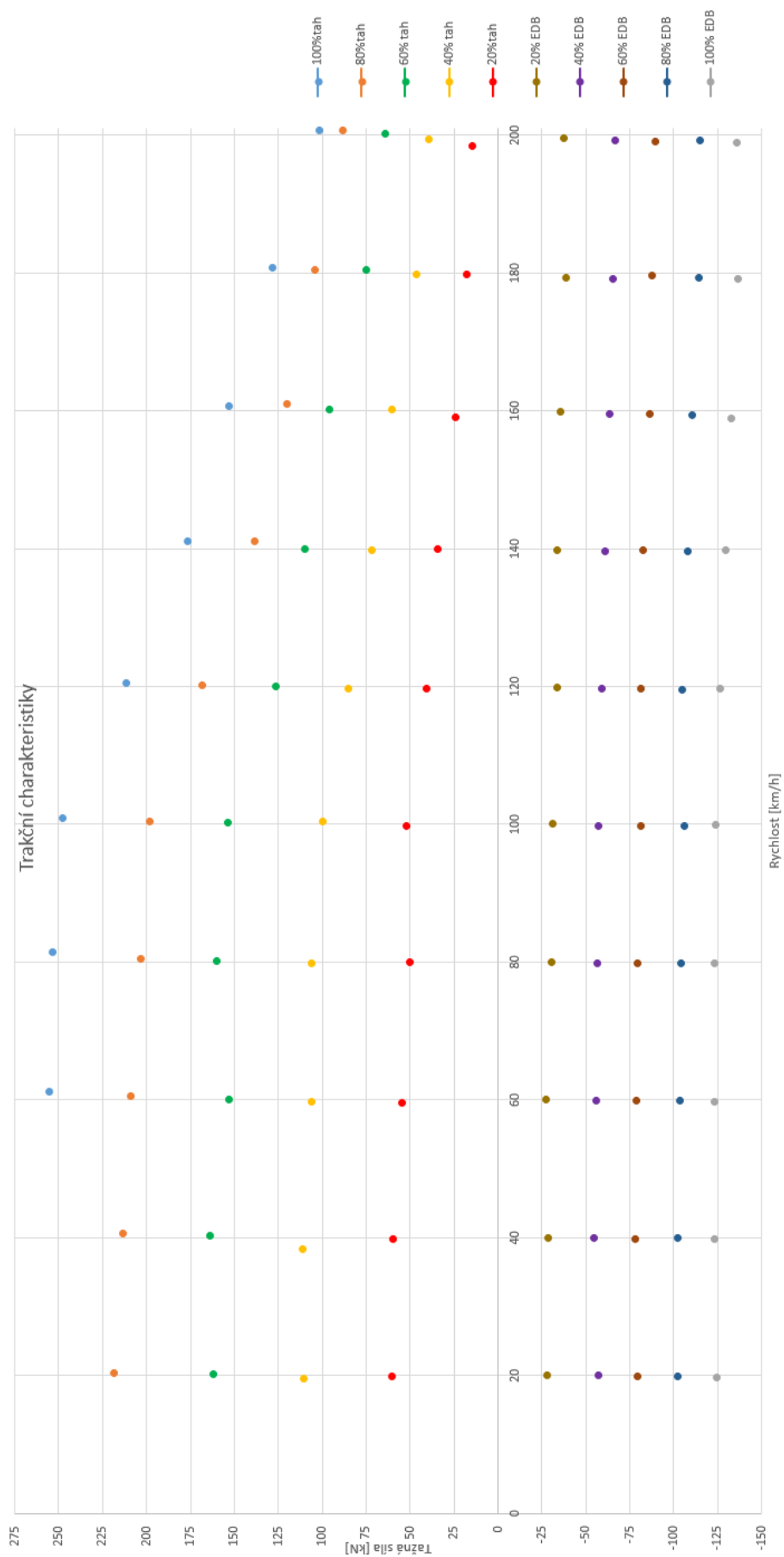
Výsledné ztráty a účinnost při měření v EDB charakteristik jsou:

$$\Delta P = P_b - P_R [\text{kW}; \text{kW}], \quad (3.9)$$

$$\eta = \frac{P_R}{P_b} [-; \text{kW}]. \quad (3.10)$$

Z měření je k dispozici pro každý změřený bod trakční charakteristiky 15 až 20 naměřených hodnot. Tyto hodnoty se pro následný výpočet zprůměrují, aby se tím omezila chyba měření. V následujících tabulkách jsou uvedeny již průměrné hodnoty z důvodu velkého množství naměřených hodnot. Kompletní tabulky s naměřenými hodnotami jsou v příloze. V grafu na *obr. 3.11* jsou zobrazeny změřené body trakčních charakteristik.



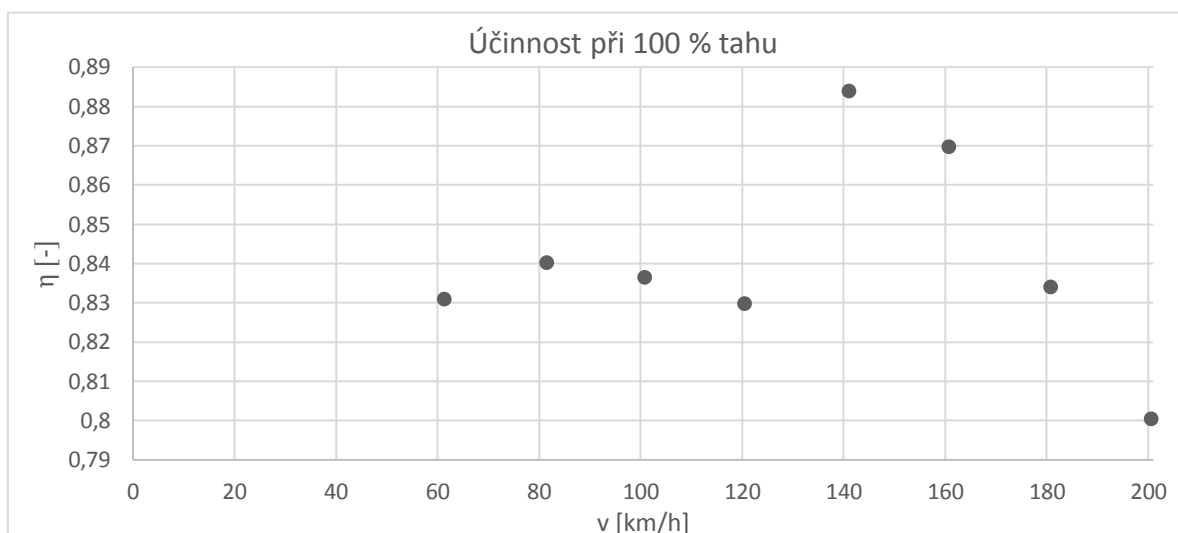


Obr. 3.11 Trakční charakteristiky lokomotivy 109E3

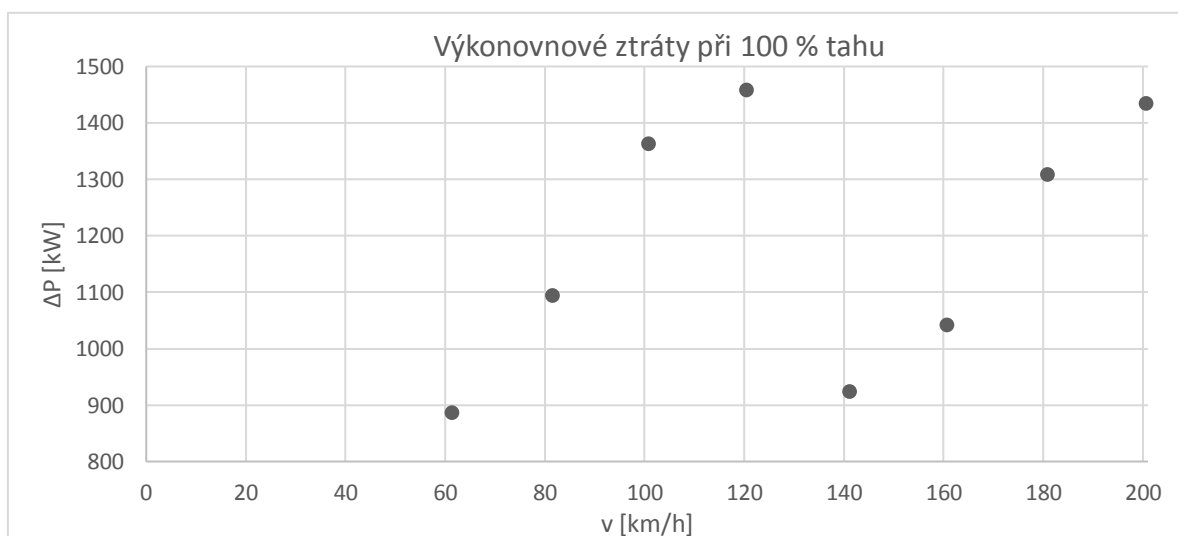
### 3.4.1 Naměřené hodnoty při 100 % tahu

Tab. 3.5 Naměřené a vypočítané hodnoty při 100 % tahu

v [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_t$ [kN]	$P_p$ [kW]	$P_t$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
200,615	15,054	471,609	101,599	7096,549	5661,899	0,8005	1434,651
180,811	14,743	525,995	128,337	7753,866	6445,744	0,8339	1308,122
160,669	14,606	538,914	153,020	7871,218	6829,342	0,8697	1041,875
141,054	14,273	548,984	176,446	7836,971	6913,457	0,8839	923,514
120,479	15,384	555,455	211,780	8546,042	7087,541	0,8298	1458,501
100,811	15,348	541,217	248,026	8308,020	6945,479	0,8365	1362,541
81,444	15,330	445,250	253,409	6826,840	5732,928	0,8403	1093,912
61,276	15,352	340,646	255,163	5230,307	4343,196	0,8309	887,112



Obr. 3.12 Graf účinnosti při 100 % tahu

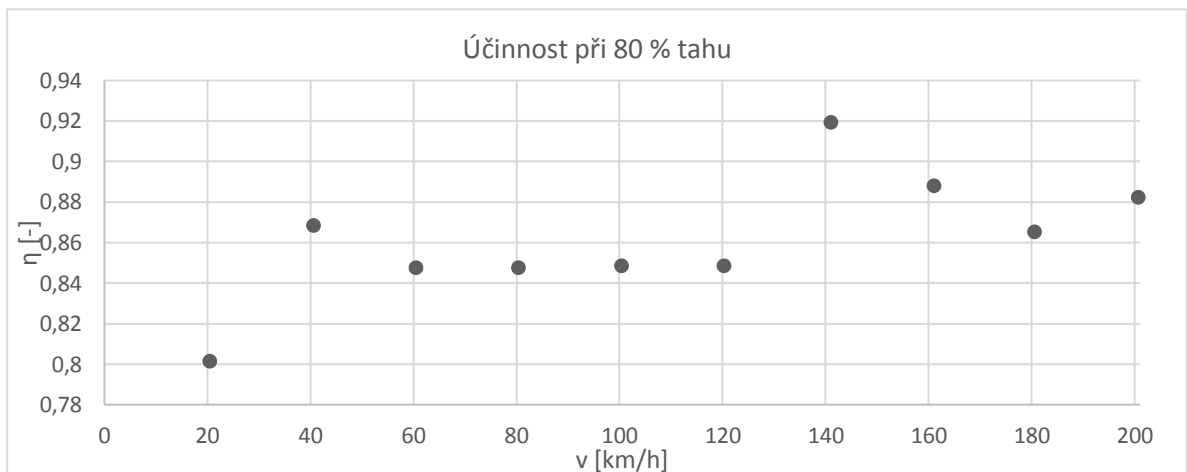


Obr. 3.13 Graf výkonových ztrát při 100 % tahu

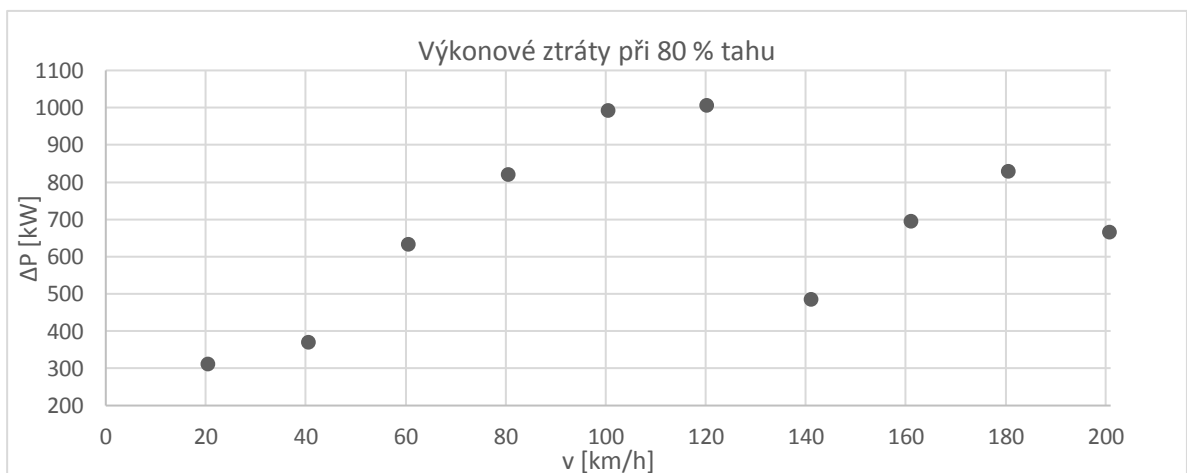
## 3.4.2 Naměřené hodnoty při 80 % tahu

Tab. 3.6 Naměřené a vypočítané hodnoty při 80 % tahu

v [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_t$ [kN]	$P_p$ [kW]	$P_t$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
200,759	13,779	405,796	88,333	5591,816	4926,052	0,8823	665,764
180,503	14,436	418,398	103,943	6040,286	5211,626	0,8650	828,660
161,070	14,381	421,407	119,955	6061,535	5367,007	0,8881	694,528
141,055	13,717	431,024	138,554	5913,948	5428,788	0,9192	485,159
120,217	15,307	432,404	168,106	6619,524	5613,618	0,8486	1005,905
100,409	15,350	425,083	198,369	6525,815	5532,787	0,8483	993,028
80,423	15,346	349,527	203,393	5364,626	4543,768	0,8475	820,858
60,502	15,369	269,404	208,701	4141,096	3507,457	0,8475	633,639
40,565	14,777	187,706	213,298	2773,072	2403,449	0,8685	369,622
20,418	14,960	103,605	218,434	1549,953	1238,897	0,8015	311,055



Obr. 3.14 Graf účinnosti při 80 % tahu

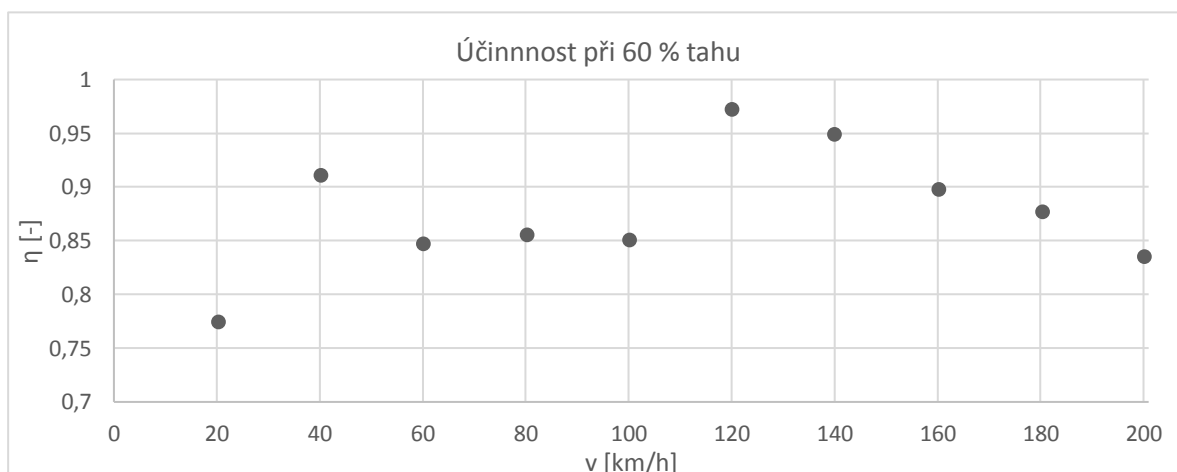


Obr. 3.15 Graf výkonových ztrát při 80 % tahu

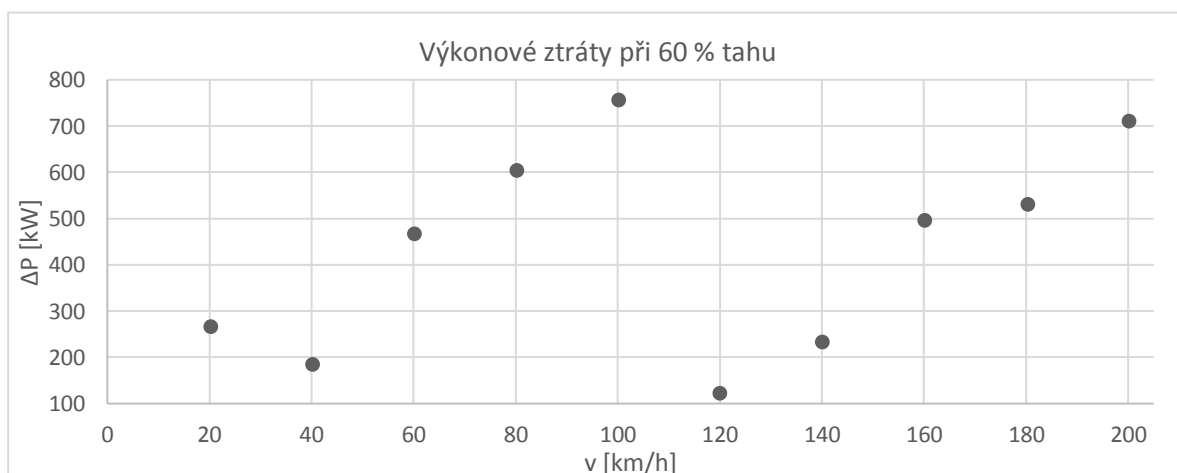
### 3.4.3 Naměřené hodnoty při 60 % tahu

Tab. 3.7 Naměřené a vypočítané hodnoty při 60 % tahu

v [km/h]	U <sub>t</sub> [kV]	I <sub>in</sub> [A]	F <sub>t</sub> [kN]	P <sub>p</sub> [kW]	P <sub>t</sub> [kW]	η [-]	ΔP [kW]
200,196	13,699	312,618	64,235	4282,916	3572,123	0,8348	710,793
180,367	13,919	307,499	74,819	4279,900	3748,605	0,8766	531,295
160,180	14,255	334,432	96,013	4767,805	4272,177	0,8975	495,628
140,002	13,550	332,779	109,984	4509,750	4277,203	0,9491	232,548
120,024	13,491	321,693	126,522	4340,471	4218,251	0,9723	122,219
100,168	15,371	327,637	153,846	5036,761	4280,683	0,8503	756,078
80,200	15,383	270,884	159,931	4167,588	3562,893	0,8555	604,695
60,141	15,213	198,713	153,016	3022,847	2556,273	0,8469	466,574
40,238	13,919	144,801	163,813	2016,029	1830,983	0,9107	185,046
20,248	15,421	76,457	162,226	1179,249	912,411	0,7742	266,838



Obr. 3.16 Graf účinnosti při 60 % tahu

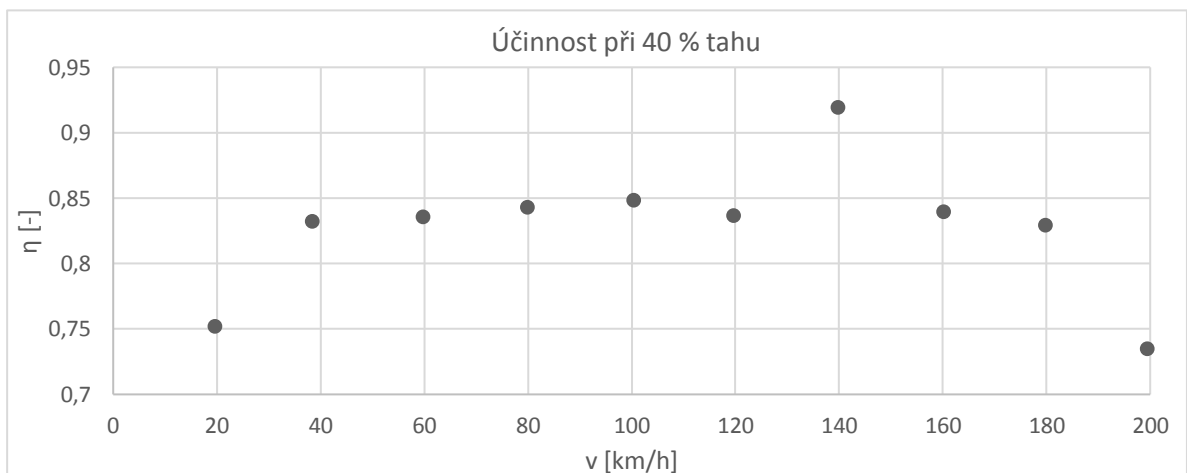


Obr. 3.17 Graf výkonových ztrát při 60 % tahu

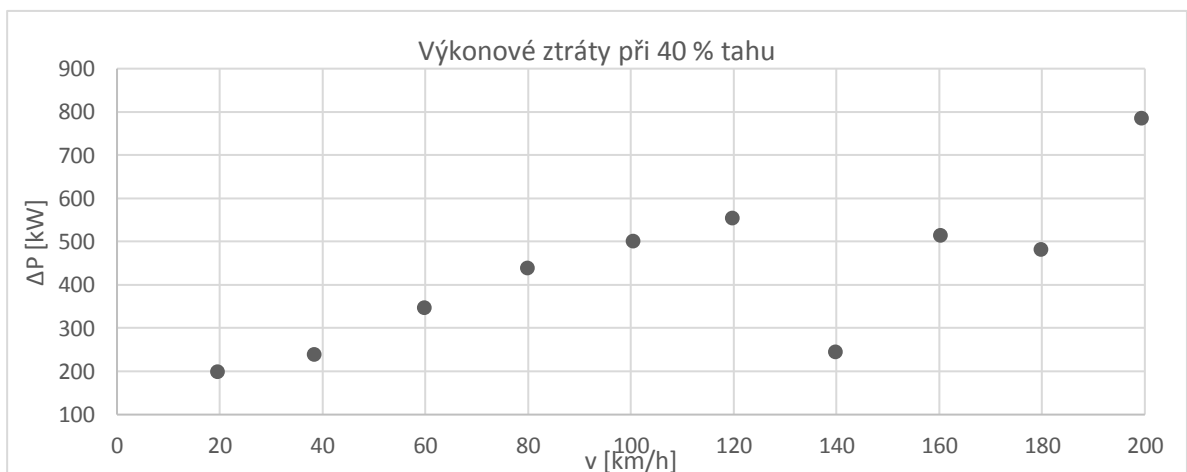
### 3.4.4 Naměřené hodnoty při 40 % tahu

Tab. 3.8 Naměřené a vypočítané hodnoty při 40 % tahu

v [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_t$ [kN]	$P_p$ [kW]	$P_t$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
199,382	13,978	211,293	39,155	2953,523	2168,584	0,7349	784,939
179,825	13,726	204,116	46,445	2802,161	2320,078	0,8292	482,083
160,198	14,708	216,667	60,062	3187,443	2672,768	0,8393	514,675
139,760	13,610	222,501	71,701	3028,387	2783,585	0,9195	244,802
119,663	15,423	219,882	85,339	3391,720	2836,725	0,8368	554,996
100,387	15,424	213,177	99,970	3288,395	2787,746	0,8482	500,649
79,890	15,405	180,943	105,815	2787,717	2348,172	0,8428	439,545
59,726	15,406	136,865	106,152	2108,846	1761,136	0,8356	347,710
38,364	15,415	92,180	110,913	1421,144	1182,033	0,8322	239,110
19,562	15,448	51,828	110,735	800,745	601,723	0,7519	199,023



Obr. 3.18 Graf účinnosti při 40 % tahu

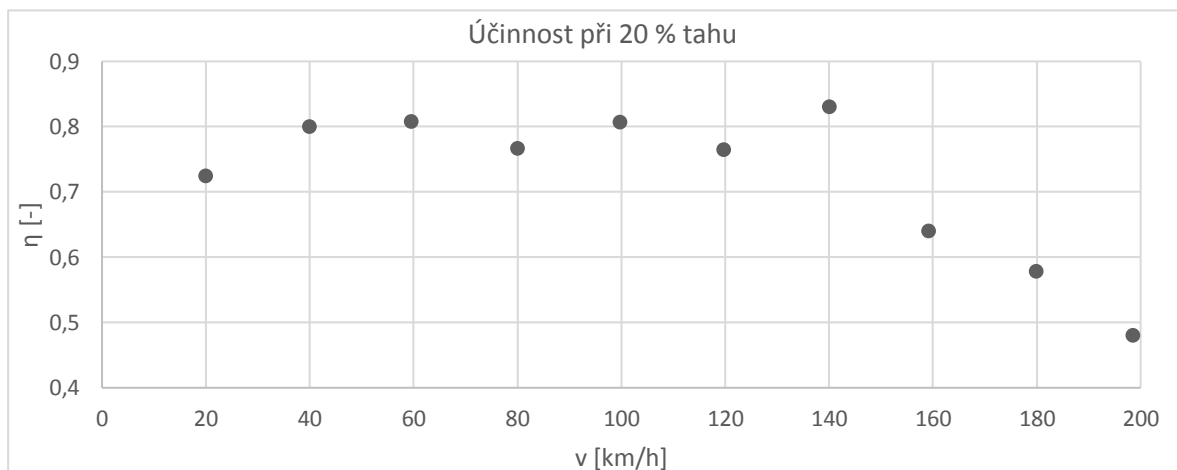


Obr. 3.19 Graf výkonových ztrát při 40 % tahu

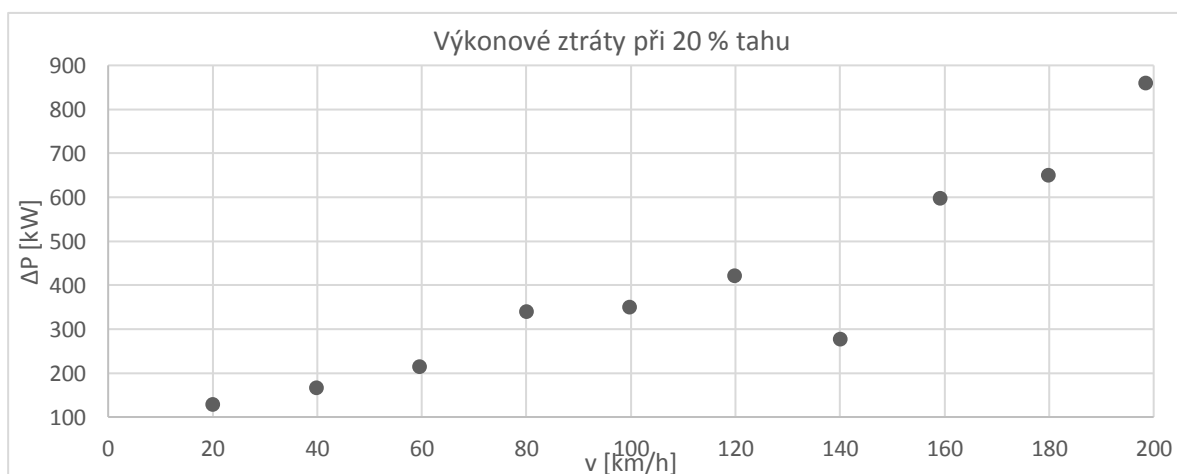
### 3.4.5 Naměřené hodnoty při 20 % tahu

Tab. 3.9 Naměřené a vypočítané hodnoty při 20 % tahu

v [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_t$ [kN]	$P_p$ [kW]	$P_t$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
198,446	13,913	118,494	14,322	1648,784	789,479	0,4798	859,305
179,826	13,908	110,673	17,791	1539,463	888,685	0,5781	650,778
159,121	14,211	116,884	24,054	1661,210	1063,190	0,6404	598,021
139,994	13,496	120,281	34,626	1623,450	1346,502	0,8299	276,948
119,757	15,423	115,674	40,975	1784,207	1363,069	0,7643	421,138
99,762	15,301	117,261	52,132	1794,473	1444,801	0,8068	349,672
79,957	15,411	94,225	50,107	1452,267	1112,907	0,7666	339,360
59,524	15,435	72,339	54,577	1116,695	902,195	0,8082	214,500
39,880	15,437	53,754	59,922	829,885	663,817	0,8002	166,067
19,936	15,396	30,103	60,585	463,520	335,523	0,7241	127,996



Obr. 3.20 Graf účinnosti při 20 % tahu

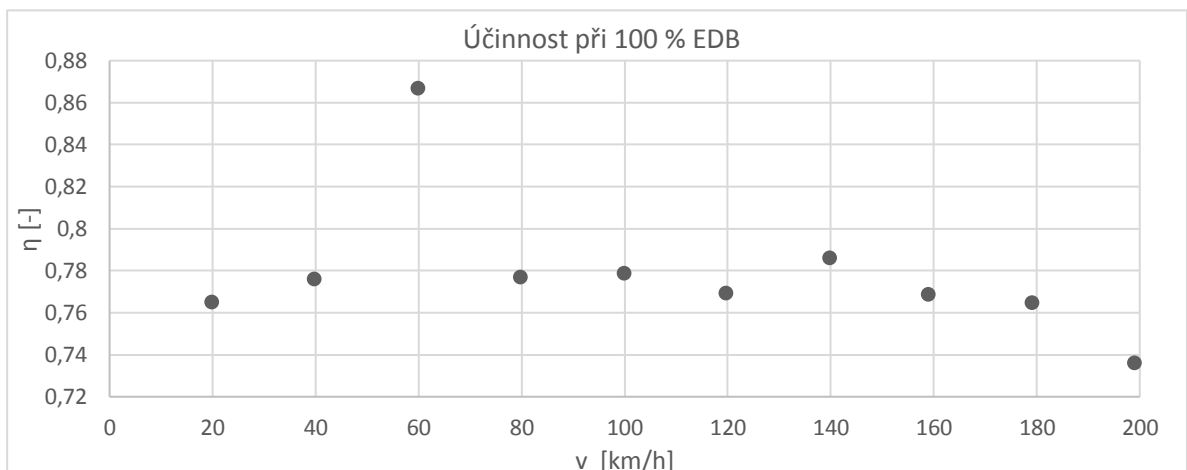


Obr. 3.21 Graf výkonových ztrát při 20 % tahu

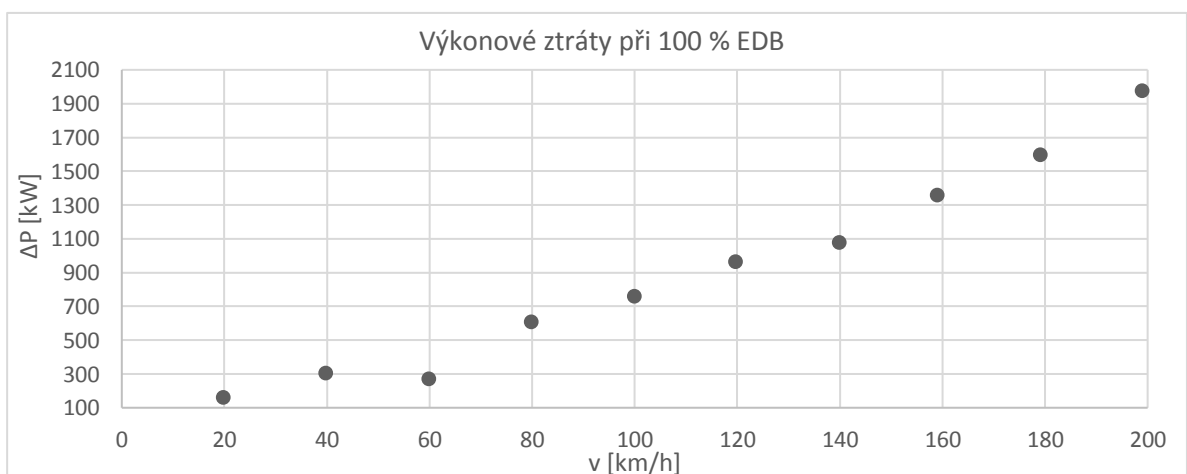
### 3.4.6 Naměřené hodnoty při 100 % EDB

Tab. 3.10 Naměřené a vypočítané hodnoty při 100 % EDB

$v$ [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_b$ [kN]	$P_R$ [kW]	$P_b$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
198,945	13,434	410,497	135,602	5515,616	7493,724	0,7360	1978,108
179,064	13,678	378,927	136,352	5182,911	6782,184	0,7648	1599,273
158,948	13,613	331,501	132,979	4512,933	5871,322	0,7687	1358,389
139,819	14,017	282,490	129,740	3960,147	5038,838	0,7862	1078,691
119,654	13,432	240,022	126,095	3224,357	4191,008	0,7694	966,651
99,899	13,471	198,505	123,744	2674,426	3433,836	0,7789	759,409
79,779	13,494	157,060	123,160	2119,642	2729,263	0,7768	609,620
59,812	15,359	115,505	123,229	1774,276	2047,354	0,8667	273,078
39,732	14,261	73,899	123,094	1053,879	1358,524	0,7758	304,644
19,764	15,383	33,942	124,332	522,174	682,572	0,7651	160,397



Obr. 3.22 Graf účinnosti při 100 % EDB

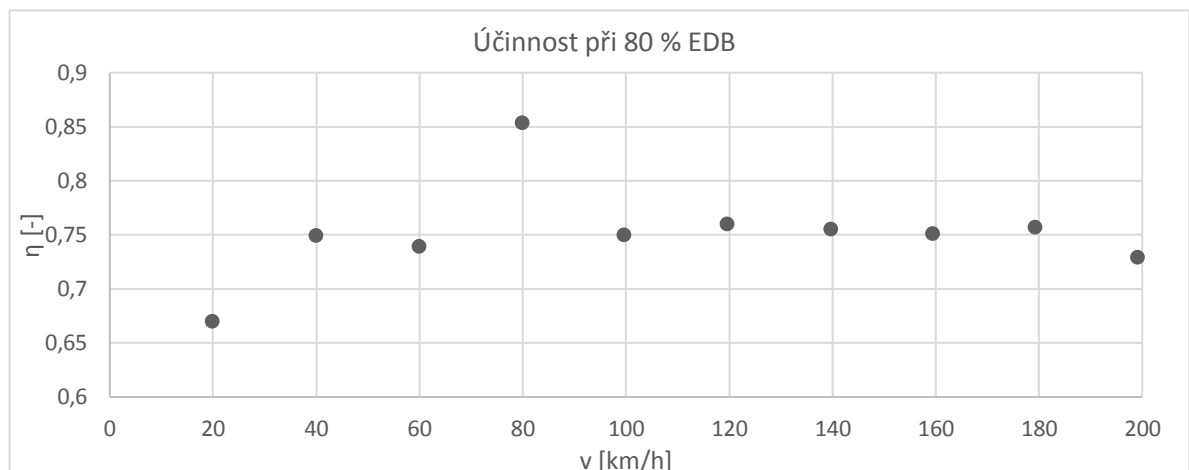


Obr. 3.23 Graf výkonových ztráty při 100 % EDB

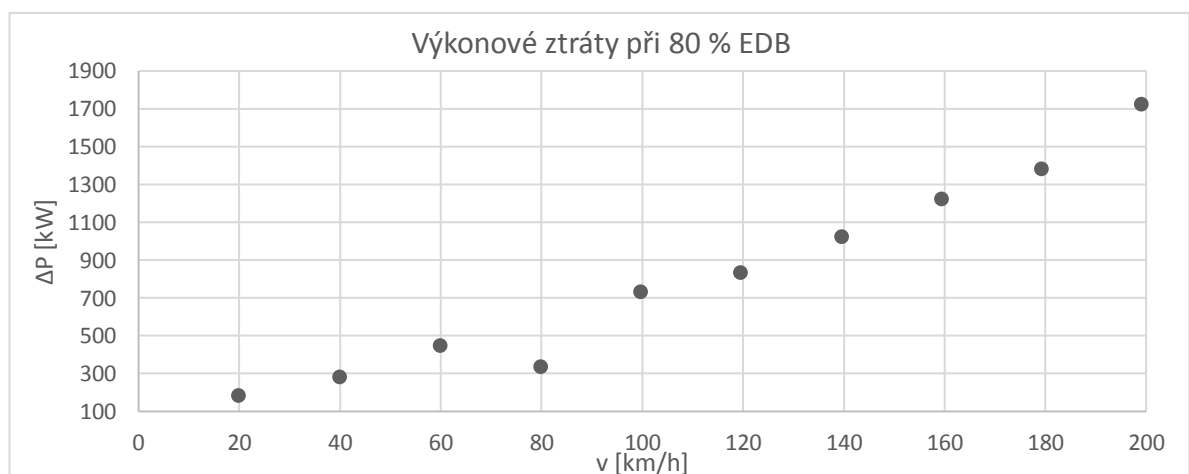
### 3.4.7 Naměřené hodnoty při 80 % EDB

Tab. 3.11 Naměřené a vypočítané hodnoty při 80 % EDB

$v$ [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_m$ [A]	$F_b$ [kN]	$P_R$ [kW]	$P_b$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
199,165	13,486	344,057	115,041	4640,139	6364,520	0,7292	1724,381
179,296	13,828	311,368	114,202	4306,437	5687,735	0,7571	1381,298
159,453	13,555	271,586	110,731	3681,693	4904,613	0,7509	1222,919
139,654	13,464	234,689	107,861	3160,199	4184,214	0,7553	1024,015
119,581	13,472	196,088	104,633	2642,065	3475,570	0,7603	833,505
99,704	13,512	162,681	105,856	2198,432	2931,720	0,7501	733,288
79,876	15,331	128,314	103,881	1967,531	2304,880	0,8538	337,349
59,981	13,489	94,569	103,552	1275,770	1725,307	0,7395	449,536
39,928	13,908	61,010	102,107	848,596	1132,455	0,7494	283,858
19,906	13,718	27,571	102,116	378,362	564,640	0,6701	186,278



Obr. 3.24 Graf účinnosti při 80 % EDB



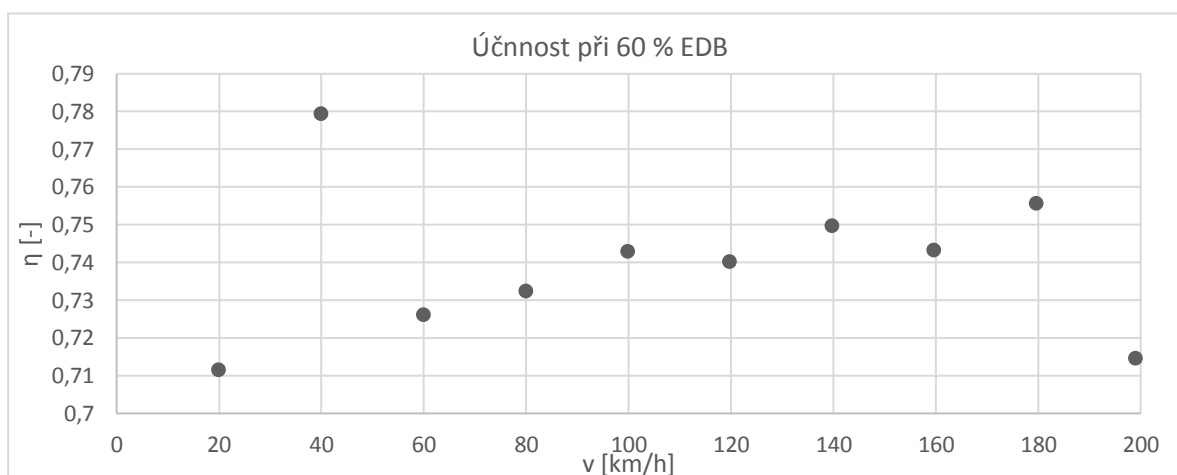
Obr. 3.25 Graf výkonových ztrát při 80 % EDB



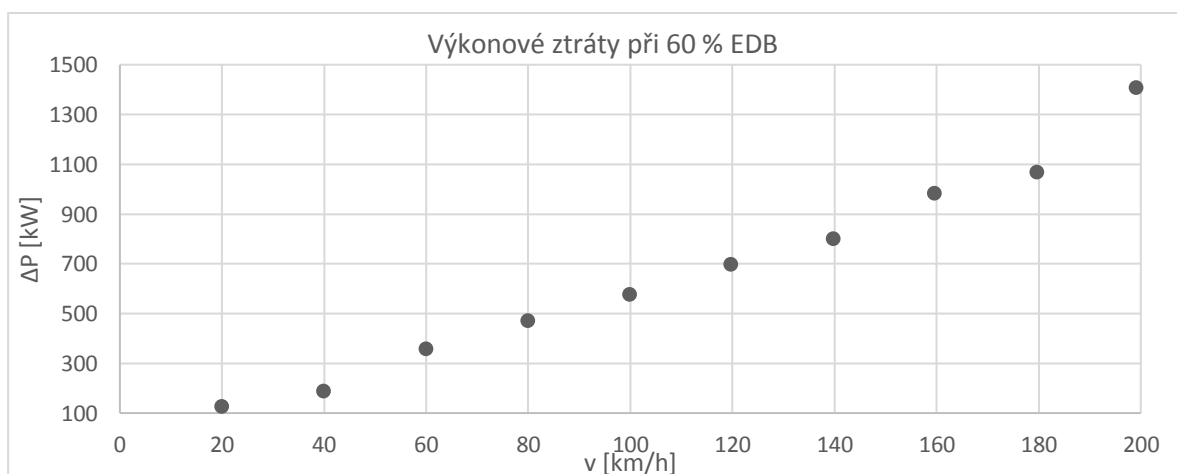
### 3.4.8 Naměřené hodnoty při 60 % EDB

Tab. 3.12 Naměřené a vypočítané hodnoty při 60 % EDB

$v$ [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_m$ [A]	$F_b$ [kN]	$P_R$ [kW]	$P_b$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
199,002	13,678	257,632	89,240	3524,503	4933,023	0,7147	1408,520
179,553	13,836	238,989	87,732	3306,693	4375,689	0,7557	1068,995
159,547	13,802	206,282	86,441	2847,201	3830,946	0,7433	983,745
139,738	13,593	176,956	82,672	2405,676	3208,993	0,7498	803,317
119,639	13,502	147,542	80,998	1992,477	2691,825	0,7403	699,348
99,802	13,629	122,290	80,970	1666,981	2244,708	0,7430	577,727
79,850	13,488	95,882	79,630	1293,460	1766,210	0,7324	472,750
59,895	13,466	70,561	78,668	950,308	1308,854	0,7262	358,546
39,886	14,673	45,843	77,901	672,913	863,094	0,7794	190,181
19,888	15,322	20,405	79,546	312,670	439,433	0,7116	126,763



Obr. 3.26 Graf účinnosti při 60 % EDB

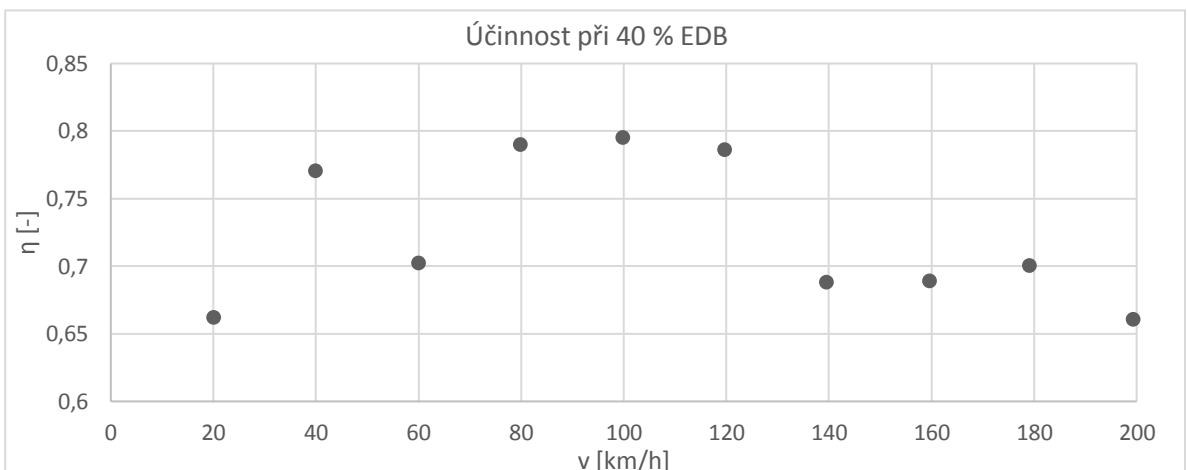


Obr. 3.27 Graf výkonových ztrát při 60 % EDB

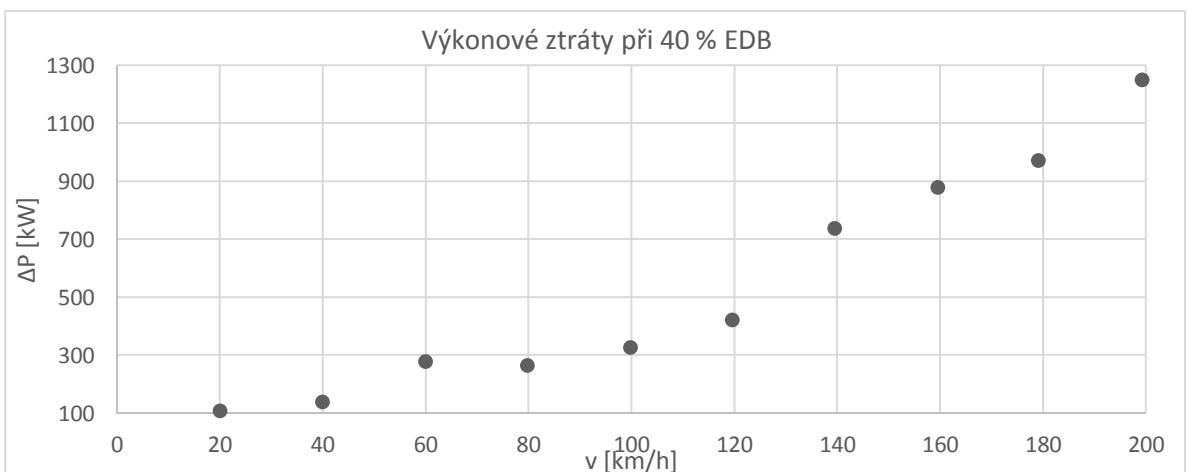
### 3.4.9 Naměřené hodnoty při 40 % EDB

Tab. 3.13 Naměřené a vypočítané hodnoty při 40 % EDB

v [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_{in}$ [A]	$F_b$ [kN]	$P_R$ [kW]	$P_b$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
199,286	13,508	179,789	66,445	2428,950	3678,178	0,6607	1249,228
179,065	13,937	163,038	65,239	2273,092	3245,022	0,7005	971,930
159,556	13,709	141,703	63,641	1942,994	2820,624	0,6890	877,630
139,549	13,499	120,202	60,901	1622,869	2360,739	0,6882	737,870
119,648	15,380	100,725	59,313	1549,347	1971,295	0,7863	421,947
99,799	15,336	82,341	57,304	1262,951	1588,569	0,7951	325,618
79,802	15,349	64,509	56,555	990,298	1253,652	0,7899	263,354
59,934	13,726	47,524	55,817	652,533	929,261	0,7022	276,728
39,939	15,376	30,319	54,549	466,216	605,164	0,7705	138,947
19,991	15,358	13,664	57,094	209,856	317,033	0,6620	107,177



Obr. 3.28 Graf účinnosti při 40 % brzdě

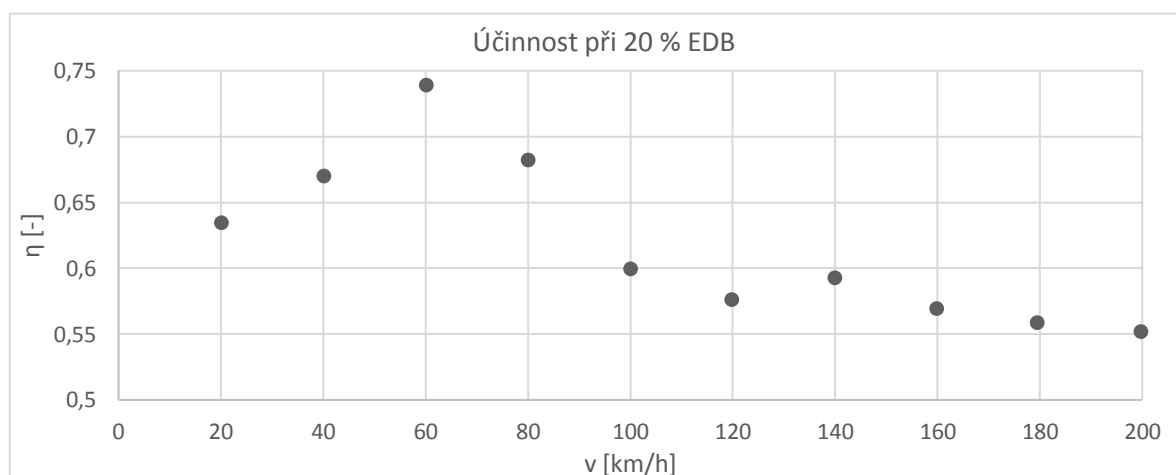


Obr. 3.29 Graf výkonových ztrát při 40 % EDB

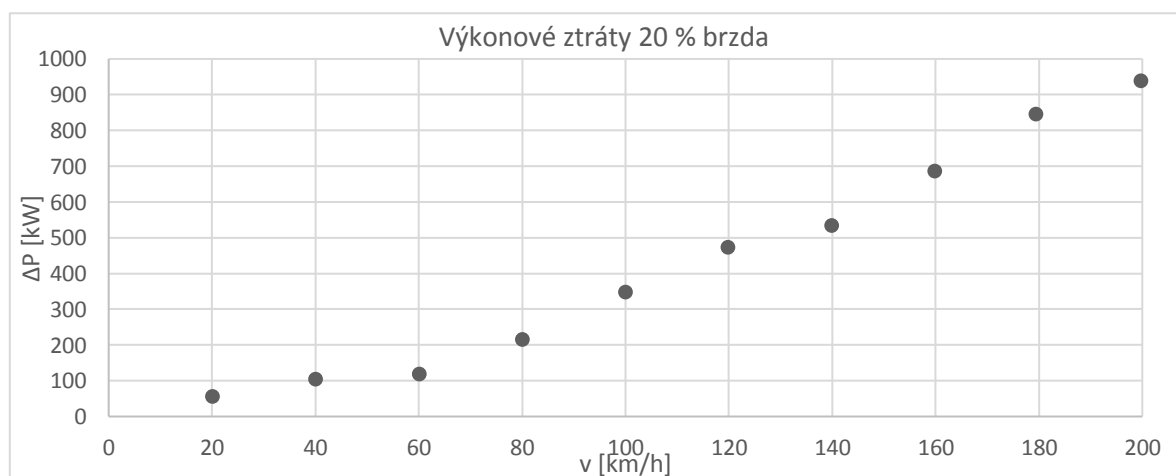
### 3.4.10 Naměřené hodnoty při 20 % EDB

Tab. 3.14 Naměřené a vypočítané hodnoty při 20 % EDB

$v$ [km/h]	$U_t$ [kV]	$I_m$ [A]	$F_b$ [kN]	$P_R$ [kW]	$P_b$ [kW]	$\eta$ [-]	$\Delta P$ [kW]
199,627	13,563	85,107	37,770	1154,540	2094,428	0,5518	939,887
179,364	13,544	79,078	38,495	1071,231	1917,928	0,5586	846,697
159,790	13,602	66,574	35,867	905,691	1591,978	0,5695	686,287
139,830	13,496	57,318	33,682	773,674	1308,284	0,5927	534,610
119,801	13,509	47,454	33,484	641,129	1114,291	0,5760	473,162
99,998	13,459	38,652	31,262	520,285	868,378	0,5997	348,093
79,966	15,388	30,052	30,564	462,504	678,912	0,6821	216,408
60,020	15,350	21,861	27,265	335,617	454,561	0,7392	118,944
40,019	15,352	13,807	28,494	211,993	316,751	0,6700	104,759
19,995	15,359	6,334	27,630	97,273	153,458	0,6343	56,185



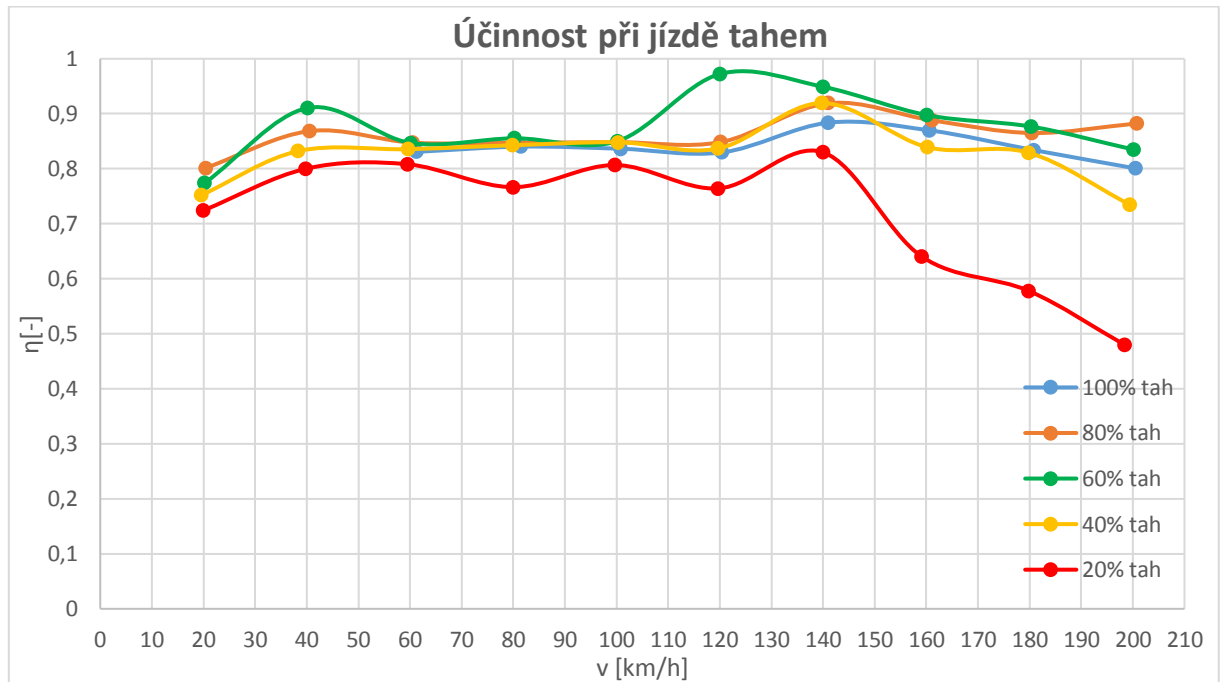
Obr. 3.30 Graf účinnosti při 20 % EDB



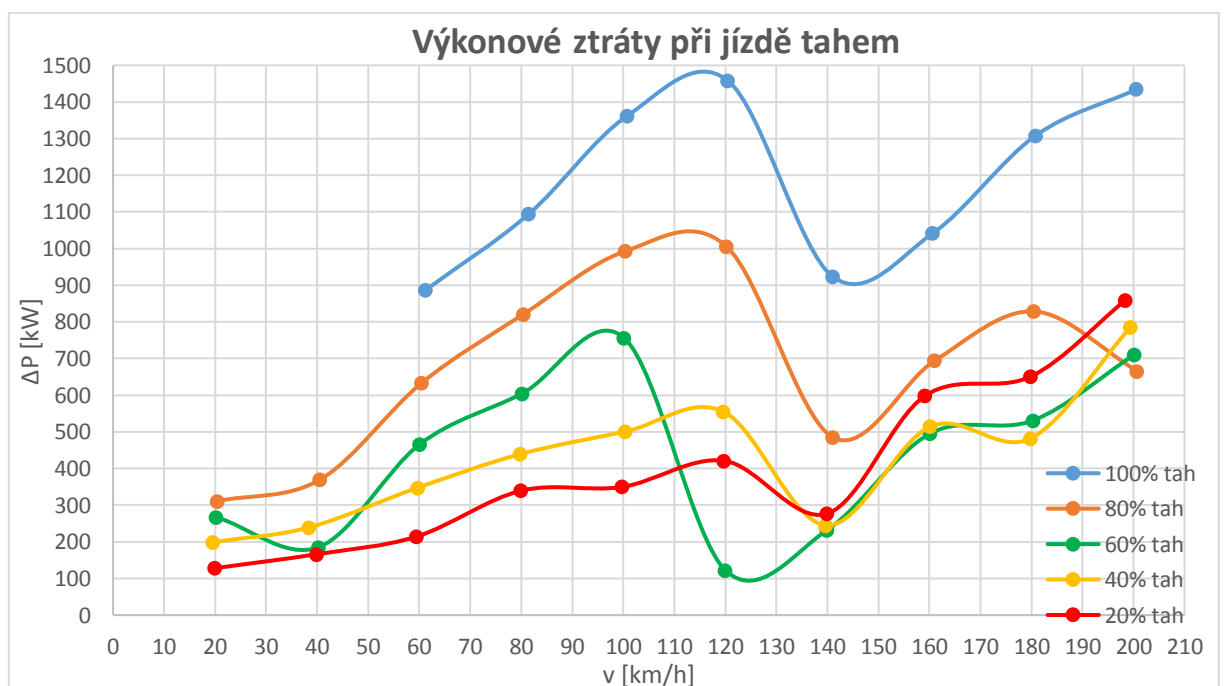
Obr. 3.31 Graf výkonových ztrát při 20 % EDB

### 3.4.11 Celkové shrnutí naměřených a vypočítaných hodnot

Následující dva grafy (obr. 3.32 a obr. 3.33) zobrazují výsledky měření při jízdě tahem. Z těchto grafů je patrné, že účinnost lokomotivy při jízdě tahem se pohybuje v rozmezí 0,4798 až 0,9723. Nejčastěji se účinnost pohybuje v rozmezí 0,8 až 0,9. Výkonové ztráty se pohybují při jízdě tahem v rozmezí 120 kW až 1,458 MW.

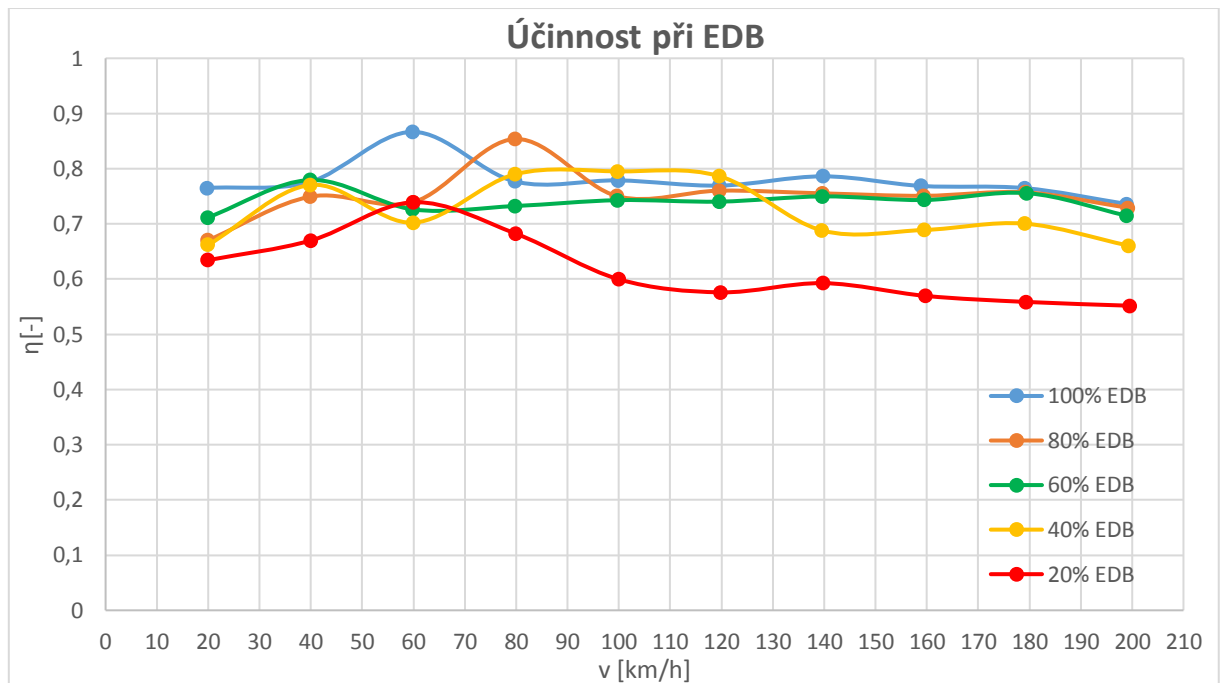


Obr. 3.32 Graf účinnosti při jízdě tahem

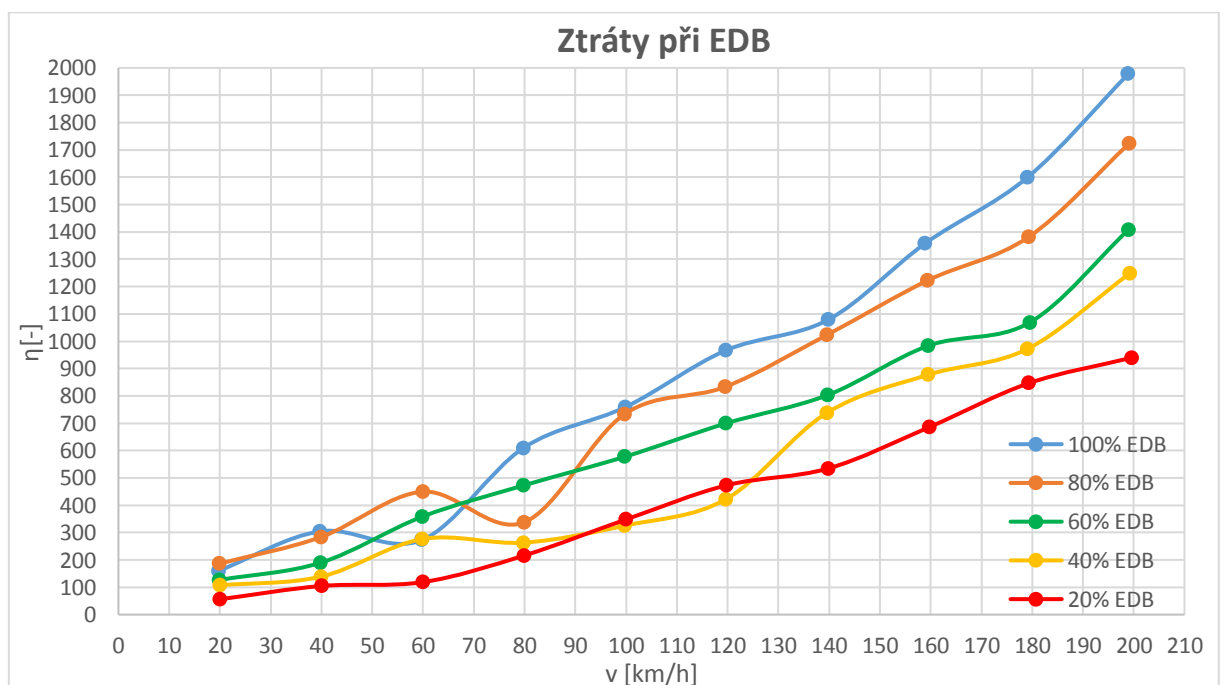


Obr. 3.33 Graf výkonových ztrát při jízdě tahem

Na následujících dvou grafech (obr. 3.34 a obr. 3.35) jsou zobrazeny celkové výsledky měření EDB. Z grafu účinnosti je vidět, že účinnost EDB se pohybuje v rozmezí 0,5518 až 0,8667. Z toho se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,7 až 0,8. Ztráty v režimu EDB jsou v rozmezí 56 kW až 1,978 MW.

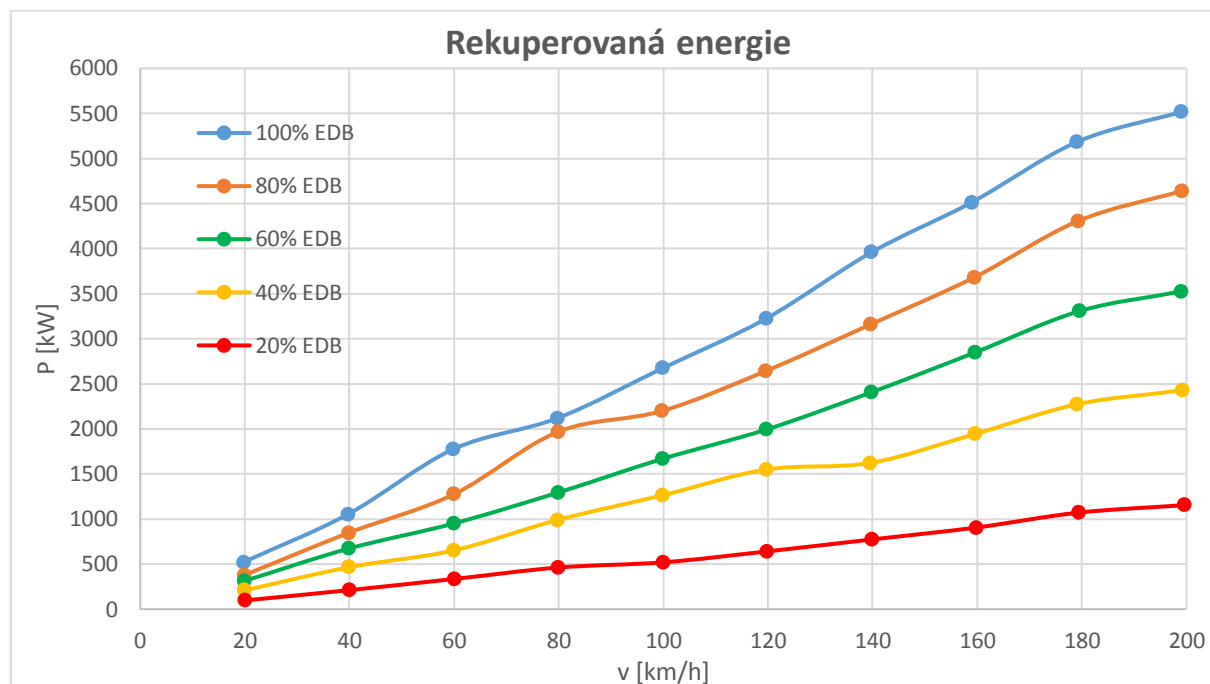


Obr. 3.34 Graf účinnosti při EDB



Obr. 3.35 Graf výkonových ztrát při EDB

Na následujícím grafu (*obr. 3.36*) je vidět, kolik energie se rekuperovalo v průběhu měření EDB. Rekuperovaná energie se pohybuje v rozmezí 97 kW až 5,516 MW.



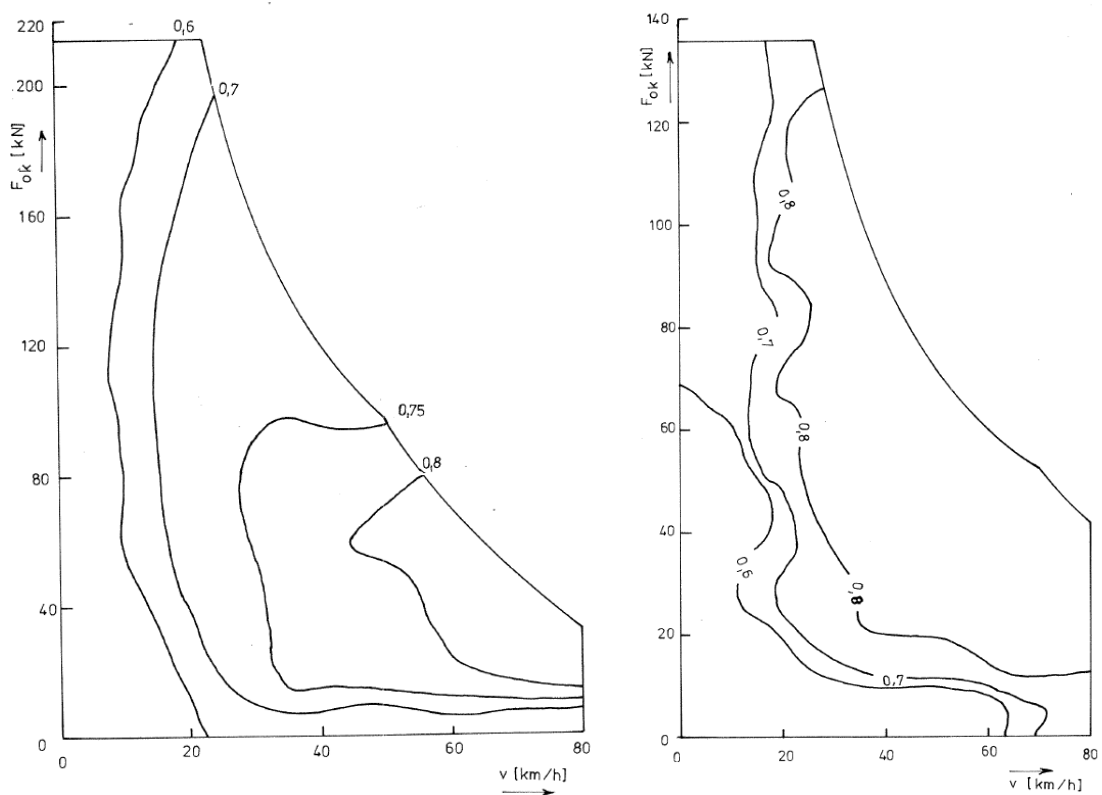
Obr. 3.36 Graf rekuperevané energie při měření charakteristik EDB

## 4 Účinnosti drážních vozidel

V této kapitole jsou uvedeny změřené účinnosti jiných drážních vozidel. Jedná se o lokomotivy 51Em, 56E, 70E a 109E1.

### 4.1 Lokomotiva 51Em

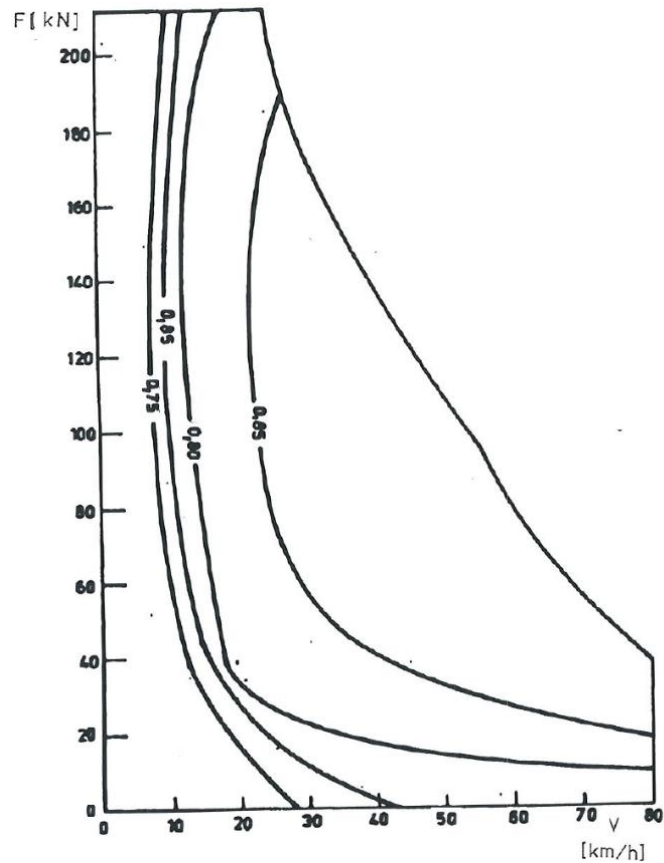
Jedná se o zmodernizovanou posunovací lokomotivu určenou pro Československo. Lokomotiva je na střídavý systém 25 kV 50 Hz. Maximální rychlost lokomotivy je 80 km/h a hodinovým výkonem 984 kW. Lokomotiva má 4 cize buzené stejnosměrné motory řízené pomocí pulzní regulace. Na *obr. 4.1* jsou zobrazeny izokřivky účinnosti v jízdě a v tahu.



Obr. 4.1 Účinnosti lokomotivy 51Em při jízdě tahem (vlevo) a při EDB (vpravo) [20]

## 4.2 Lokomotiva 56E

Tato lokomotiva vychází z konceptu zmodernizované lokomotivy řady 56Em a byla vyráběna pro Bulharský napájecí systém 25 kV 50 Hz. Obr. 4.2 ukazuje izokřivky účinnosti této lokomotivy.

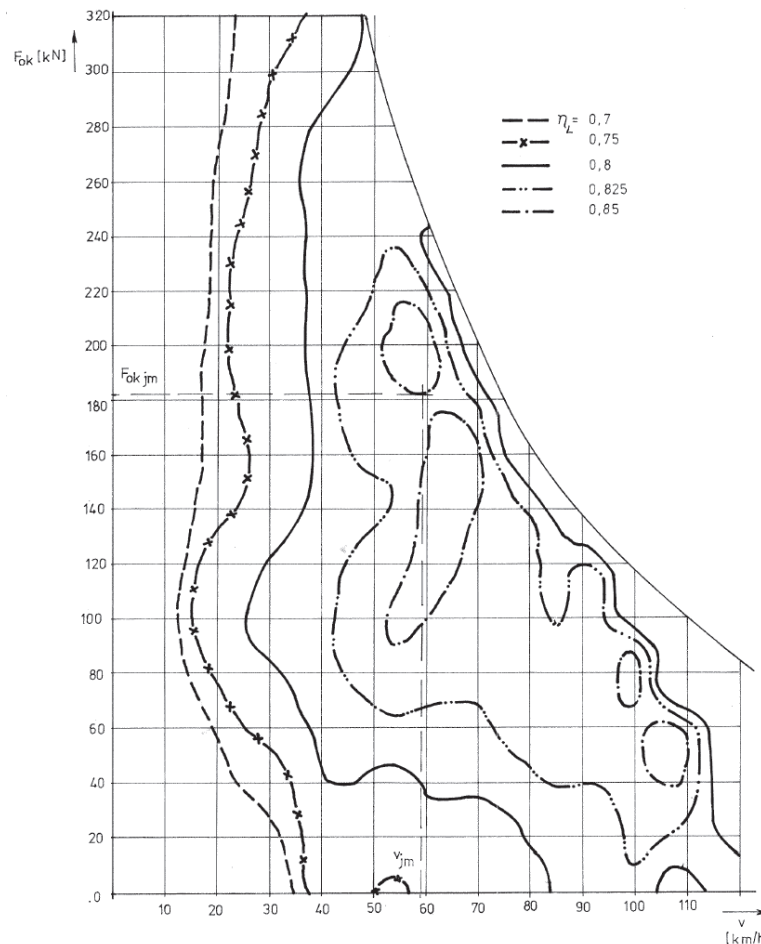


Obr. 4.2 Účinnost lokomotivy 56E [21]



### 4.3 Lokomotiva 70E

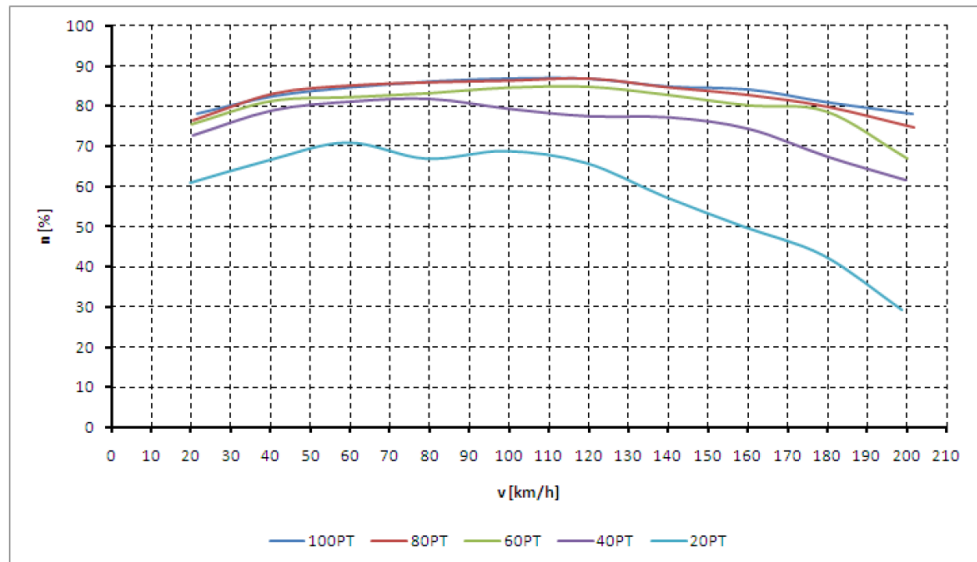
Lokomotivy této řady jsou určeny pro provoz na český střídavý systém 25 kV 50 Hz. Má čtyři cize buzené stejnosměrné lokomotivy o celkovém výkonu 3 000 kW. Motory jsou řízené pulzní regulací. Izokřivky účinnosti lokomotivy jsou na *obr. 4.3*.



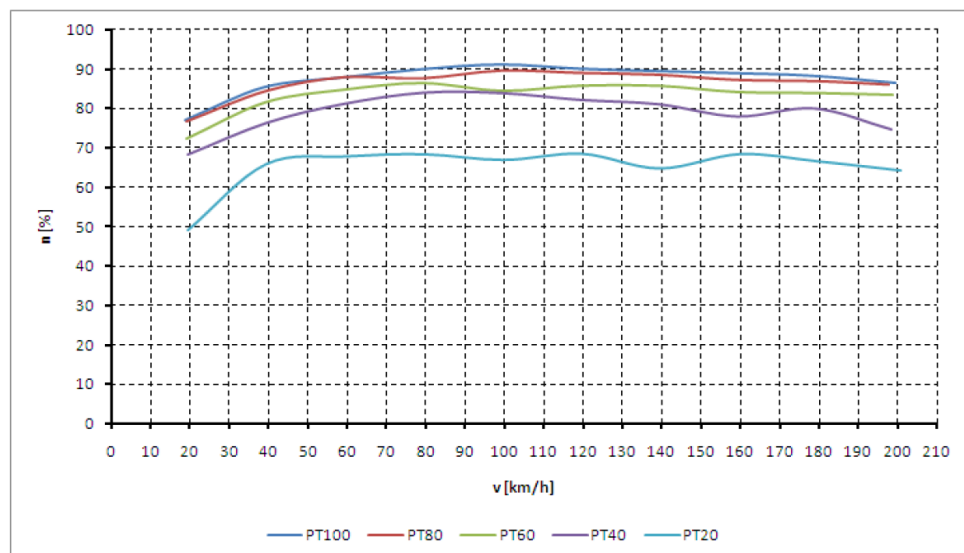
Obr. 4.3 Účinnost lokomotivy 70E [22]

### 4.4 Lokomotiva 109E1

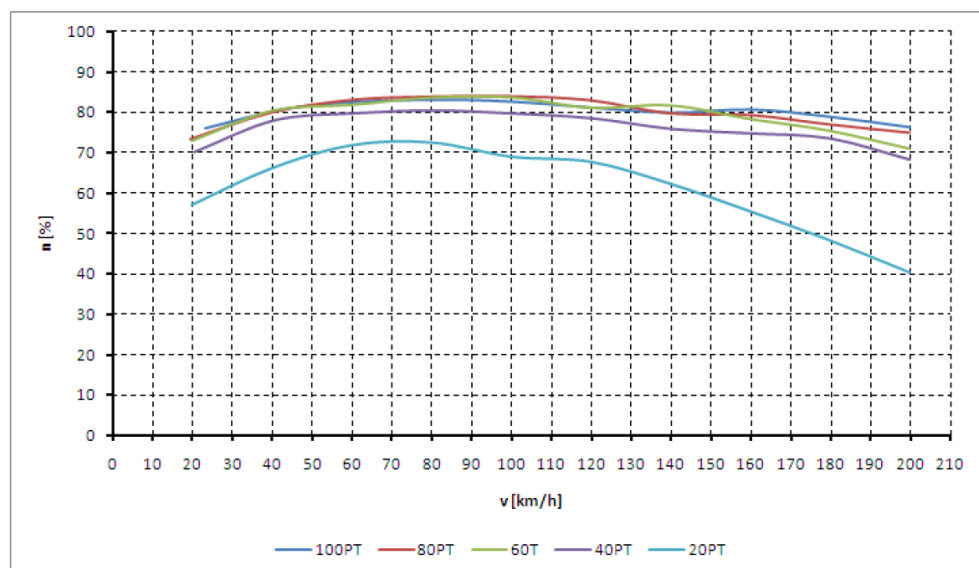
Lokomotiva 109E1 je tři systémová lokomotiva určené pro střídavé systémy 25 kV 50 Hz, 15 kV 16,7 Hz a stejnosměrný systém 3 kV. Lokomotiva má 4 asynchronní motory a její trvalý výkon je 6,4 MW. Řízení motorů se provádí pomocí napěťových střídačů, pro usměrnění střídavého proudu je využito pulzních usměrňovačů. Trakční transformátor má dvě odbočky pro dva střídavé systémy. Grafy účinnosti v závislosti na rychlosti a procentuálním tahu pro jednotlivé napájecí systémy jsou zobrazeny na *obr 4.4 až obr. 4.9*.



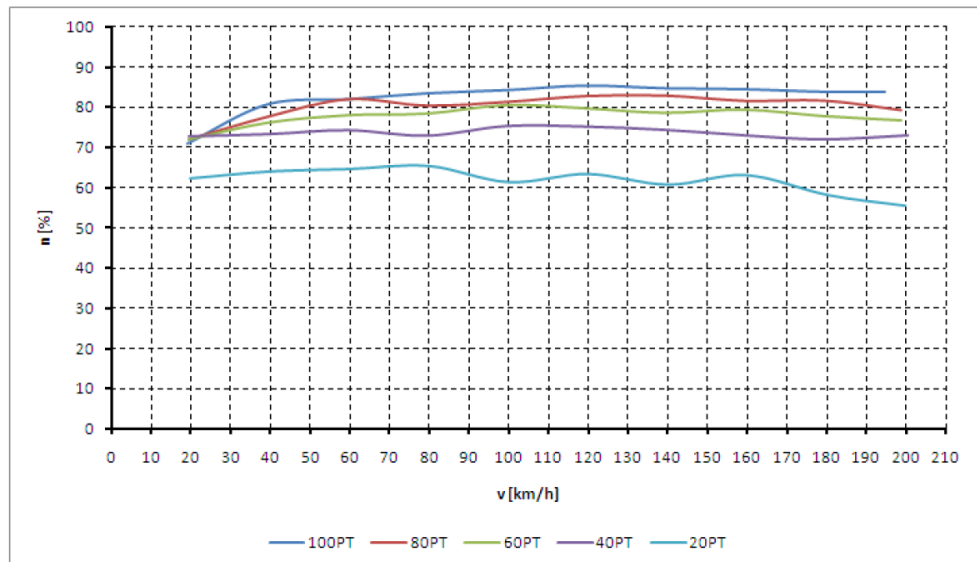
Obr. 4.4 Účinnost lokomotivy 109E1 na stejnosměrném systému 3 kV při jízdě tahem [23]



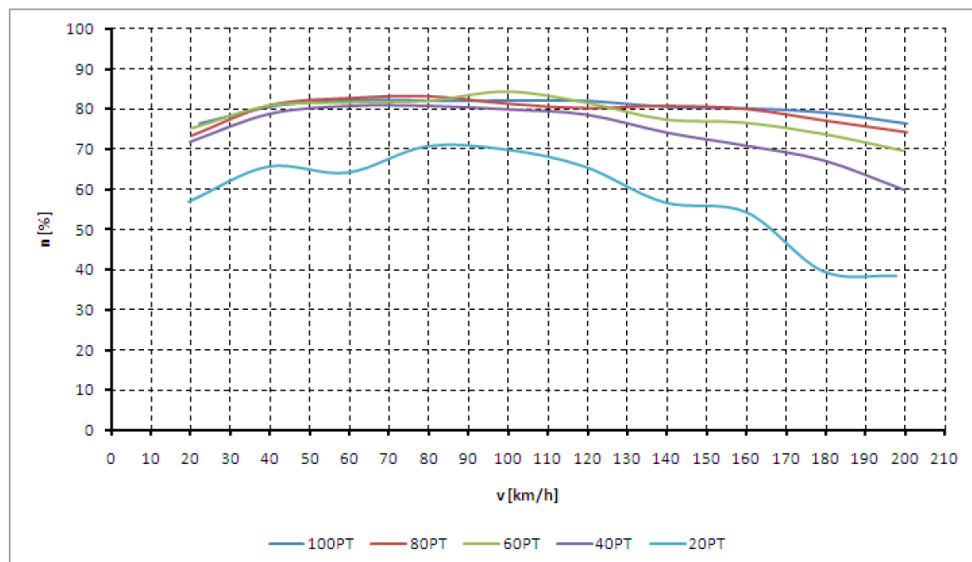
Obr. 4.5 Účinnost lokomotivy 109E1 na stejnosměrném systému 3 kV při EDB [23]



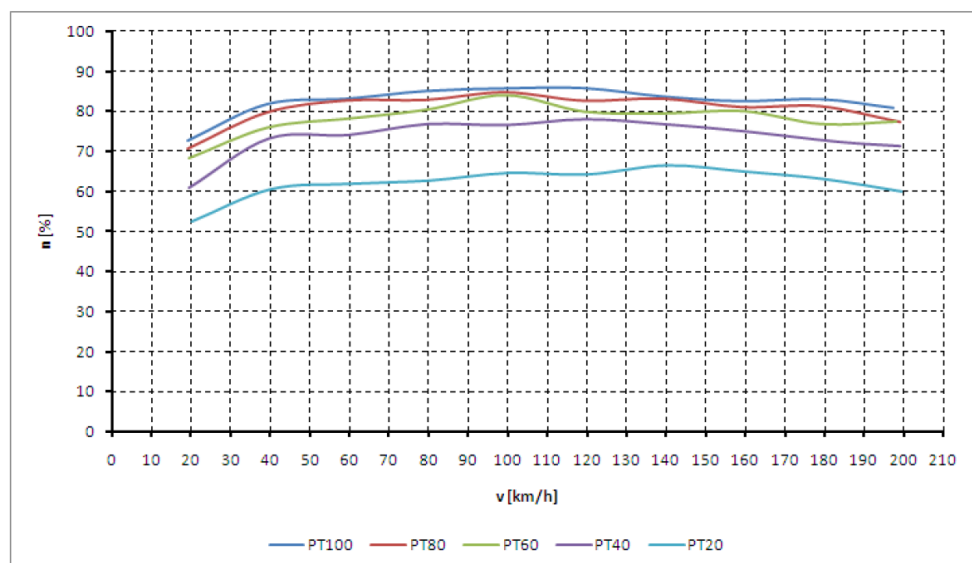
Obr. 4.6 Účinnost lokomotivy 109E1 na střídavém systému 25 kV 50 Hz při jízdě tahem [23]



Obr. 4.7 Účinnost lokomotivy 109E1 na střídavém systému 25 kV 50 Hz při EDB [23]



Obr. 4.8 Účinnost lokomotivy 109E1 na střídavém systému 15 kV 16,7 Hz při jízdě tahem [23]



Obr. 4.9 Účinnost lokomotivy 109E1 na střídavém systému 15 kV 16,7 Hz při EDB [23]

## Závěr

Nejmenší účinnost lokomotivy za jízdy tahem vyšla při 20 % poměrného tahu v rychlosti 200 km/h, a to 0,4798. Ztráty při této účinnosti vyšly 859,3 kW. Nejvyšší ztráty v režimu měření tahu vyšly při 100 % tahu za rychlosti 120 km/h, a to 1 458,5 kW, účinnost v tomto bodě vyšla 0,8298. Nejvyšší účinnost 0,9723 vyšla v rychlosti 120 km/h při 60 % tahu. Ztráty pro tento bod vyšly 122,2 kW, což je nejmenší hodnota ztrát, která vyšla pro měření při jízdě tahem.

V režimu měření EDB vyšla nejvyšší účinnost při 100 % EDB v 60 km/h, a to 0,8667. Ztráty pro tento bod jsou 273,1 kW. Nejvyšší ztráty vyšly 1 978,1 kW při 100 % brzdě za rychlosti 200 km/h. Účinnost vyšla v tomto bodě 0,7361. Nejnižší účinnost vyšla 0,5518 při 20 % brzdě a 200 km/h. Ztráty pro tento bod jsou 939,9 kW.

Při celkovém pohledu na výsledky měření je vidět, že malá účinnost nemusí znamenat vysoké ztráty. Daleko více záleží na zadaném procentním tahu, tzn. na požadovaném výkonu. Např. při 100% tahu vyšly ztráty ve všech bodech značně nad ostatními ztrátami. Pokud by byl požadavek na snížení ztrát lokomotivy (na zvýšení účinnosti), bylo by vhodné věnovat pozornost tomuto režimu jízdy, kde i malé zlepšení účinnosti se výrazně projeví na snížení ztrát. Vysoké ztráty vyšly i při měření EDB ve vysokých rychlostech. V režimu EDB se nejedná o ztráty, které by musel provozovatel zahrnovat mezi provozní náklady. Jsou to ztráty vzniklé při rekuperaci energie lokomotivou, takže snižují velikost zrekuperované energie. Proto je na uvážení zlepšování účinnosti EDB při velkých výkonech. Záleží na tom, jestli je napájecí soustava schopna tyto výkony zpracovat.

Účinnosti lokomotivy 109E3 v porovnání s posunovací lokomotivou 51Em vychází následovně. Vezmeme v potaz např. rychlost 20 km/h. Lokomotiva 51Em má v této rychlosti účinnost v rozmezí 0,6 až 0,7, kdežto lokomotiva 109E3 má při této rychlosti účinnost v rozmezí 0,7 až 0,8. Celkové porovnání účinnosti těchto dvou lokomotiv je obtížné, protože se jedná o zcela rozdílné lokomotivy konstruované za jiným účelem. Lokomotiva 51Em je konstruovaná jako posunovací lokomotiva, čemuž odpovídá i malá maximální rychlost a vysoká tažná síla v malých rychlostech. Lokomotiva 109E3 je konstruovaná jako vysoce vysokorychlostní vysoce výkonná lokomotiva, čemuž odpovídá vysoká tažná síla.

Při porovnání účinností lokomotiv 109E3 a 70E vychází převážně u lokomotivy 109E3 účinnost vyšší. Například při rychlosti 20 km/h má lokomotiva 70E účinnost v rozmezí přibližně 0,7 až 0,75, lokomotiva 109E3 má rozsah účinnosti 0,7 až 0,8. Ale například v bodě, kde má lokomotiva 70E účinnost nevyšší a to 0,85 (bod 60 km/h, 106 kN) má lokomotiva 109E3 účinnost 0,84. V podstatě má lokomotiva 70E v některých bodech vyšší účinnost, ale ve většině bodů je účinnost nižší, než je účinnost lokomotivy 109E3.

Poslední porovnání účinností je s lokomotivou 109E1. Tyto účinnosti lze při pohledu na grafy (*obr. 4.4 až obr. 4.9* zobrazují účinnost lokomotivy 109E1 v různých režimech, *obr. 3.31 a obr. 3.33* zobrazují účinnost lokomotivy 109E3) snadno porovnat, protože se jedná o shodné zpracování výsledků a o podobné lokomotivy. Při zkoumání grafů účinností těchto lokomotiv vychází lokomotivě 109E3 lepší účinnost při jízdě v tahu, ale horší účinnost při EDB. Lepší účinnost lokomotivy 109E3 při jízdě v tahu je způsobená nejen tím, že se jedná o novější lokomotivu (lepší vlastnosti spínacích prvků apod.), ale i tím, že je dimenzovaná na jeden napájecí systém, tím pádem lze jednotlivé elektrické součásti nadimenzovat přesně na požadované parametry.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
- [2] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II*. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001. ISBN 80-7082-814-5.
- [3] JANSÁ, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1980.
- [4] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 1: Úvod - Transformátory*. Praha: Academia, 1980. ISBN 21-045-80.
- [5] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - Synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982. ISBN 21-055-82.
- [6] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika: Projektování výkonových polovodičových měničů – vybrané statě*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-653-0.
- [7] SKALA, Bohumil. *Měření a zkoušení elektrických zařízení: využití počítače pro řízení experimentů a sběr dat*. Vydání: 2., upravené. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0546-6.
- [8] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-447-3.
- [9] *Data Sheet, Doc. No. 5SYA 1414-06 02-2014: HiPak IGBT Module 5SNA 3600E170300* [online]. , 9 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/db0003db004291/c125739900722305c12573950022c1a0.aspx?productLanguage=cz&country=CZ&tabKey=2>
- [10] HAAF, Peter a Jon HARPER. *Understanding Diode Reverse Recovery and its Effect on Switching Losses* [online]. , 11 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/technical-articles/Understanding-Diode-Reverse-Recovery-and-Its-Effect-on-Switching-Losses.pdf>
- [11] *Data Sheet - High Voltage Diode 5SDD 31K6000* [online]. , 5 [cit. 2017-01-27]. Dostupné z: <http://new.abb.com/semiconductors/cs/diodes/standard-diode>
- [12] ACAR, Fatih, Sadik OZDEMIR a Ugur Savas SELAMOGULLARI. *Comparison of Efficiency Measurement Techniques for Electric Vehicle Traction Inverters* [online]. , 4 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7352501/>
- [13] ŠPALEK, Petr. *Elektrická třísystémová lokomotiva řady 380 pro ČD* [online]. , 9 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.railvolution.net/czechraildays/2005/seminare/>
- [14] *Lokomotiva Emil Zátopek Německo* [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/lokomotiva-emil-zatopek-nemecko/?from=prod>
- [15] Lokomotivy. *Letmo PJ Č. Budějovice* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://fsczocb.sweb.cz/lokomotivy/lokomotivy.html>
- [16] *Losses in a DC Generator and DC Motor* [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.electricaleasy.com/2014/01/losses-in-dc-machine.html>
- [17] *Technical catalogue: Current sensors, Voltage sensors* [online]. , 132 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://abbonlinesales.com/Data%20Sheets/PDFs/Control%20Products/1SBC140152C0203%20-%20Cat%20capteurs-br.pdf>
- [18] *Fluke i3000s Flex AC Current Clamp: Technical data* [online]. , 2 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://en-us.fluke.com/products/all-accessories/fluke-i3000s-flex-24.html>
- [19] *DataSheet: NI 9205* [online]. , 14 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9205.html>

- [20] DANZER, Jiří, Václav KRAUS, Jaroslav ŠKUBAL a Aleš VOBORNÍK. *Trakční a energetické zkoušky lokomotivy 51Em*. 1991. Číslo dokumentu: Lo 866-TZ-91
- [21] ŠKUBAL Jaroslav, Václav KRAUS a Aleš VOBORNÍK. *Trakční a energetické zkoušky lokomotivy 56E*. 1991. Číslo dokumentu: Lo 879-TZ-91
- [22] ČTVRTNÍK, Václav, Jiří DANZER a Jaroslav ŠKUBAL. *Měření energetických vlastností lokomotivy 70E*. 1985. Číslo dokumentu: Lo 866-TZ-91.
- [23] BUŘIČ, Martin a Jaroslav ŠKUBAL, ed. *Měření účinnosti elektrické lokomotivy typu 109E*. 2013. Číslo dokumentu: Lo 1248-TZ-13.

## Přílohy

## Příloha A – tabulky naměřených hodnot

## Tabulka naměřených hodnot při 100 % tahu

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>					
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]					
262	200,763	-84,435	14,976	398,276	527	141,164	-176,94	14,321	549,499
263	200,506	-93,74	15,486	425,084	528	141,196	-176,688	13,476	538,423
263	200,506	-93,74	15,486	425,084	529	141,091	-177,208	14,054	556,358
264	200,288	-91,84	14,779	390,661	529	141,091	-177,208	14,054	556,358
265	200,177	-96,339	15,045	453,293	530	141,07	-175,526	13,751	545,9
266	200,279	-105,924	15,516	506,959	531	141,067	-177,02	13,989	540,673
266	200,279	-105,924	15,516	506,959	532	141,044	-175,999	14,546	557,948
267	200,435	-109,365	14,68	509,747	533	141,025	-176,353	14,236	543,041
268	200,649	-106,067	14,525	510,494	533	141,025	-176,353	14,236	543,041
268	200,649	-106,067	14,525	510,494	534	141,016	-177,43	14,148	544,199
269	200,722	-107,28	15,532	520,423	535	140,989	-176,431	14,248	558,942
270	200,83	-107,335	14,59	499,856	536	140,94	-176,59	13,326	543,014
271	200,977	-108,828	14,297	505,73	537	140,882	-176,175	15,29	550,139
272	200,932	-108,256	15,528	512,441	537	140,882	-176,175	15,29	550,139
273	200,994	-107,449	14,928	496,59	669	120,491	-210,983	15,563	558,08
274	200,801	-96,156	15,21	401,572	671	120,485	-212,117	15,209	541,54
275	200,671	-98,442	15,299	443,694	673	120,504	-212,34	15,223	549,009
362	180,883	-127,417	15,484	528,073	674	120,483	-211,312	15,243	550,801
363	180,977	-129,812	15,112	514,36	674	120,483	-211,312	15,243	550,801
364	180,907	-127,358	15,406	523,607	675	120,428	-210,378	15,651	561,845
365	180,848	-124,839	15,518	530,264	675	120,428	-210,378	15,651	561,845
366	180,91	-126,684	15,097	515,365	677	120,48	-211,839	15,373	553,559
367	180,878	-127,473	15,454	528,853	678	120,556	-213,313	15,558	562,911
368	180,898	-128,938	15,412	529,565	678	120,556	-213,313	15,558	562,911
369	180,743	-128,9	14,85	517,673	679	120,512	-212,015	15,101	546,425
370	180,886	-130,371	15,563	532,287	681	120,424	-211,351	15,497	561,164
371	180,82	-128,8	13,621	530,398	681	120,424	-211,351	15,497	561,164
372	180,759	-128,909	14,063	517,301	682	120,46	-211,101	15,117	546,551
373	180,79	-129,397	13,639	535,066	683	120,526	-211,979	15,471	558,651
374	180,753	-128,716	13,384	527,376	684	120,464	-212,466	15,448	561,116
374	180,753	-128,716	13,384	527,376	685	120,478	-212,347	15,039	545,964
375	180,364	-128,206	15,19	520,047	686	120,459	-211,592	15,492	561,575
379	180,806	-128,852	14,707	538,313	687	120,465	-212,337	15,354	557,73
446	161,383	-153,956	13,498	542,498	738	101,123	-246,798	15,339	543,503
447	161,115	-151,464	14,141	541,692	739	100,946	-246,14	15,137	531,529
448	160,953	-153,118	14,775	531,322	740	100,966	-248,106	15,542	545,132
449	160,892	-152,54	14,392	544,984	740	100,966	-248,106	15,542	545,132
450	160,948	-152,712	13,441	542,127	741	100,89	-248,255	15,248	537,988
450	160,948	-152,712	13,441	542,127	741	100,89	-248,255	15,248	537,988
451	160,879	-151,526	14,671	529,703	742	100,852	-249,31	15,21	535,134
452	160,787	-153,91	15,525	544,029	743	100,795	-249,469	15,609	551,798
453	160,725	-153,966	15,242	536,522	743	100,795	-249,469	15,609	551,798
454	160,536	-153,113	15,089	527,963	744	100,73	-247,814	15,148	535,675
455	160,484	-152,761	15,43	547,496	745	100,753	-247,736	15,249	538,843
456	160,387	-154,983	14,095	536,709	746	100,681	-247,837	15,546	549,142
457	160,253	-154,799	14,634	534,78	746	100,681	-247,837	15,546	549,142
458	160,166	-153,091	15,399	551,701	747	100,68	-247,479	15,04	532,65
459	160,118	-151,736	14,79	533,583	748	100,682	-248,954	15,416	540,331
460	160,132	-151,94	15,133	535,394	750	100,688	-247,367	15,042	531,385
526	141,191	-175,522	14,699	553,036	751	100,666	-247,517	15,451	543,523
526	141,191	-175,522	14,699	553,036	821	81,425	-254,32	15,555	452,333
					822	81,491	-252,995	15,047	438,54
					823	81,418	-252,629	15,482	444,821



823	81,418	-252,629	15,482	444,821
824	81,394	-253,822	15,499	451,646
825	81,421	-253,451	15,076	437,896
825	81,421	-253,451	15,076	437,896
826	81,419	-252,964	15,359	445,161
827	81,446	-253,875	15,477	452,625
827	81,446	-253,875	15,477	452,625
828	81,44	-253,028	15,099	439,404
829	81,405	-252,959	15,327	445,542
830	81,489	-253,432	15,576	452,068
831	81,425	-253,995	15,123	438,107
832	81,558	-253,549	15,435	446,165
833	81,487	-253,301	15,477	451,387
834	81,44	-253,672	15,047	438,217
1074	61,089	-254,265	15,207	335,435
1074	61,089	-254,265	15,207	335,435
1075	61,23	-254,505	15,615	345,8
1075	61,23	-254,505	15,615	345,8

1076	61,308	-254,976	15,226	340,936
1076	61,308	-254,976	15,226	340,936
1077	61,309	-256,489	15,192	337,403
1077	61,309	-256,489	15,192	337,403
1077	61,309	-256,489	15,192	337,403
1078	61,29	-254,965	15,673	347,309
1078	61,29	-254,965	15,673	347,309
1079	61,244	-253,582	15,239	340,595
1079	61,244	-253,582	15,239	340,595
1080	61,339	-255,636	15,233	337,765
1080	61,339	-255,636	15,233	337,765
1081	61,348	-257,641	15,587	347,511
1081	61,348	-257,641	15,587	347,511
1082	61,315	-253,74	15,274	334,682
1082	61,315	-253,74	15,274	334,682

Tabulka naměřených hodnot při 80 % tahu

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
225	201,329	-89,858	13,426	399,908
226	201,085	-89,682	13,727	411,245
227	200,961	-88,807	13,712	403,487
227	200,961	-88,807	13,712	403,487
228	200,856	-88,211	13,705	399,265
229	200,821	-87,437	14,024	410,484
230	200,73	-87,218	13,587	402,722
231	200,751	-91,16	13,299	403,54
231	200,751	-91,16	13,299	403,54
232	200,662	-88,633	13,693	415,092
233	200,663	-88,184	13,356	404,869
234	200,505	-86,924	14,717	405,238
234	200,505	-86,924	14,717	405,238
235	200,568	-86,575	13,988	414,685
236	200,516	-85,995	13,983	403,302
237	200,472	-87,752	13,518	406,626
289	180,527	-101,572	14,173	414,054
290	180,572	-103,496	13,902	425,45
290	180,572	-103,496	13,902	425,45
291	180,551	-105,991	13,304	414,8
291	180,551	-105,991	13,304	414,8
292	180,533	-105,058	15,146	417,427
293	180,575	-104,701	14,257	425,635
293	180,575	-104,701	14,257	425,635
294	180,476	-102,679	14,748	411,98
294	180,476	-102,679	14,748	411,98
295	180,272	-104,886	14,063	416,276
295	180,272	-104,886	14,063	416,276
296	180,49	-105,021	15,494	426,08
296	180,49	-105,021	15,494	426,08
297	180,554	-101,451	15,062	411,226
297	180,554	-101,451	15,062	411,226
341	161,448	-120,928	14,809	425,166
342	161,253	-121,123	13,368	413,963
342	161,253	-121,123	13,368	413,963
343	161,106	-119,409	13,557	425,443
343	161,106	-119,409	13,557	425,443
344	161,157	-119,03	15,189	425,373

345	160,978	-118,68	14,699	414,512
345	160,978	-118,68	14,699	414,512
346	160,943	-119,485	15,267	424,027
346	160,943	-119,485	15,267	424,027
347	160,943	-120,706	14,993	425,995
347	160,943	-120,706	14,993	425,995
348	160,947	-120,293	14,17	414,577
349	161,026	-120,135	13,891	424,054
349	161,026	-120,135	13,891	424,054
516	140,576	-138,672	14,305	438,459
517	140,788	-139,304	13,708	429,793
517	140,788	-139,304	13,708	429,793
518	140,777	-137,506	13,271	426,279
518	140,777	-137,506	13,271	426,279
519	140,953	-140,932	14,044	438,393
519	140,953	-140,932	14,044	438,393
520	140,991	-139,965	14,462	432,711
520	140,991	-139,965	14,462	432,711
521	141,193	-138,258	13,231	421,934
521	141,193	-138,258	13,231	421,934
522	141,294	-137,129	13,632	434,636
522	141,294	-137,129	13,632	434,636
523	141,282	-138,126	13,675	432,184
523	141,282	-138,126	13,675	432,184
524	141,453	-138,329	13,255	424,186
525	141,354	-135,978	13,583	432,908
647	120,131	-169,981	15,099	428,364
647	120,131	-169,981	15,099	428,364
648	120,121	-168,457	15,361	434,795
649	120,165	-165,849	15,515	439,76
649	120,165	-165,849	15,515	439,76
650	120,231	-168,049	15,104	427,995
650	120,231	-168,049	15,104	427,995
651	120,283	-168,088	15,275	430,725
651	120,283	-168,088	15,275	430,725
652	120,357	-169,364	15,557	439,126
653	119,997	-168,96	15,124	427,704
653	119,997	-168,96	15,124	427,704
654	120,329	-168,282	15,356	429,629
655	120,409	-167,416	15,614	438,666

655	120,409	-167,416	15,614	438,666
656	120,225	-166,9	15,169	428,49
704	100,458	-199,379	15,565	431,973
705	100,405	-199,765	15,274	422,695
706	100,393	-198,43	15,151	419,124
706	100,393	-198,43	15,151	419,124
707	100,441	-197,523	15,565	430,888
707	100,441	-197,523	15,565	430,888
708	100,37	-198,662	15,29	424,707
708	100,37	-198,662	15,29	424,707
709	100,469	-199,78	15,167	418,581
709	100,469	-199,78	15,167	418,581
710	100,397	-197,353	15,554	430,464
711	100,362	-197,655	15,345	426,452
711	100,362	-197,655	15,345	426,452
712	100,391	-198,733	15,118	418,192
713	100,41	-197,289	15,526	429,249
713	100,41	-197,289	15,526	429,249
757	80,587	-204,632	15,607	357,262
758	80,491	-204,721	15,284	349,718
758	80,491	-204,721	15,284	349,718
759	80,48	-205,495	15,214	345,296
759	80,48	-205,495	15,214	345,296
760	80,47	-203,955	15,601	354,892
761	80,417	-203,429	15,322	350,017
761	80,417	-203,429	15,322	350,017
762	80,417	-202,461	15,181	344,414
763	80,341	-201,273	15,562	354,103
763	80,341	-201,273	15,562	354,103
764	80,38	-202,853	15,391	350,857
765	80,394	-204,251	15,087	343,978
765	80,394	-204,251	15,087	343,978
766	80,415	-203,792	15,566	353,502
767	80,369	-202,092	15,416	350,535
767	80,369	-202,092	15,416	350,535
768	80,361	-200,863	15,116	343,269
812	60,818	-211,527	15,265	268,042
813	60,756	-209,126	15,59	273,644
814	60,725	-209,665	15,339	269,964
815	60,562	-209,777	15,146	265,825
816	60,565	-209,812	15,628	272,834
817	60,494	-207,736	15,435	271,492

818	60,454	-208,916	15,164	265,14
819	60,516	-209,326	15,458	270,842
820	60,459	-208,441	15,569	272,068
821	60,44	-207,845	15,025	265,252
822	60,386	-209,132	15,418	268,496
823	60,401	-208,924	15,609	273,137
824	60,359	-207,709	15,14	266,306
825	60,404	-208,082	15,305	267,223
826	60,361	-206,355	15,689	272,935
827	60,325	-206,835	15,127	267,265
871	40,843	-215,591	15,171	185,528
872	40,744	-212,979	13,694	191,053
873	40,613	-212,946	13,562	190,035
873	40,613	-212,946	13,562	190,035
874	40,758	-214,636	14,908	185,441
875	40,633	-213,143	15,524	189,084
875	40,633	-213,143	15,524	189,084
876	40,52	-211,76	14,734	189,143
877	40,52	-212,792	15,133	185,037
878	40,511	-212,618	13,707	188,037
879	40,482	-213,204	14,505	189,234
880	40,447	-213,452	15,155	184,406
880	40,447	-213,452	15,155	184,406
881	40,472	-214,598	15,332	187,536
882	40,398	-213,304	15,627	190,598
883	40,401	-212,201	15,143	184,646
926	20,498	-220,082	15,357	103,93
928	20,538	-219,089	15,624	105,155
929	20,434	-219,681	13,476	103,543
930	20,43	-217,839	15,164	101,782
931	20,375	-218,604	15,652	104,824
932	20,395	-218,576	15,427	103,812
933	20,391	-218,432	15,202	101,853
933	20,391	-218,432	15,202	101,853
934	20,385	-218,987	15,599	104,824
935	20,33	-217,721	15,467	104,338
936	20,41	-217,759	14,243	102,222
937	20,42	-217,46	13,693	104,827
937	20,42	-217,46	13,693	104,827
938	20,463	-218,149	15,48	104,156
939	20,392	-218,238	15,124	102,126

Tabulka naměřených hodnot při 60 % tahu

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
136	200,076	-63,899	13,704	316,634
136	200,076	-63,899	13,704	316,634
137	200,152	-63,237	13,437	309,279
138	200,181	-64,116	13,633	316,193
138	200,181	-64,116	13,633	316,193
139	200,117	-64,339	13,658	314,469
140	200,227	-65,472	13,264	307,18
140	200,227	-65,472	13,264	307,18
141	200,207	-64,348	13,694	315,371
142	200,217	-63,261	14,13	313,656
143	200,285	-63,018	13,521	306,99
144	200,226	-63,516	14,187	315,659
145	200,264	-64,623	13,547	312,397
145	200,264	-64,623	13,547	312,397

146	200,232	-64,333	14,481	306,585
147	200,212	-64,731	14,025	315,709
148	200,191	-64,995	13,459	311,985
188	180,713	-75,49	14,969	301,33
189	180,536	-74,022	14,271	307,698
190	180,546	-77,97	13,674	312,935
190	180,546	-77,97	13,674	312,935
191	180,458	-76,069	13,516	304,719
192	180,342	-73,393	14,337	305,343
193	180,368	-75,957	14,027	313,869
194	180,377	-75,034	13,543	305,279
195	180,309	-74,624	13,811	304,224
196	180,266	-74,352	13,873	312,486
197	180,275	-74,075	13,931	304,895
197	180,275	-74,075	13,931	304,895
198	180,239	-74,653	14,31	303,818

199	180,22	-72,162	13,773	312,642
200	180,259	-73,709	13,313	305,187
201	180,222	-74,447	13,428	304,101
202	180,288	-73,918	14,249	311,127
240	161,264	-94,766	14,44	332,851
241	161,106	-96,067	14,695	339,665
242	160,8	-99,659	13,657	330,495
243	160,667	-96,839	13,838	330,454
244	160,438	-97,745	13,996	341,088
244	160,438	-97,745	13,996	341,088
245	160,222	-101,329	13,565	333,725
246	159,941	-97,556	13,945	330,869
247	159,894	-95,645	14,775	339,53
248	159,823	-95,239	14,378	333,221
248	159,823	-95,239	14,378	333,221
249	159,78	-94,501	13,857	328,512
250	159,782	-94,943	14,635	339,471
251	159,748	-95,798	14,669	335,074
252	159,771	-92,917	14,413	329,23
252	159,771	-92,917	14,413	329,23
253	159,795	-93,318	14,677	337,621
418	140,195	-111,891	13,469	333,29
419	140,105	-109,872	13,3	327,645
420	139,998	-111,709	13,717	336,978
420	139,998	-111,709	13,717	336,978
421	140,077	-109,883	13,673	334,749
422	139,892	-110,126	13,265	326,734
423	139,9	-110,589	13,599	334,422
424	139,95	-109,33	14,04	335,941
425	139,953	-109,6	13,457	327,256
426	140,016	-109,317	13,616	333,598
427	139,999	-108,88	13,743	337,113
428	139,933	-109,354	13,248	328,958
429	139,985	-108,894	13,54	332,901
430	139,968	-108,955	13,734	337,6
431	140,031	-109,851	13,246	329,341
432	140,03	-109,777	13,432	330,953
471	120,539	-128,322	13,734	324,301
473	120,206	-129,16	13,443	320,845
474	120,1	-128,568	13,74	325,3
475	120,025	-125,883	13,33	317,91
476	119,981	-125,694	13,377	317,623
477	120,003	-127,794	13,679	327,091
478	120,02	-126,031	13,264	319,477
479	119,929	-126,074	13,414	319,602
480	119,963	-126,234	13,687	326,725
481	119,9	-126,738	13,342	319,097
482	119,915	-126,524	13,371	317,101
483	119,934	-126,118	13,679	327,31
484	119,927	-125,19	13,331	319,702
485	119,973	-124,978	13,308	317,24
486	119,939	-124,515	13,661	326,077
531	100,231	-155,153	15,1	327,115
532	100,228	-155,181	15,369	327,502
533	100,197	-153,635	15,661	335,101
534	100,123	-152,177	15,208	326,614
535	100,225	-155,1	15,292	326,742
536	100,216	-154,799	15,573	334,584
537	100,16	-154,477	15,251	326,66
538	100,239	-154,457	15,302	324,472

539	100,191	-152,811	15,599	333,063
540	100,183	-152,001	15,253	326,039
541	100,109	-152,916	15,274	323,139
542	100,195	-155,96	15,618	331,208
543	100,11	-154,186	15,337	325,135
544	100,088	-153,074	15,23	322,467
545	100,096	-152,255	15,693	331,353
546	100,141	-152,678	15,297	326,101
547	100,126	-154,515	15,254	322,536
592	80,2	-159,343	15,277	266,384
593	80,268	-159,504	15,576	274,835
594	80,181	-160,91	15,408	271,715
595	80,215	-159,478	15,065	266,173
596	80,222	-159,928	15,642	274,851
597	80,178	-161,313	15,428	272,029
598	80,169	-160,292	15,187	266,49
599	80,215	-159,168	15,614	274,521
600	80,245	-159,009	15,346	272,495
601	80,218	-159,966	15,229	266,668
602	80,239	-159,826	15,645	274,23
603	80,182	-159,126	15,438	272,65
604	80,181	-159,678	15,06	266,682
605	80,117	-159,969	15,69	274,001
606	80,178	-159,716	15,376	273,421
607	80,185	-161,676	15,143	267,001
659	60,181	-153,204	15,532	197,801
660	60,138	-153,133	15,68	202,28
661	60,146	-153,563	15,235	196,409
662	60,116	-152,712	15,387	197,809
663	60,129	-153,322	15,638	201,865
664	60,189	-152,563	15,209	196,57
664	60,189	-152,563	15,209	196,57
665	60,119	-153,339	15,414	197,086
666	60,14	-152,125	15,677	201,834
667	60,122	-152,809	15,27	197,251
667	60,122	-152,809	15,27	197,251
668	60,126	-153,172	15,305	196,643
669	60,154	-152,749	15,712	202,086
670	60,124	-154,168	15,247	197,126
671	60,116	-153,989	15,359	196,578
672	60,146	-152,526	13,74	201,481
672	60,146	-152,526	13,74	201,481
722	40,337	-163,246	15,267	146,915
723	40,269	-162,542	13,468	144,663
724	40,293	-162,827	13,281	142,767
725	40,216	-165,083	15,181	146,864
726	40,213	-163,566	13,524	144,558
727	40,152	-162,967	13,651	142,499
728	40,16	-163,189	13,986	146,619
729	40,203	-162,612	13,439	143,877
730	40,161	-164,236	15,119	142,586
731	40,215	-163,674	14,584	146,714
732	40,165	-162,181	13,515	143,807
733	40,249	-164,048	13,381	143,364
734	40,268	-164,784	13,913	147,181
735	40,28	-165,442	13,397	144,223
736	40,33	-164,052	13,567	143,827
737	40,261	-164,849	13,951	147,431
738	40,274	-165,529	13,399	143,729
786	20,397	-162,206	15,188	75,412

787	20,326	-162,317	15,642	77,702
788	20,298	-162,954	15,457	77,086
789	20,282	-162,07	15,198	75,5
790	20,258	-163,014	15,652	77,444
791	20,239	-162,794	15,347	76,381
792	20,15	-162,154	15,284	75,33
793	20,199	-162,108	15,712	77,771

794	20,279	-161,713	15,385	76,15
795	20,208	-162,014	15,246	75,471
796	20,182	-162,23	15,729	77,814
797	20,23	-162,273	15,215	75,975
798	20,273	-161,836	15,408	75,861
799	20,179	-162,411	15,63	77,585
800	20,213	-161,296	15,226	75,379

Tabulka naměřených hodnot při 40 % tahu

t	v	Ft	Utr	Itr
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
205	199,266	-37,992	13,216	207,522
206	199,32	-39,856	13,568	211,402
207	199,354	-39,324	13,748	213,322
207	199,354	-39,324	13,748	213,322
208	199,357	-38,796	14,302	206,692
209	199,375	-39,593	13,837	212,131
210	199,303	-38,895	13,956	213,646
211	199,216	-39,76	13,957	207,87
212	199,417	-38,387	14,053	213,113
214	199,407	-39,067	14,102	207,686
215	199,337	-39,189	14,806	213,761
216	199,501	-38,832	13,798	213,287
216	199,501	-38,832	13,798	213,287
217	199,503	-39,701	14,213	208,379
218	199,52	-39,784	14,562	213,982
255	180,311	-48,55	13,711	206,408
256	180,235	-48,826	13,353	200,947
256	180,235	-48,826	13,353	200,947
257	180,049	-47,327	13,518	201,272
258	179,988	-48,1	13,925	205,939
258	179,988	-48,1	13,925	205,939
259	180,007	-47,467	13,362	201,7
260	179,996	-45,621	13,427	202,923
261	179,707	-47,781	13,7	207,714
262	179,691	-45,887	14,786	203,886
263	179,577	-44,443	14,065	202,026
264	179,562	-44,922	14,108	207,52
264	179,562	-44,922	14,108	207,52
265	179,534	-45,116	13,447	203,624
266	179,558	-43,969	13,361	202,447
267	179,511	-45,363	13,81	207,522
269	179,507	-44,337	13,381	201,637
305	160,62	-60,652	14,448	214,059
306	160,463	-60,675	14,855	219,7
307	160,31	-62,045	14,516	214,728
308	160,182	-59,515	14,529	214,698
309	159,997	-60,266	15,054	220,785
310	160,176	-59,965	14,458	214,087
311	159,991	-58,984	14,92	214,972
312	160,153	-59,722	14,979	219,776
312	160,153	-59,722	14,979	219,776
313	159,931	-59,078	14,346	214,089
423	139,766	-70,754	13,799	225,918
424	139,662	-71,956	13,377	221,64
424	139,662	-71,956	13,377	221,64
425	139,764	-70,709	13,437	219,676
425	139,764	-70,709	13,437	219,676
426	139,668	-72,617	13,666	224,826

426	139,668	-72,617	13,666	224,826
427	139,848	-70	13,457	222,45
427	139,848	-70	13,457	222,45
428	139,838	-71,272	14,403	218,75
429	139,756	-73,046	13,704	224,26
429	139,756	-73,046	13,704	224,26
430	139,752	-71,922	13,615	223,937
431	139,819	-70,241	13,261	218,733
432	139,839	-72,641	13,63	222,403
432	139,839	-72,641	13,63	222,403
433	139,679	-72,787	13,756	224,661
470	120,298	-87,983	15,333	216,836
471	120,005	-87,883	15,663	223,977
472	119,917	-88,034	15,408	219,858
472	119,917	-88,034	15,408	219,858
473	119,822	-85,929	15,193	215,752
474	119,63	-85,279	15,577	222,397
474	119,63	-85,279	15,577	222,397
475	119,579	-84,552	15,479	223,447
476	119,596	-83,974	15,164	216,013
477	119,528	-84,922	15,504	220,929
478	119,469	-84,191	15,533	223,226
479	119,475	-84,302	15,217	216,328
480	119,479	-83,855	15,336	218,813
481	119,5	-84,857	15,646	222,329
481	119,5	-84,857	15,646	222,329
482	119,483	-83,868	15,142	216,57
483	119,44	-82,958	15,367	216,94
521	100,986	-98,806	15,611	215,941
522	100,954	-100,303	15,446	215,529
522	100,954	-100,303	15,446	215,529
523	100,875	-100,424	15,167	210,499
524	100,756	-101,553	15,527	215,03
525	100,544	-101,138	15,586	215,523
526	100,394	-100,87	15,142	207,992
527	100,326	-100,018	15,494	212,366
528	100,205	-99,772	15,59	216,403
529	100,186	-99,355	15,151	209,357
530	100,052	-99,418	15,448	212,013
531	100,063	-100,045	15,564	216,499
532	100,07	-100,022	15,292	210,542
533	99,983	-98,812	15,353	210,794
533	99,983	-98,812	15,353	210,794
534	99,867	-99,875	15,61	216,02
565	80,036	-103,921	15,662	184,459
566	80,06	-104,495	15,22	179,913
567	80	-105,1	15,37	179,84
567	80	-105,1	15,37	179,84
568	80,041	-105,708	15,588	184,155
569	79,938	-105,795	15,225	180,076

570	80,013	-106,12	15,286	179,018
571	79,881	-105,909	15,698	183,648
572	79,88	-105,523	15,26	179,459
572	79,88	-105,523	15,26	179,459
573	79,777	-107,012	15,269	178,601
574	79,758	-106,556	15,679	183,833
575	79,769	-108,555	15,358	181,193
576	79,741	-106,274	15,217	178,078
577	79,781	-106,854	15,595	182,473
578	79,678	-104,59	15,419	181,047
608	60,014	-104,649	15,63	140,4
609	59,987	-107,776	15,347	137,753
610	59,919	-106,48	15,24	135,723
611	59,924	-106,829	15,689	139,574
612	59,847	-106,68	15,349	138,152
613	59,783	-106,874	15,214	134,934
613	59,783	-106,874	15,214	134,934
614	59,735	-106,414	15,582	137,371
615	59,69	-106,1	15,517	137,621
616	59,635	-106,623	15,195	134,85
617	59,61	-106,63	15,569	137,463
618	59,563	-104,412	15,577	137,203
619	59,556	-104,581	15,11	134,075
620	59,536	-105,337	15,495	136,696
621	59,525	-106,429	15,568	138,22
622	59,509	-105,742	15,202	134,873
651	39,202	-111,052	15,417	93,64
652	39,053	-109,658	15,589	95,265
653	39,017	-112,908	15,284	93,268

654	38,845	-111,015	15,332	92,162
655	38,703	-111,132	15,661	94,849
656	38,677	-112,176	15,304	92,037
657	38,466	-110,821	15,251	91,386
658	38,412	-111,259	15,662	93,855
659	38,206	-110,835	15,307	91,679
660	38,218	-112,082	15,224	90,708
661	38,104	-109,343	15,655	92,96
662	38,047	-111,728	15,36	91,524
663	37,89	-111,309	15,225	89,471
664	37,792	-110,436	15,695	92,134
665	37,608	-111,201	15,392	90,934
666	37,589	-107,654	15,28	89,013
728	19,58	-110,369	15,593	52,283
729	19,59	-110,611	15,21	50,933
730	19,49	-110,661	15,627	51,887
731	19,64	-110,227	15,687	52,658
732	19,612	-110,082	15,152	51,145
733	19,56	-111,025	15,445	51,666
734	19,572	-111,258	15,586	52,619
735	19,555	-110,438	15,193	51,15
736	19,576	-111,11	15,472	51,566
737	19,56	-111,241	15,686	52,744
738	19,573	-110,975	15,252	51,329
739	19,531	-110,232	15,334	51,246
740	19,543	-111,282	15,668	52,801
741	19,577	-110,511	15,309	51,425
742	19,492	-111,185	15,265	51,246
743	19,541	-110,56	15,687	52,544

Tabulka naměřených hodnot při 20 % tahu

t	v	Ft	Utr	Itr
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
163	198,419	-15,452	13,759	117,069
164	198,436	-14,41	15,06	118,526
165	198,407	-14,948	13,652	119,885
166	198,5	-13,501	13,38	116,485
167	198,428	-15,516	13,646	119,224
167	198,428	-15,516	13,646	119,224
168	198,461	-12,502	14,232	119,457
169	198,407	-15,359	13,439	117,5
170	198,433	-14,205	13,7	118,591
171	198,44	-12,964	13,706	119,437
171	198,44	-12,964	13,706	119,437
172	198,45	-14,354	14,31	116,639
173	198,409	-14,999	14,469	119,315
174	198,463	-13,576	14,56	120,028
175	198,564	-14,564	13,43	116,599
210	180,104	-17,931	13,335	108,364
211	180,099	-15,4	13,642	112,064
212	180,047	-19,448	13,507	111,425
212	180,047	-19,448	13,507	111,425
213	179,961	-17,519	14,455	108,193
214	179,928	-17,234	13,764	111,262
215	179,874	-20,365	13,535	111,848
216	179,835	-17,596	13,769	107,825
217	179,795	-16,895	13,746	112,364
218	179,694	-19,703	14,546	110,561
219	179,69	-15,656	13,318	109,284
220	179,627	-17,836	14,247	112,472

221	179,72	-18,231	14,693	111,098
222	179,519	-17,163	13,527	109,626
223	179,6	-18,285	15,633	112,372
224	179,67	-15,942	13,304	110,577
368	158,725	-23,788	13,595	115,657
369	158,764	-23,847	14,003	119,135
369	158,764	-23,847	14,003	119,135
370	158,869	-23,896	14,241	116,559
370	158,869	-23,896	14,241	116,559
371	158,883	-23,146	13,824	116,098
372	159,084	-24,09	14,707	119,226
373	159,294	-23,839	14,271	116,031
374	159,21	-23,144	14,021	115,939
375	159,231	-24,989	14,811	118,283
376	159,254	-24,095	13,946	115,564
376	159,254	-24,095	13,946	115,564
377	159,335	-25,224	14,369	115,58
378	159,294	-24,153	14,692	118,263
379	159,358	-25,241	14,394	116,153
380	159,331	-23,771	14,069	116,888
382	159,535	-23,85	14,452	116,395
417	140,412	-34,666	13,68	119,702
418	140,341	-34,551	13,58	120,988
419	140,239	-35,487	13,196	119,972
420	140,227	-34,266	13,714	121,285
421	140,128	-35,432	13,605	122,261
422	140,02	-35,041	13,276	118,815
422	140,02	-35,041	13,276	118,815
423	139,978	-35,328	13,573	119,845

424	139,935	-33,375	13,667	121,452
425	139,889	-35,235	13,264	118,956
426	139,871	-34,286	13,523	120,443
427	139,838	-34,605	13,713	122,032
428	139,757	-34,784	13,374	118,724
429	139,768	-33,582	13,492	119,439
430	139,748	-34,053	13,652	122,355
431	139,733	-34,276	13,347	119,416
471	120,099	-42,083	15,501	116,967
472	120,006	-43,353	15,201	112,939
473	119,89	-40,186	15,52	114,717
474	119,823	-41,563	15,465	116,517
475	119,804	-40,268	15,152	114,016
476	119,774	-39,736	15,51	114,958
476	119,774	-39,736	15,51	114,958
477	119,713	-40,957	15,619	116,604
479	119,709	-40,986	15,542	116,155
480	119,711	-39,786	15,592	117,496
481	119,699	-39,787	15,106	114,361
482	119,656	-40,922	15,5	116,438
483	119,655	-40,799	15,602	117,771
484	119,674	-42,118	15,187	114,78
485	119,66	-41,492	15,426	116,254
486	119,615	-42,658	15,627	117,064
487	119,61	-40,139	15,127	114,468
526	100,307	-55,3	15,269	114,891
527	100,214	-55,162	15,632	119,082
528	100,071	-54,384	15,315	117,876
529	100,014	-54,176	15,208	116,449
530	99,961	-52,852	15,736	119,243
531	99,833	-52,839	15,305	117,123
532	99,766	-52,993	15,24	115,798
533	99,796	-53,096	15,664	119,011
534	99,685	-53,395	13,363	116,841
535	99,711	-51,073	15,287	115,311
536	99,749	-51,189	15,581	118,925
537	99,486	-51,276	15,363	117,119
538	99,5	-50,575	15,233	115,701
539	99,45	-49,527	15,724	118,776
540	99,428	-48,467	15,268	116,737
541	99,424	-50,229	15,284	115,613
542	99,564	-49,709	15,64	118,944
576	80,093	-50,914	15,14	93,099
577	80,011	-52,293	15,659	95,24
578	79,97	-49,233	15,473	94,614
579	79,931	-50,891	15,166	93,02
580	79,816	-50,943	15,641	95,63
581	79,804	-51,239	15,467	94,697
582	79,772	-50,375	15,236	92,045
583	79,759	-49,973	15,638	94,684
584	79,678	-48,212	15,434	94,28
585	79,74	-46,947	15,175	92,778
587	79,83	-49,219	15,469	94,634
589	80,013	-48,932	15,569	94,962
590	80,095	-49,108	15,432	94,864
591	80,209	-49,745	15,126	93,18

592	80,19	-51,131	15,731	95,471
593	80,21	-50,543	15,36	95,191
594	80,143	-52,116	15,268	93,444
725	59,871	-53,73	15,454	73,063
726	59,883	-53,676	15,213	71,489
727	59,862	-52,883	15,535	73,097
728	59,988	-54,097	15,47	72,739
729	59,931	-55,418	15,254	71,131
730	59,891	-55,522	15,659	73,109
731	52,093	-56,333	15,349	72,734
732	60,37	-54,977	15,24	71,351
733	60,685	-54,048	15,752	73,144
734	59,782	-56,666	15,453	72,74
735	59,925	-54,433	15,195	71,262
736	59,853	-53,966	15,703	73,205
737	59,84	-55,77	15,354	72,69
738	59,837	-53,442	15,295	71,157
739	59,841	-57,381	15,71	73,02
740	59,882	-53,883	15,391	72,673
741	59,775	-52,492	15,262	71,303
742	59,844	-54,539	15,708	73,278
744	59,808	-53,7	15,27	71,259
790	40,162	-61,915	15,612	55,024
791	40,085	-60,343	15,276	53,633
792	40,078	-59,383	15,414	53,67
793	39,983	-59,927	15,627	54,735
794	40,022	-60,723	15,224	53,594
795	39,837	-59,381	15,402	53,762
796	39,928	-59,206	15,665	54,635
797	39,887	-60,26	15,175	53,356
798	39,849	-59,51	15,485	53,653
799	39,804	-60,68	15,6	54,101
800	39,766	-60,13	15,202	53,01
801	39,764	-58,65	15,605	53,575
802	39,771	-60,836	15,548	53,82
803	39,759	-59,163	15,171	52,919
804	39,748	-59,655	15,64	53,697
805	39,732	-59,747	15,574	53,841
806	39,79	-59,159	15,207	52,801
853	20,228	-61,528	15,356	30,424
854	20,151	-61,435	15,603	30,675
855	20,09	-60,979	15,192	30,486
856	20,051	-61,027	15,386	30,435
857	20,096	-60,875	15,646	30,223
858	19,934	-61,389	15,125	29,893
859	19,946	-61,155	15,491	30,192
860	19,935	-60,588	15,57	30,238
860	19,935	-60,588	15,57	30,238
861	19,869	-60,645	15,151	29,53
862	19,82	-60,959	15,496	30,245
863	19,884	-60,188	15,49	29,934
864	19,815	-60,011	15,099	29,281
866	19,781	-59,567	15,474	30,026
867	19,795	-59,839	15,124	29,441
868	19,819	-59,545	15,571	30,349
869	19,758	-59,633	15,395	30,137

Tabulka naměřených hodnot při 100 % EDB

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>					
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]					
559	199,001	-135,468	13,48	409,324	1453	139,225	-130,997	15,094	284,417
559	199,001	-135,468	13,48	409,324	1453	139,225	-130,997	15,094	284,417
560	199,052	-136,577	13,24	405,055	1454	139,24	-128,993	13,662	282,805
560	199,052	-136,577	13,24	405,055	1455	139,361	-129,832	13,902	276,997
561	198,965	-135,982	13,621	417,521	1456	139,24	-126,604	13,756	284,959
561	198,965	-135,982	13,621	417,521	1457	144,16	-129,127	13,808	283,495
562	198,966	-135,932	13,478	410,85	1457	144,16	-129,127	13,808	283,495
563	198,962	-135,084	13,228	404,741	1458	139,241	-134,31	13,952	276,119
563	198,962	-135,084	13,228	404,741	1459	139,156	-128,588	13,602	286,619
564	198,921	-135,12	13,649	419,886	1459	139,156	-128,588	13,602	286,619
565	198,903	-135,836	13,426	407,837	1460	139,176	-130,076	13,871	286,246
565	198,903	-135,836	13,426	407,837	1461	139,277	-130,225	13,442	278,808
566	198,93	-134,751	13,279	405,131	1462	139,248	-128,453	14,794	284,852
567	198,894	-134,948	13,617	420,545	1462	139,248	-128,453	14,794	284,852
568	198,898	-134,996	13,464	407,942	1463	139,298	-130,635	13,665	283,506
569	198,838	-135,567	13,254	407,545	1464	139,282	-131,861	14,072	277,721
570	198,85	-136,032	13,655	417,589	1500	120,021	-126,075	13,269	237,689
935	179,148	-135,456	15,123	372,631	1501	119,883	-124,601	13,635	243,91
936	179,055	-132,211	15,26	380,28	1502	119,845	-126,08	13,513	241,619
937	179,002	-132,176	14,535	379,956	1503	119,858	-123,495	13,246	239,056
938	179,028	-132,961	13,229	372,456	1503	119,858	-123,495	13,246	239,056
939	178,995	-135,062	13,406	382,001	1504	119,642	-128,006	13,639	244,907
940	178,989	-134,009	13,581	383,849	1505	119,607	-125,098	13,513	240,103
941	178,785	-131,97	14,257	374,42	1506	119,581	-126,489	13,289	236,777
1323	179,069	-137,58	13,265	377,791	1506	119,581	-126,489	13,289	236,777
1324	179,031	-138,665	13,633	388,185	1507	119,56	-130,4	13,647	244,645
1325	179,011	-136,634	13,34	375,762	1508	119,511	-126,187	13,417	237,668
1325	179,011	-136,634	13,34	375,762	1508	119,511	-126,187	13,417	237,668
1326	179,09	-137,782	13,291	378,764	1509	119,468	-126,476	13,267	238,049
1327	179,09	-137,806	13,577	384,141	1510	119,388	-126,739	13,691	244,464
1328	179,04	-140,423	13,379	376,628	1511	119,501	-125,602	13,4	237,941
1328	179,04	-140,423	13,379	376,628	1546	100,292	-121,771	13,628	201,591
1329	179,176	-138,545	13,231	375,906	1547	100,177	-122,214	13,4	194,671
1330	179,093	-137,604	13,631	385,809	1548	100,162	-123,166	13,315	196,567
1331	179,101	-138,268	13,375	375,869	1549	100,02	-123,207	13,692	201,846
1331	179,101	-138,268	13,375	375,869	1549	100,02	-123,207	13,692	201,846
1332	179,112	-136,283	13,538	375,484	1550	99,984	-124,033	13,369	196,762
1333	179,219	-135,496	13,586	384,103	1551	99,937	-124,073	13,344	196,774
1333	179,219	-135,496	13,586	384,103	1552	99,887	-124,136	13,698	201,979
1391	159,036	-134,178	13,536	330,683	1552	99,887	-124,136	13,698	201,979
1391	159,036	-134,178	13,536	330,683	1553	99,81	-123,413	13,392	196,956
1392	159,031	-131,615	13,352	326,957	1554	99,788	-124,583	13,309	197,299
1393	158,981	-134,418	13,631	337,481	1554	99,788	-124,583	13,309	197,299
1394	159,06	-136,195	13,861	330,319	1555	99,667	-125,665	13,682	202,105
1395	159,034	-133,68	13,547	326,798	1556	99,664	-125,041	13,419	196,4
1397	159,066	-129,166	13,435	329,713	1557	99,654	-123,337	13,292	196,005
1398	158,957	-131,218	13,307	328,774	1557	99,654	-123,337	13,292	196,005
1399	158,931	-133,764	14,151	337,244	1594	80,107	-118,171	13,72	159,161
1400	158,916	-132,507	14,03	328,792	1595	80,029	-119,638	13,369	154,491
1401	158,917	-130,261	13,898	327,338	1595	80,029	-119,638	13,369	154,491
1402	158,831	-132,734	13,64	337,892	1596	79,948	-124,767	13,379	154,609
1402	158,831	-132,734	13,64	337,892	1596	79,948	-124,767	13,379	154,609
1403	158,899	-134,445	13,496	328,926	1597	79,811	-125,435	13,694	160,506
1404	158,86	-134,248	13,232	327,763	1597	79,811	-125,435	13,694	160,506
1405	158,883	-133,321	13,655	337,532	1598	79,732	-123,486	13,366	156,676
1406	158,85	-131,979	13,467	330,737	1598	79,732	-123,486	13,366	156,676
1452	139,235	-128,714	13,368	276,397	1599	79,715	-122,875	13,35	155,824
					1600	79,662	-123,323	13,678	159,306
					1600	79,662	-123,323	13,678	159,306

1601	79,588	-124,535	13,35	154,729
1602	79,581	-123,864	13,399	156,093
1602	79,581	-123,864	13,399	156,093
1603	79,527	-123,951	13,709	159,876
1639	60,13	-122,33	15,574	116,923
1640	60,019	-120,607	15,136	113,634
1640	60,019	-120,607	15,136	113,634
1641	59,911	-122,33	15,506	116,292
1642	59,894	-122,412	15,547	116,072
1642	59,894	-122,412	15,547	116,072
1643	59,83	-125,411	15,142	115,034
1644	59,744	-123,685	15,455	116,885
1644	59,744	-123,685	15,455	116,885
1645	59,762	-123,146	15,532	116,19
1646	59,719	-124,47	15,116	113,597
1646	59,719	-124,47	15,116	113,597
1647	59,707	-124,921	15,401	117,197
1648	59,622	-123,965	15,51	116,625
1649	59,671	-124,472	15,1	113,771
1650	59,609	-122,748	15,473	115,668
1687	39,924	-120,684	15,225	73,029
1687	39,924	-120,684	15,225	73,029
1688	39,993	-122,677	14,094	72,387
1689	39,839	-121,896	14,361	74,177
1689	39,839	-121,896	14,361	74,177
1690	39,854	-121,609	14,061	72,789
1691	39,802	-122,921	14,274	73,993
1692	39,706	-124,038	14,535	76,266

1693	39,676	-123,654	14,246	74,282
1694	39,633	-123,943	14,119	73,486
1695	39,759	-124,437	14,332	75,085
1696	39,677	-123,762	13,896	73,624
1696	39,677	-123,762	13,896	73,624
1697	39,56	-123,682	13,824	73,605
1698	39,575	-124,14	14,204	75,998
1699	39,743	-124,293	14,291	73,951
1700	39,5	-123,808	13,875	73,344
1700	39,5	-123,808	13,875	73,344
1738	20,088	-122,286	15,178	34,15
1739	20,041	-123,558	15,553	35,016
1740	19,939	-122,451	15,466	33,791
1741	19,899	-124,699	15,113	33,762
1742	19,769	-124,465	15,598	34,591
1742	19,769	-124,465	15,598	34,591
1743	19,758	-124,807	15,39	33,858
1744	19,761	-123,912	15,165	33,641
1745	19,711	-122,375	15,57	34,169
1746	19,687	-124,211	15,373	33,409
1747	19,729	-125,68	15,169	33,347
1748	19,657	-125,32	15,631	34,214
1749	19,698	-126,227	15,388	33,502
1750	19,618	-125,69	15,191	33,648
1750	19,618	-125,69	15,191	33,648
1751	19,596	-124,581	15,645	34,29
1752	19,657	-123,232	15,288	33,379

Tabulka naměřených hodnot při 80 % EDB

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
481	199,095	-117,608	13,304	342,433
482	199,058	-116,139	13,304	343,913
483	199,14	-114,615	13,666	349,315
484	199,148	-116,011	13,302	339,669
485	199,118	-115,223	13,298	343,562
486	199,184	-113,939	13,609	349,24
487	199,187	-114,94	13,354	339,445
488	199,116	-116,194	13,31	346,199
489	199,422	-115,235	13,688	347,969
490	199,186	-114,151	13,59	336,698
491	199,216	-113,765	13,418	345,464
492	199,114	-113,835	13,606	347,06
493	199,237	-116,182	13,686	338,129
494	199,21	-115,028	13,818	346,228
495	199,13	-115,63	13,628	348,458
496	199,168	-112,61	13,209	338,606
497	199,084	-114,6	13,467	346,577
569	179,431	-114,388	13,375	310,462
569	179,431	-114,388	13,375	310,462
570	179,429	-115,423	13,689	315,746
571	179,407	-115,223	14,959	309,485
572	179,355	-112,344	14,353	313,881
573	179,424	-112,919	13,72	316,114
574	179,289	-114,935	13,899	307,231
575	179,381	-111,938	13,424	310,789
576	179,312	-112,931	13,649	313,311
577	179,291	-112,984	13,368	306,906
578	179,262	-114,848	13,442	311,652

579	179,246	-115,571	15,574	316,701
580	179,237	-115,078	13,445	307,83
581	179,165	-112,502	13,431	312,319
582	179,269	-116,279	13,705	315,117
583	179,18	-113,369	13,218	304,363
584	179,104	-113,774	14,182	311,269
585	179,107	-116,738	14,098	310,994
681	159,361	-106,563	13,296	268,719
682	159,334	-107,538	13,639	273,514
683	159,36	-110,841	13,36	269,432
684	159,347	-108,483	13,306	269,803
684	159,347	-108,483	13,306	269,803
686	159,319	-109,862	13,257	270,354
686	159,319	-109,862	13,257	270,354
688	159,275	-113,317	13,801	273,784
689	159,283	-114,91	14,1	269,87
690	159,335	-108,976	13,689	274,846
691	159,329	-110,005	14,34	275,408
692	159,416	-112,014	13,7	266,301
693	159,389	-112,576	13,423	270,965
694	159,469	-110,69	13,639	275,381
695	160,899	-112,141	13,279	267,063
696	159,485	-113,327	13,456	275,776
697	159,433	-112,847	13,584	275,597
746	139,689	-109,753	13,668	239,507
747	139,669	-108,35	13,415	231,434
748	139,607	-107,869	13,373	233,539
749	139,654	-108,495	13,648	238,934
750	139,652	-108,331	13,32	231,36
751	139,712	-107,911	13,389	234,036



752	139,687	-107,939	13,669	236,144
753	139,726	-108,291	13,251	232,501
754	139,656	-107,437	13,424	236,265
755	139,677	-106,211	13,612	236,254
756	139,667	-107,081	13,254	232,903
757	139,634	-105,617	13,482	234,721
758	139,559	-108,191	13,603	236,392
759	139,634	-108,199	13,25	231,747
760	139,575	-107,872	13,448	234,871
761	139,663	-108,225	13,622	234,41
803	119,832	-103,073	13,278	192,606
804	119,798	-103,824	13,505	195,5
805	119,759	-104,312	13,68	195,778
806	119,695	-102,853	13,223	193,663
807	119,696	-101,604	13,566	199,541
808	119,613	-105,809	13,589	198,345
809	119,596	-106,946	13,239	194,58
810	119,578	-105,978	13,579	200,761
811	119,604	-104,256	13,61	196,459
812	119,548	-104,375	13,25	191,777
813	119,509	-104,315	13,598	197,099
814	119,495	-104,695	13,557	196,236
815	119,477	-103,508	13,247	191,435
816	119,468	-106,194	13,619	199,452
817	119,397	-106,138	13,54	197,529
818	119,463	-106,082	13,273	194,682
819	119,461	-105,265	13,625	198,616
820	119,471	-104,169	13,521	195,523
866	99,767	-103,863	13,762	164,245
867	99,815	-106,065	13,369	160,213
868	99,879	-107,206	13,42	163,186
869	99,711	-105,944	13,711	165,395
870	99,72	-103,467	13,446	160,091
871	99,863	-104,564	13,391	163,252
872	99,723	-104,626	13,764	164,718
873	99,791	-106,33	13,391	161,241
874	99,701	-106,474	13,382	162,111
875	99,792	-106,96	13,731	164,894
876	99,698	-107,915	13,365	160,4
877	99,683	-104,51	13,4	161,957
878	99,724	-103,269	13,74	166,207
879	99,743	-106,398	13,361	159,963
880	99,766	-109,113	13,412	161,724
881	98,873	-107,52	13,752	165,153
882	99,724	-105,322	13,304	160,832
924	80,073	-103,158	15,604	131,086
925	79,973	-102,474	15,38	126,845
926	79,931	-104,001	15,197	128,29
927	79,95	-104,471	15,562	129,705
928	79,896	-106,641	15,252	126,04
929	79,935	-103,329	15,321	127,716
930	79,815	-101,284	15,652	130,04
931	79,823	-102,268	13,913	126,084
932	79,899	-104,628	15,447	130,017
933	79,882	-103,206	15,614	129,327
934	79,788	-103,393	15,207	125,337

935	79,827	-103,828	15,5	129,629
935	79,827	-103,828	15,5	129,629
936	79,776	-102,726	15,505	129,37
937	79,883	-103,846	15,087	126,378
939	79,806	-106,447	15,44	127,92
939	79,806	-106,447	15,44	127,92
976	60,189	-103,903	13,47	93,917
977	60,104	-101,287	13,323	93,228
978	60,077	-103,211	13,707	96,721
979	60,076	-104,184	13,418	93,928
980	60,076	-102,133	13,347	93,712
981	59,979	-102,592	13,708	95,833
982	59,999	-102,553	13,33	93,907
983	59,978	-104,183	13,439	94,494
984	59,934	-105,453	13,647	95,79
985	59,899	-105,251	13,341	93,438
986	59,901	-102,725	13,399	94,592
987	59,873	-102,937	13,718	95,225
988	59,842	-103,958	13,31	93,048
989	59,929	-104,415	13,496	94,669
990	59,86	-104,492	13,678	96,033
1030	40,086	-100,803	13,218	60,311
1031	40,053	-100,726	13,696	62,312
1032	40,032	-101,647	13,448	60,647
1033	40,061	-102,393	13,324	60,362
1034	40,015	-101,099	13,627	61,677
1035	39,987	-100,332	13,504	60,502
1036	40,01	-102,754	13,284	60,425
1037	39,874	-101,506	13,739	62,069
1038	39,977	-101,382	13,752	60,512
1039	39,878	-102,025	15,165	60,593
1039	39,878	-102,025	15,165	60,593
1040	39,881	-102,517	15,675	61,844
1041	39,735	-102,661	15,271	60,711
1042	39,888	-103,465	13,348	61,406
1043	39,83	-102,332	13,681	61,69
1044	39,842	-102,819	13,38	59,809
1046	39,815	-103,666	13,723	62,207
1047	39,856	-103,775	13,342	60,51
1088	20,027	-100,366	13,275	27,379
1089	20,026	-102,422	13,611	28,118
1090	20,062	-99,96	13,546	27,316
1091	19,888	-102,034	13,202	26,746
1092	19,935	-101,092	13,623	27,759
1093	19,947	-101,828	13,526	27,488
1094	19,887	-103,357	13,259	27,039
1095	19,918	-101,624	13,651	27,91
1096	19,879	-102,131	13,486	27,223
1097	19,868	-102,845	13,281	27,692
1098	19,859	-102,211	13,68	28,129
1099	19,887	-102,497	13,438	27,311
1100	19,832	-102,028	13,265	27,113
1101	19,85	-103,954	13,738	28,076
1102	19,858	-103,528	15,274	27,68
1104	19,778	-101,977	15,634	28,154

Tabulka naměřených hodnot při 60 % EDB

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
161	199,039	-88,921	13,42	253,897
162	198,97	-88,456	13,73	258,275
163	199,044	-88,3	13,803	262,791
164	199,028	-88,267	13,424	254,489
165	198,958	-88,036	13,488	258,053
166	199,023	-88,812	14,293	260,924
167	198,931	-86,643	13,743	254,503
168	199,017	-89,358	13,69	261,102
169	198,951	-89,88	13,583	256,824
169	198,951	-89,88	13,583	256,824
170	199,021	-87,639	13,499	253,247
171	199,024	-90,001	14,39	261,488
172	199,01	-88,742	13,737	257,162
173	199,077	-91,69	13,381	253,92
174	199,029	-90,35	13,733	262,69
175	199,042	-88,802	13,758	257,506
176	198,92	-93,298	13,273	256,049
223	179,534	-89,5	13,715	242,542
224	179,496	-89,299	15,42	235,879
225	179,548	-85,948	13,439	235,916
226	179,6	-87,774	15,376	242,474
227	179,526	-87,606	13,409	237,011
228	179,533	-86,889	14,607	236,726
229	179,584	-87,505	13,736	240,504
230	179,642	-87,612	13,468	235,087
231	179,527	-87,009	13,428	239,161
232	179,572	-87,903	13,698	243,803
233	179,489	-87,198	13,445	235,215
234	179,58	-89,566	13,504	243,265
235	179,571	-86,144	13,665	240,432
236	179,578	-87,579	13,292	235,837
237	179,537	-87,719	13,526	238,537
238	179,524	-88,459	13,642	241,437
305	159,685	-84,369	13,678	210,264
307	159,686	-87,453	13,631	210,183
308	159,685	-86,735	14,026	208,666
309	159,686	-86,192	14,313	202,369
310	159,685	-85,894	14,027	208,255
311	159,684	-87,006	14,563	206,991
312	159,684	-85,686	13,643	202,102
313	159,686	-86,91	13,597	207,529
314	159,685	-87,66	13,547	209,117
315	159,685	-85,674	13,478	201,795
317	159,427	-88,078	14,234	205,191
318	159,386	-86,029	13,228	204,318
319	159,371	-87,169	14,112	208,346
320	159,388	-87,938	14,03	207,337
321	159,39	-84,069	13,714	205,611
322	159,35	-84,335	13,705	207,464
323	159,344	-87,721	13,485	204,782
324	159,346	-87,018	13,42	202,754
360	139,972	-81,611	13,663	178,252
361	139,927	-83,013	14,083	175,619
362	139,912	-82,455	13,414	180,516
363	139,854	-82,534	14,845	177,664
364	139,763	-83,654	13,217	173,787
365	139,698	-84,222	13,528	179,288
366	139,698	-79,707	13,597	178,251
367	139,719	-82,045	13,231	172,497
368	139,634	-82,885	13,624	179,671
369	139,605	-83,389	13,672	177,355
370	139,638	-83,763	13,204	174,53
371	139,636	-83,502	13,57	180,234
372	139,679	-82,746	13,493	175,374
373	139,679	-82,23	13,261	175,696
374	139,74	-82,817	13,682	178,67
375	139,66	-82,173	13,406	173,894
420	119,743	-78,726	13,554	147,904
421	119,691	-80,81	13,663	149,888
422	119,72	-81,304	13,279	144,898
423	119,663	-81,409	13,676	150,436
424	119,691	-79,881	13,59	147,089
425	119,714	-81,565	13,256	144,1
426	119,642	-82,211	13,63	150,171
427	119,645	-80,637	13,478	148,885
428	119,627	-82,284	13,287	146,295
429	119,631	-80,435	13,701	150,245
430	119,605	-80,496	13,464	146,539
431	119,537	-80,611	13,299	147,064
432	119,619	-80,955	13,699	150,236
433	119,537	-81,996	13,44	144,095
434	119,624	-81,857	13,305	144,98
435	119,538	-80,798	13,717	147,854
478	99,914	-80,059	13,384	120,774
479	99,944	-79,928	13,682	124,358
480	99,891	-81,263	13,438	122,31
481	99,871	-81,688	13,371	120,337
482	99,827	-80,7	13,705	124,44
483	99,798	-79,581	13,402	121,09
484	99,809	-80,642	13,394	121,767
485	99,787	-80,846	15,673	122,742
486	99,795	-82,518	13,37	120,952
487	99,826	-78,697	13,402	122,905
488	99,735	-80,971	13,753	124,573
489	99,865	-82,558	13,32	120,689
490	99,756	-81,275	13,433	122,639
491	99,71	-78,455	13,695	123,936
494	99,659	-82,579	13,67	122,694
495	99,741	-83,927	13,335	120,193
497	99,706	-80,803	13,673	122,527
541	79,996	-80,543	13,348	94,326
542	79,968	-78,637	13,488	95,194
543	79,996	-79,037	13,679	96,361
544	79,998	-78,258	13,276	94,329
545	79,875	-79,455	13,489	96,084
546	79,857	-79,918	13,649	96,586
548	79,874	-79,814	13,616	97,965
550	79,791	-81,186	13,286	94,567
551	79,801	-79,886	13,654	96,852
553	79,849	-80,772	13,338	95,799
554	79,823	-78,67	13,697	97,876
556	79,718	-80,624	13,377	96,078
560	79,758	-81,026	13,717	96,369
561	79,786	-79,01	13,299	94,394
563	79,74	-79,336	13,677	96,839
564	79,763	-77,9	13,224	94,485

609	59,906	-79,253	13,531	70,815
610	59,923	-79,455	13,285	70,455
611	59,898	-80,429	13,634	71,719
613	59,888	-77,787	13,311	69,542
614	59,869	-78,813	13,691	71,149
615	59,851	-81,089	13,314	69,405
616	59,899	-79,781	13,418	70,226
617	59,93	-77,465	13,691	71,878
618	59,924	-77,691	13,307	70,068
619	59,881	-78,566	13,438	70,74
620	59,892	-77,299	13,649	71,343
621	59,911	-77,352	13,266	69,659
622	59,888	-78,591	13,544	71,278
623	59,886	-78,975	13,635	71,142
624	59,886	-77,481	13,277	69,002
670	39,985	-76,604	13,295	45,598
671	39,903	-79,322	13,678	46,448
672	39,876	-76,14	13,382	44,659
673	39,881	-77,95	13,394	45,844
674	39,914	-78,453	13,756	46,361
675	39,919	-76,889	13,304	44,766
676	39,903	-78,054	15,356	45,669
677	39,851	-77,626	15,625	46,268
678	39,846	-76,829	15,196	44,702
679	39,869	-79,068	15,424	46,411

680	39,896	-77,688	15,566	46,553
681	39,894	-77,727	15,114	45,674
682	39,822	-80,195	15,534	46,609
683	39,843	-78,486	15,453	46,163
684	39,96	-76,701	15,114	45,175
685	39,815	-78,683	15,576	46,585
727	19,983	-78,303	15,131	20,023
728	19,964	-77,844	15,527	20,701
729	20,073	-78,214	15,415	20,514
730	19,982	-78,451	15,111	20,035
731	20,011	-78,549	15,556	20,573
736	19,781	-80,803	15,2	20,395
738	19,884	-80,57	15,325	20,569
739	19,94	-80,579	15,194	20,047
741	19,867	-79,675	15,211	20,315
742	19,872	-80,619	15,24	20,312
743	19,851	-80,09	15,626	20,764
744	19,716	-78,858	15,21	20,352
745	19,85	-80,623	15,291	20,509
746	19,823	-79,541	15,626	20,856
747	19,795	-80,076	15,179	20,296
748	19,818	-79,934	15,306	20,211

Tabulka naměřených hodnot při 40 % EDB

t	v	F <sub>t</sub>	U <sub>tr</sub>	I <sub>tr</sub>
[s]	[km/h]	[kN]	[kV]	[A]
77	199,115	-69,312	13,294	177,08
78	199,156	-67,954	13,581	181,947
79	199,14	-65,737	13,772	181,26
80	199,276	-65,558	13,268	175,725
81	199,198	-67,591	13,463	176,498
82	199,297	-66,612	13,951	182,084
83	199,25	-66,154	13,37	175,325
84	199,285	-68,626	13,444	178,706
85	199,398	-64,993	13,823	183,648
86	199,409	-64,361	13,326	178,361
87	199,319	-65,339	13,317	178,47
88	199,338	-66,084	13,665	185,525
89	199,322	-65,091	13,45	180,403
90	199,303	-67,431	13,301	179,641
91	199,365	-66,414	13,613	183,232
92	199,401	-65,861	13,483	178,723
135	178,944	-64,965	13,807	160,369
136	178,919	-64,718	13,725	164,99
137	178,982	-64,702	13,499	159,769
138	179,004	-65,375	13,296	162,015
139	178,985	-65,38	13,681	164,843
140	179,032	-64,863	13,448	161,764
141	178,974	-65,41	13,297	161,477
142	179,093	-66,27	14,152	164,513
143	179,16	-65,765	13,546	161,957
144	179,03	-65,178	13,222	160,169
145	179,106	-65,731	15,023	164,288
145	179,106	-65,731	15,023	164,288
146	179,189	-64,732	14,132	165,888
147	179,18	-65,255	14,596	163,144
148	179,267	-64,516	14,615	166,092

189	159,462	-62,465	13,471	142,121
190	159,582	-63,548	14,183	144,688
191	159,487	-64,978	13,609	139,692
192	159,492	-63,714	13,641	140,848
193	159,51	-62,88	13,965	143,35
194	159,542	-65,759	13,484	140,538
195	159,528	-62,931	13,706	140,505
196	159,574	-63,248	13,791	144,276
197	159,526	-63,449	13,752	140,638
198	159,572	-63,817	13,274	138,117
199	159,591	-63,923	13,667	142,509
200	159,561	-62,962	14,129	143,856
201	159,617	-62,778	13,55	139,571
201	159,617	-62,778	13,55	139,571
202	159,594	-63,446	13,861	142,687
203	159,635	-65,576	13,715	144,276
247	139,555	-60,426	13,629	122,308
248	139,438	-60,659	13,261	117,843
249	139,623	-63,544	13,464	121,012
250	139,602	-59,624	13,664	121,179
251	139,674	-62,72	13,333	118,21
252	139,635	-60,004	13,416	120,266
253	139,636	-61,781	14,333	122,763
254	139,599	-58,56	13,389	117,923
255	139,512	-62,289	13,362	120,046
255	139,512	-62,289	13,362	120,046
256	139,535	-57,52	13,681	122,065
257	139,599	-64,712	13,411	119,285
258	139,445	-57,985	13,362	120,613
259	139,502	-61,142	13,645	121,889
260	139,405	-60,734	13,394	117,754
261	139,508	-60,422	13,274	120,034
306	119,801	-58,415	15,656	101,635

307	119,748	-58,908	15,317	98,66
308	119,851	-59,77	15,135	99,47
309	119,562	-57,961	15,57	102,154
310	119,715	-57,511	15,423	100,315
311	119,67	-60,254	15,13	100,31
312	119,627	-58,183	15,515	102,361
313	119,561	-59,039	15,459	101,308
314	119,715	-59,033	15,118	99,285
315	119,636	-59,45	15,529	102,138
316	119,647	-60,011	15,516	102,198
317	119,541	-59,575	15,095	99,384
318	119,576	-58,673	15,478	101,099
319	119,607	-60,62	15,567	100,926
320	119,511	-60,451	15,103	99,079
321	119,592	-61,158	15,47	101,277
369	99,839	-57,043	15,106	80,693
369	99,839	-57,043	15,106	80,693
370	99,79	-57,124	15,475	83,327
371	99,849	-56,79	15,445	83,428
372	99,874	-56,718	15,101	80,951
373	99,873	-58,044	15,467	83,451
374	99,876	-56,469	15,466	83,23
375	99,822	-56,503	15,099	81,597
376	99,774	-57,625	15,572	83,609
377	99,8	-56,875	15,462	83,042
378	99,695	-59,082	15,111	81,408
379	99,717	-58,001	15,476	83,546
380	99,754	-56,867	15,469	82,444
381	99,729	-57,678	15,193	80,666
382	99,756	-57,696	15,488	83,028
429	79,909	-56,808	15,092	63,464
430	79,86	-56,533	15,324	64,981
431	79,835	-55,795	15,585	65,439
432	79,824	-56,098	15,202	63,473
433	79,809	-56,301	15,35	64,888
434	79,783	-56,731	15,576	65,561
435	79,791	-56,881	15,149	63,732
436	79,819	-57,256	15,331	65,223
437	79,821	-57,069	15,529	65,307
438	79,778	-55,851	15,215	63,192
439	79,774	-56,809	15,303	64,62
440	79,786	-56,82	15,591	65,463
441	79,771	-56,248	15,167	63,337
442	79,768	-56,974	15,399	64,837
443	79,734	-56,486	15,621	65,095
444	79,764	-56,213	15,153	63,536
482	60,049	-56,423	13,689	48,558

483	60,023	-55,647	13,32	46,79
484	60,012	-54,432	13,402	47,055
485	59,969	-55,086	13,716	48,049
486	59,943	-55,083	13,322	46,534
487	59,983	-55,52	13,469	47,642
488	59,93	-55,653	13,673	48,682
489	59,933	-56,016	13,316	46,848
490	59,848	-57,09	13,47	48,337
491	59,846	-56,116	13,678	47,856
492	59,899	-56,261	13,216	46,51
493	59,942	-56,703	13,565	47,336
494	59,933	-55,485	13,588	47,342
495	59,913	-55,49	13,246	46,674
496	59,879	-57,147	15,471	48,034
497	59,845	-54,922	15,471	48,136
537	40,113	-54,533	15,464	30,867
538	39,975	-54,507	15,5	30,392
539	40,066	-54,213	15,075	30,023
540	40,01	-55,015	15,485	30,429
541	39,994	-54,234	15,474	30,402
542	39,988	-54,833	15,103	30,115
543	39,962	-54,319	15,483	30,432
544	39,913	-54,8	15,488	30,103
545	39,951	-55,646	15,126	29,694
546	39,966	-53,904	15,524	30,318
547	39,908	-53,526	15,47	30,188
548	39,876	-55,408	15,171	30,149
549	39,848	-54,193	15,508	30,94
550	39,845	-54,657	15,477	30,637
551	39,794	-54,717	15,094	29,711
552	39,807	-54,273	15,569	30,698
589	20,243	-57,295	15,531	13,856
590	20,217	-56,476	15,148	13,758
591	20,184	-56,557	15,391	13,719
592	20,11	-56,858	15,581	13,579
593	20,057	-57,373	15,134	13,737
594	19,994	-57,231	15,35	13,74
595	20,004	-56,595	15,585	13,947
596	19,899	-57,501	15,152	13,652
597	19,994	-56,518	15,341	13,499
598	19,829	-56,857	15,6	13,658
599	19,929	-57,29	15,191	13,55
600	19,859	-57,303	15,302	13,635
601	19,87	-57,514	15,617	13,688
602	19,822	-57,835	15,162	13,51
603	19,847	-57,213	15,284	13,429

Tabulka naměřených hodnot při 20 % EDB

t	v	Ft	Utr	Itr
[s]	[km/h]	[kN]	[kW]	[A]
54	199,315	-39,451	13,437	84,491
55	199,459	-39,845	13,386	85,686
56	199,498	-38,971	14,181	86,709
57	199,539	-37,13	13,352	83,812
58	199,572	-36,934	13,418	85,555
59	199,574	-35,986	13,681	86,329
60	199,691	-36,119	13,344	83,166
61	199,588	-38,041	13,699	85,16
62	199,665	-36,291	13,772	87,906

63	199,671	-38,358	13,275	85,242
64	199,698	-39,065	13,451	84,571
65	199,75	-38,573	14,124	86,259
66	199,71	-37,794	13,3	82,539
67	199,763	-36,961	13,463	84,942
68	199,791	-36,938	13,781	85,798
69	199,755	-37,869	13,34	83,539
108	179,321	-38,141	13,541	80,647
109	179,351	-38,67	13,558	79,801
110	179,26	-39,14	13,393	79,156
111	179,266	-37,587	13,631	78,696

112	179,29	-39,665	13,613	77,024
113	179,363	-39,284	13,283	77,747
114	179,397	-38,597	13,667	81,122
115	179,429	-38,473	13,464	78,063
116	179,446	-37,631	13,267	77,766
117	179,288	-38,32	13,647	80,241
118	179,427	-38,353	13,413	78,266
119	179,441	-37,285	13,288	78,617
120	179,284	-40,457	14,078	81,301
121	179,421	-37,954	13,352	77,584
122	179,401	-37,576	13,503	78,638
123	179,436	-38,783	14,003	80,581
165	159,853	-33,555	13,436	65,865
166	159,738	-34,399	13,689	65,342
167	159,728	-37,688	14,236	67,124
168	159,663	-35,783	13,941	66,516
169	159,742	-35,082	13,443	65,539
170	159,85	-34,242	13,656	67,334
171	159,826	-37,996	13,504	67,131
172	159,821	-35,69	13,253	64,96
173	159,867	-36,082	13,74	68,044
174	159,768	-37,004	13,694	66,74
175	159,809	-36,472	13,27	67,145
176	159,797	-34,706	14,062	67,385
177	159,804	-35,437	13,608	66,982
178	159,763	-37,291	13,309	65,349
179	159,819	-37,25	13,64	68,293
180	159,776	-36,635	13,524	66,171
181	159,798	-34,423	13,235	65,838
222	139,875	-35,258	13,56	58,566
223	139,932	-34,241	13,225	57,474
224	139,92	-34,253	13,569	59,177
225	139,881	-35,131	13,618	58,137
226	139,938	-33,602	13,217	55,859
227	139,882	-35,346	13,606	57,949
228	139,857	-33,037	13,742	57,211
229	139,885	-34,659	13,28	56,413
230	139,844	-32,57	13,547	57,155
231	139,817	-29,994	13,644	57,375
232	139,816	-35,942	13,263	55,608
233	139,807	-31,447	13,54	57,032
234	139,757	-33,038	13,723	58,418
235	139,73	-32,61	13,255	55,809
236	139,714	-34,289	13,491	56,967
237	139,629	-33,498	13,65	57,945
272	119,968	-33,313	13,742	47,995
273	119,911	-31,271	13,535	47,11
274	119,925	-34,995	13,27	46,62
275	119,891	-31,55	13,672	48,169
276	119,87	-34,872	13,483	47,416
277	119,839	-32,854	13,264	47,443
278	119,852	-33,514	13,687	49,354
279	119,762	-33,862	13,473	47,359
280	119,818	-33,806	13,322	46,949
281	119,708	-32,782	13,7	47,962
282	119,77	-33,637	13,416	47,005
283	119,724	-34,078	13,335	46,778
284	119,697	-33,382	13,728	47,881
285	119,647	-32,607	13,408	46,457
286	119,654	-34,027	13,332	46,818

287	119,775	-35,201	13,771	47,94
326	100,082	-30,81	13,376	38,556
327	100,139	-30,395	13,336	38,283
328	100,018	-32,333	13,692	40,035
329	99,964	-30,537	13,37	38,102
330	100,025	-30,33	13,327	38,368
331	100,018	-31,61	13,702	39,619
332	99,957	-30,669	13,307	37,448
333	99,997	-32,749	13,408	38,575
334	100,058	-29,925	13,722	39,702
335	100,033	-32,188	13,321	38,571
336	99,954	-31,713	13,468	38,009
337	99,937	-30,974	13,644	38,689
338	99,927	-31,498	13,268	38,495
339	99,95	-32,259	13,487	39,006
340	99,923	-29,808	13,675	38,699
341	99,986	-32,399	13,234	38,279
380	80,082	-31,333	15,612	30,741
381	80,038	-31,542	15,299	29,166
382	80,049	-30,808	15,201	29,671
383	79,991	-30,595	15,687	30,248
384	79,941	-29,375	15,19	29,183
385	79,952	-31,352	15,29	29,845
386	79,916	-30,318	15,593	30,629
387	79,945	-29,425	15,202	29,126
388	79,904	-30,562	15,33	30,468
389	79,91	-30,415	15,593	30,286
390	79,925	-31,087	15,147	29,305
391	79,907	-27,973	15,402	30,159
392	79,941	-33,459	15,565	31,014
393	79,937	-29,185	15,148	30,089
394	79,98	-29,461	15,423	30,168
395	80,033	-32,131	15,52	30,727
434	60,097	-25,532	15,195	21,567
435	60,094	-27,708	15,617	22,087
436	60,106	-26,142	15,218	21,355
437	60,036	-27,357	15,295	21,634
438	60,054	-27,119	15,598	22,186
439	60,021	-28,08	15,142	21,549
440	60,021	-27,347	15,325	21,89
441	59,996	-27,92	15,597	22,658
442	59,972	-27,409	15,115	21,881
443	59,994	-27,092	15,418	21,578
444	60,002	-27,919	15,524	22,211
445	60,005	-27,314	15,111	21,571
446	60,041	-26,565	15,425	22,064
447	60,053	-29,974	15,505	22,345
448	60,037	-25,446	15,099	21,219
449	59,909	-28,607	15,543	21,923
450	59,968	-25,417	15,416	21,968
451	59,949	-27,821	15,161	21,806
490	40,101	-28,427	15,613	13,725
491	40,153	-27,454	15,111	13,386
492	40,113	-29,116	15,43	14,061
493	40,068	-28,724	15,518	13,963
494	40,069	-27,237	15,11	13,765
495	40,039	-29,83	15,452	14,403
496	40,043	-28,447	15,464	14,042
497	40,006	-29,745	15,113	13,518
498	40,019	-27,206	15,512	13,853

499	39,986	-30,261	15,477	13,764
500	39,979	-27,949	15,095	13,641
501	39,929	-29,035	15,539	13,867
502	39,967	-30,127	15,389	14,019
503	39,954	-27,051	15,123	13,658
504	39,97	-28,502	15,522	13,869
505	39,953	-26,649	15,394	13,876
506	39,972	-28,643	15,116	13,311
542	20,112	-26,268	15,539	6,427
543	20,099	-27,756	15,097	6,917
544	20,043	-26,858	15,472	6,289
545	20,042	-28,175	15,465	6,773
546	20,056	-27,977	15,149	6,206

547	19,972	-27,849	15,535	6,336
548	20,068	-26,657	15,405	6,31
549	20,048	-26,343	15,091	6,396
550	19,973	-28,019	15,602	6,015
551	19,973	-28,866	15,301	6,393
552	19,957	-27,605	15,176	6,451
553	19,945	-28,276	15,615	6,29
554	19,928	-26,95	15,255	6,131
555	19,885	-28,467	15,229	6,094
556	19,92	-27,211	15,609	6,118
557	19,903	-28,81	15,199	6,2