

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

ENERGETICKÁ NÁROČNOST MHD

Jan Czagan

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Czagan**
Osobní číslo: **D13219**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Energetická náročnost MHD**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování:

1. Výpočtový model spotřeby nafty linkového autobusu
2. Výpočtový model spotřeby elektrické energie linkového trolejbusu
3. Validace vypočtených hodnot

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Firemní literatura firmy Siemens

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.


Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

9. března 2016

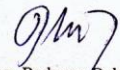
Termín odevzdání bakalářské práce:

27. května 2016



doc. Ing. Ivo Drahošský, Ph.D.
děkan

L.S.



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

V Pardubicích dne 2. března 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 27. května 2016

Jan Czagan

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Jiřímu Pohlovi a doc. Ing. Radovanu Dolečkovi, Ph.D. za odborné vedení, věnovaný čas a pomoc při zpracování mé bakalářské práce.

Další dík patří mojí rodině za podporu a trpělivost v době mého studia.

Jan Czagan

Tato práce se zabývá tématem energetické náročnosti. Vytvořený matematický model vypočítává teoretické spotřeby vozidel. Práce vzniká na území Dopravního podniku města Pardubic, proto byl model tvořen a modifikován pro výpočet spotřeby autobusu a trolejbusu. Oba výpočty budou probíhat na konkrétní lince číslo 3, následovat bude vždy analýza výpočtu doplněna grafy a schématem energetických toků. Nakonec bude provedena validace vypočtených a skutečných hodnot.

This work is about issues with energy intensity. Mathematical model calculates theoretical fuel consumption. The work arises in the region of DPMP that's why the model was created and modified for calculation consumption of bus and trolleybus. Both calculations will be going on a particular traffic line number 3, following analysis of the calculation will be completed with graphs and energetic flow diagrams. In the end, there will be a validation of calculated and real values.

Klíčová slova:

Vozidlo,
Matematický model,
Analýza,
Validace,
Dopravní podnik,

Key words:

Vehicle,
Mathematical model,
Analysis,
Validation,
Transport company,

OBSAH

Úvod.....	8
1. Obecná teorie	9
1.1. Fyzikální základ	9
1.2. Linka	10
1.3. Vstupy.....	10
1.4. Vzorce použité při výpočtech	13
1.4.1. Vzorce pro autobus	13
1.4.2. Vzorce pro trolejbus	32
2. Výpočtový model spotřeby nafty linkového autobusu	35
2.1. Tabulky s výpočty.....	35
2.2. Analýza výpočtu	37
2.3. Energetická bilance.....	42
2.4. Schéma energetických toků	43
2.5. Validace	44
3. Výpočtový model spotřeby elektrické energie linkového trolejbusu	46
3.1. Tabulky s výpočty.....	46
3.2. Analýza výpočtů	49
3.3. Energetická bilance trolejbusu.....	52
3.4. Schéma energetických toků trolejbusu	54
3.5. Validace spotřeby trolejbusu	55
Závěr	56
Seznam obrázků:.....	57
Seznam grafů:	58
Seznam tabulek	59
Zdroje.....	60

Úvod

Energie, z řeckého *energeia* (schopnost k činům), je skalární veličina charakterizována jako schopnost hmoty konat práci. Zákon zachování energie říká, že energii lze měnit z jednoho druhu na jiný, ale nelze ji vytvořit ani zničit.

Název této bakalářské práce je energetická náročnost městské hromadné dopravy (dále MHD). Tato práce přistupuje k tématu po teoretické stránce. Pomocí matematického a fyzikálního aparátu řeší výpočet spotřeby vozidel MHD. Všechny výpočty probíhaly v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. V rámci MHD je tato práce řešena na území Dopravního podniku města Pardubic. Z tohoto důvodu bude výpočet spotřeby řešen pro autobus a trolejbus. Výpočet, pro obě vozidla, bude probíhat na jednotné lince, tak aby bylo možné i případné porovnání.

Obsahově lze tuto práci rozdělit do 3 velkých částí. První z nich bude část obecná. Zde si na začátku ukážeme elementární fyzikální vztahy, ze kterých budeme pro práci vycházet. Potom se seznámíme s linkou, kde bude probíhat výpočet pro oba druhy vozidel. Následovat pak již bude samotný matematický model spotřeby. Nejprve se seznámíme se všemi vstupy, jak v případě autobusu, tak v případě trolejbusu, neboť určité vstupy se mezi těmito vozidly mění. Po seznámení se vstupy budou následovat veškeré vzorce použité ve výpočtech. Stejně jako v případě vstupů, si zde nejprve všechny vzorce provedeme pro autobus a v případě trolejbusu doplníme pouze nové vztahy.

Druhá a třetí část práce bude mít již podobnou strukturu. Zde již si ukážeme samotný matematický model spotřeby. V druhé části bude k vidění matematický model pro autobus, ve třetí části pro trolejbus. Pro oba případy si vždy nejprve ukážeme onen matematický model. Po něm bude následovat analýza, v podobě množství grafů. Na tuto část bude ještě navazovat energetická bilance a schéma energetických toků. Nakonec bude provedena validace se skutečnými hodnotami.

1. Obecná teorie

1.1. Fyzikální základ

Výpočtový model je vytvořen pomocí elementárních fyzikálních vzorců. Pohyb vozidla je chápán vždy jako přímočarý pohyb. Změny rychlosti jsou uvažovány vždy rovnoměrné. Síly působící na vozidlo lze rozdělit na sílu tahu motoru a působící odpory. Mezi síly působící proti tahu motoru řadíme odpor vzduchu a valivý odpor.

$$s = v \cdot t \quad (1)$$

$$v = v_0 + a \cdot t \quad (2)$$

$$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (3)$$

$$F_t = \delta \cdot m \cdot a \quad (4)$$

$$F_o = \varphi \cdot m \cdot g \quad (5)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \quad (6)$$

$$W = F \cdot s \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (8)$$

s ... dráha [m]

s_0 ... počáteční dráha [m]

v ... okamžitá rychlost [m/s]

v_0 ... počáteční rychlost [m/s]

t ... čas [s]

a ... zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

F_t ... síla potřebná ke zrychlení [N]

F_o ... síla valivého odporu [N]

F_v ... síla odporu vzduchu [N]

m ... hmotnost [kg]

g ... gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

δ ... součinitel rotačních hmot [1]

φ ... měrný jízdní odpor [1]

ρ ... hustota prostředí [kg/m^3]

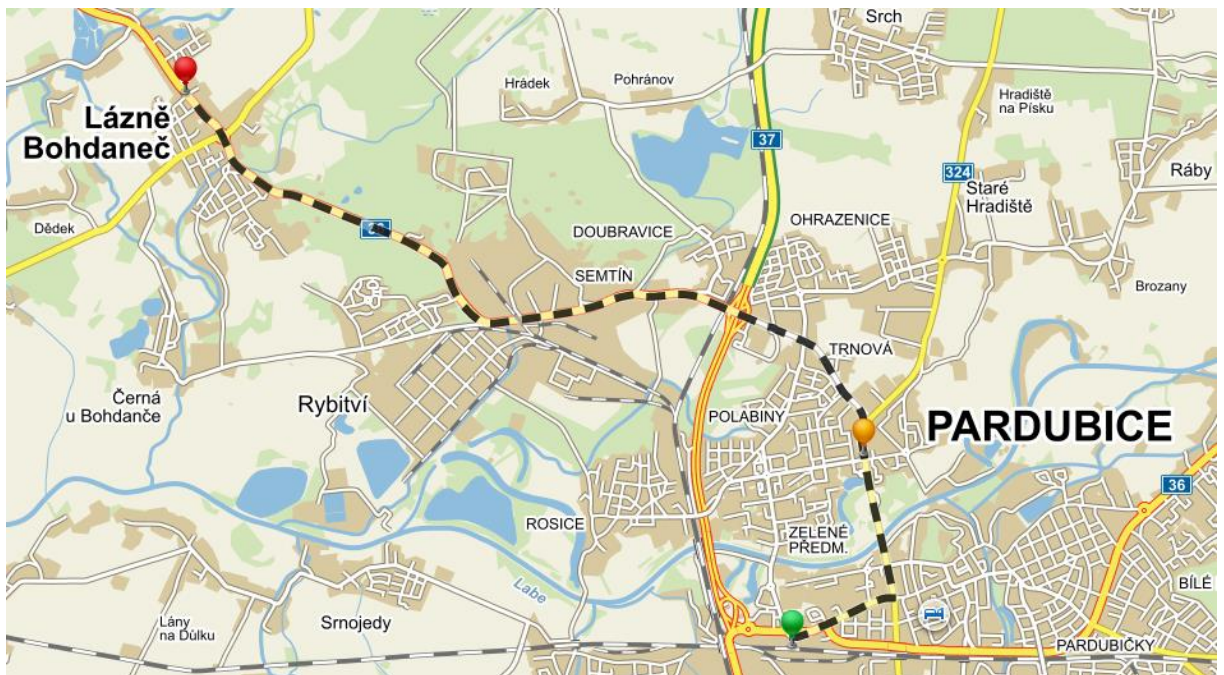
C_x ... součinitel odporu [1]

W ... práce [J]

E ... energie [J]

1.2. Linka

Tento celý matematický model budu vytvářet v rámci Dopravního podniku města Pardubic. Jako vzorový spoj si vyberu linku číslo 3, která vede ze stanice Pardubice – Hlavní nádraží na točnu v Lázních Bohdanči. Linka je dlouhá přibližně 10,8 km a je na ní 18 zastávek (včetně Hlavního nádraží a točny v Lázních Bohdanči). Tato linka byla zvolena pro svoji komplexnost. Například jako jedna z mála linek se dostává mimo obec. Na trase se nachází i několik terénních nerovností, ale výsledný rozdíl nadmořských výšek mezi Hlavním nádražím a točnou v Lázních Bohdanči je zanedbatelný. Proto i v této práci zanedbávám stoupání a klesání. Naopak nutné je již alespoň částečně započítat změny pohybu vozidla mezi zastávkami. Tyto změny bývají způsobeny hlavně semaforey, přechody a kruhovými objezdy. Na lince se nachází 5 semaforů, 4 kruhové objezdy a kolem 20 přechodů pro chodce. Na této trase porovnáám spotřebu energie autobusu a trolejbusu.



obr 1 - Mapa linky [5]

1.3. Vstupy

Výpočet matematického modelu spotřeby obsahuje velké množství vstupů. Větší část vstupů si vysvětlíme na matematickém modelu spotřeby autobusu. Lišící se vstupy pro matematický model spotřeby trolejbusu budou přidány až za poslední vstupy autobusu (sestupně). V první části se zadávají informace o vozidlu. Ideální tedy je si vybrat konkrétní typ vozidla. Pro účely výpočtu byl zvolen autobus Iveco Crossway LE, který Dopravní podnik města Pardubic zakoupil v roce 2015. Pohotovostní hmotnost se může autobus od autobusu lišit, neboť záleží

i na poměru míst k sezení a ke stání či výbavě autobusu. Náš autobus bude mít pohotovostní hmotnost 10,5 tuny. Pro náš výpočet je ale mnohem důležitější celková hmotnost vozidla. K pohotovostní hmotnosti musíme připočítat ještě váhu cestujících a řidiče. Počet cestujících se může velmi lišit. Záleží na denní době, kdy spoj jede, nebo také na klimatických podmínkách či konkrétních dnech v týdnu. Z těchto parametrů jsem vlastním šetřením ustanovil průměrný počet lidí v autobuse v náhodný čas na 20. Průměrnou hmotnost cestujícího jsem zvolil 70 kg, neb průměrný dospělý člověk váží více, ale speciálně na lince číslo 3 je nutno vzít v potaz děti jedoucí do škol. Další z důležitých parametrů vozidla je výška a šířka. Tyto hodnoty jsou velmi důležité pro výpočet čelní plochy a následný odpor vzduchu. Pouze pro orientaci a pro porovnání s trolejbusem je zde vložena i délka vozidla.

Další vstupy, které je nutno zadat, se týkají linky. Velice důležitý je parametr počtu zastávek, neb ten se výrazně promítá do výsledné spotřeby z hlediska rozjezdů. Počet zastávek se zadává včetně úvodní zastávky a točny na konci. Dále je nutno zadat délku linky a dobu cesty. Tyto parametry jsou důležité z hlediska času a rychlosti. Následně lze zadat i dobu před odjezdem a po příjezdu před a po projetí linky. Další nezanedbatelný parametr je délka stání na zastávce. Tento parametr se opět může velmi lišit v závislosti na počtu nastupujících a vystupujících. Tato hodnota je následně projeví v tzv. základní spotřebě, kde uvažujeme volnoběh. Následující vstupy se týkají rychlostí a zrychlení. Zde zadáváme doby zrychlení a zpomalení z nuly či na nulu v obci. Přesnost těchto parametrů je velmi důležitá z hlediska spotřeby energie při rozjezdech. Pro zpomalení chápeme celý proces jako spotřebu při volnoběhu neb energii brzdění neřešíme. Nakonec zde máme rychlosti mimo obec a v obci. Mimo obec ještě nenastává takový problém, jelikož autobus se pohybuje sice ne úplně rovnoměrně, ale výkyvy jsou zanedbatelné. Problém nastává pro určení rychlosti v obci. Tato hodnota může být velice zákeřná, neboť zvláště ve městě se o nějakém rovnoměrném pohybu nedá vůbec mluvit. Důležité je tak určit co nejpřesnější poměr mezi průměrnou rychlostí a neplánovanými zastaveními. Mezi neplánované zastavení řadíme například semaforey, kruhové objezdy nebo přechody. Avšak u těchto dopravních prvků se doprava často kumuluje, a ačkoliv vozidlo zrovna nezastaví, tak může zpomalit. Tato nerovnoměrná jízda způsobuje obrovské nárůsty spotřeby a velice těžko ji lze podchytit. Vyvstává tu i problém dopravních špiček, který je pro Pardubice velice aktuální. Jako poslední vstup z této části zadáváme délku úseku mimo obec. Ačkoliv totiž mnoho linek jezdí pouze po městě, tak několik linek se dostává z Pardubic. Asi rekordní je v tomto linka čísla 18, která začíná i končí relativně daleko od Pardubic (Mikulovice – Nerad).

Další vstupy jsou obecnějšího charakteru. Konkrétně se jedná o součinitel odporu C_x , který spolu s hustotou vzduchu ρ slouží pro výpočet odporu vzduchu. Dále zadáváme tzv. měrný jízdní odpor φ , který slouží k výpočtu valivého odporu. Zde se jedná o známou hodnotu 0,008 (v případě železnice by to bylo 0,001). Nesmíme taktéž opomenout gravitační zrychlení, které ovlivňuje valivý odpor. Místo obecně používané hodnoty 10 m/s^2 zadáme přesnější konstantu $9,81 \text{ m/s}^2$. Další z parametrů je součinitel rotačních hmot. Tato konstanta nám upřesňuje výslednou sílu potřebou k rozjezdu. Mezi další parametry týkající se rozjezdu nesmíme opomenout počet úseků mimo obec, neboť každý výjezd z obce znamená akceleraci a nárůst spotřeby energie.

Poslední část vstupů se týká hlavně upřesnění spotřeby z hlediska zisku energie a mechanických účinností. První z parametrů je jmenovitý příkon vedlejší spotřeby. Do vedlejší spotřeby řadíme pohon vzduchového kompresoru, pohon chladivového kompresoru klimatizace, pohon pomocného alternátoru palubní sítě a příkon topení (mimo odpadní teplo). S tímto parametrem jde ruku v ruce zatěžovatel vedlejší spotřeby. Z výše uvedeného vyplývá, že tato hodnota bude závislá na klimatických podmínkách a obsazenosti vozidla. Každé zařízení má svoji účinnost, která nikdy nedosáhne 100%, proto i mechanismy patřící do vedlejší spotřeby pracují s určitou účinností. Tento parametr se nazývá účinnost náhonu pomocných zařízení, a ačkoliv dosahuje cca 96% nelze ji zanedbat. Spolu s vedlejší spotřebou existuje samozřejmě i základní spotřeba. Tuto hodnotu víceméně odhadujeme a představujeme si ji jako volnoběh nebo také jako tzv. základní spotřebu, která působí stále, když je motor v chodu. Poslední část vstupů se týká převedení spotřebované energie do spotřeby paliva. Zde je nutné zadat měrnou hmotnost paliva a výhřevnost paliva. V našem případě jako palivo poslouží motorová nafta. Měrná hmotnost nafty je $0,84 \text{ kg/litr}$ a výhřevnost cca 12 kWh/kg . Například v porovnání s benzínem je výhřevnost nafty menší (benzín 12,1), ale jinak má nafta jednu z nejlepších výhřevností na kilogram vůbec.

V následující části zadáváme jako vstup ještě skutečnou hodnotu spotřeby v jednotkách spotřeby litrů na 100 km. Rozbor této hodnoty bude proveden až v sekci validace.

Pro úplnost na samotném konci si můžeme shrnout výslednou energetickou bilanci, kde vidíme všechny prvky výsledné spotřeby energie. Tzn. valení, aerodynamiku, třecí brzdění, základní spotřebu, vedlejší spotřebu a ztráty.

V případě matematického modelu spotřeby trolejbusu se mnoho vstupů opakuje. Ukážeme si tedy pouze ty nové, popřípadě změněné. Na začátek je nutné si ujasnit typ trolejbusu. Pro

lepší ukázkou matematického modelu jsem zvolil trolejbus Škoda 24Tr. Volba padla na tuto verzi proto, že v rámci linky číslo 3 se jedná o velice časté vozidlo, které se svými rozměry podobá autobusu Ivecu Crossway LE. Rozdíl hmotností vozidel je tuna, kdy trolejbus váží 11,5 tuny. Následující vstupy jsou stejné. Liší se až průměrná rychlost mimo obec. Zde místo 75 km/h jako v případě autobusu jsem zvolil pouze 60 km/h. Je to z důvodu maximální nastavené rychlosti, která u tohoto vozidla je 65 km/h. Dále proběhla výměna účinností v rámci celkové trakční energie. Zůstala účinnost pohonu kol a k ní se přidaly účinnosti elektromotoru a měniče. Zde se jedná vždy o odhady účinností. Nicméně již nový vstup je podíl rekuperačního brzdění. V případě autobusu jsme rekuperaci nijak blíže neřešili, zde to již je nutné. Podíl byl zvolen 90 %. Vedlejší spotřeba zůstala, ale z principu trolejbusu zmizela základní spotřeba. Místo toho zde máme ještě jeden nový vstup a to účinnost pevných trakčních zařízení. Zde se jedná o započítání ztrát mezi vozidlem a rozvodnou.

1.4. Vzorce použité při výpočtech

V této části si ukážeme vzorce k dílčím výpočtům spotřeby. Posloupnost vzorců bude, v rámci tabulek s výpočty spotřeby autobusu, od shora dolů. Vzorce se spotřebou trolejbusu budou z velké části stejné, proto nové vztahy budou přidány až za poslední vzorec pro autobus. Chronologie opět bude stejná, v rámci tabulek, sestupná. Formát vzorců zvolím stejný jako v případě kapitoly Fyzikální základ.

1.4.1. Vzorce pro autobus

Hmotnost všech lidí ve vozidle (včetně řidiče) vypočteme pomocí vzorce:

$$m_{cl} = (x + 1) \cdot m_p \quad (9)$$

m_{cl} ... hmotnost všech lidí ve vozidle [kg]

m_p ... průměrná hmotnost člověka [kg]

x ... střední počet cestujících [1]

Pro nás je však daleko důležitější vzorec pro střední celkovou hmotnost:

$$m_c = m_{cl} + m_v \quad (10)$$

m_c ... střední celková hmotnost [kg]

m_{cl} ... celková hmotnost lidí [kg]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Z hlediska aerodynamiky je důležitý vzorec pro čelní plochu vozidla:

$$S = (a \cdot b) / 1\,000\,000 \quad (11)$$

S ... čelní plocha vozidla [m^2]

a ... šířka vozidla [mm]

b ... výška vozidla [mm]

Vzorec pro střední vzdálenost mezi zastávkami:

$$s_{st} = 1\,000 \cdot \frac{s_l}{x_z + 1} \quad (12)$$

s_{st} ... střední vzdálenost mezi zastávkami [m]

s_l ... délka linky [km]

x_z ... počet zastávek [1]

Doba pohotovosti vozidla:

$$t_c = t_p + t_s + t_k \quad (13)$$

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

t_p ... doba cesty [min]

t_s ... doba před odjezdem [min]

t_k ... doba po příjezdu [min]

Vzorec pro cestovní rychlost:

$$v_{cr} = 60 \cdot \frac{s_l}{t_p} \quad (14)$$

v_{cr} ... cestovní rychlost [km/h]

t_p ... doba cesty [min]

s_l ... délka linky [km]

Nutné je taktéž znát dobu jízdy:

$$t_j = t_z - x_z \cdot \frac{t_z}{60} \quad (15)$$

t_j ... doba jízdy [min]

t_z ... střední doba stání na 1 zastávce [s]

x_z ... počet zastávek [1]

Vzorec pro technickou rychlost:

$$v_t = \frac{s_l}{t_j} \cdot 60 \quad (16)$$

v_t ... technická rychlost [km/h]

t_j ... doba jízdy [min]

s_l ... délka linky [km]

Zrychlení ze zastávky:

$$a_a = \frac{v_{po}}{\frac{3,6}{t_a}} \quad (17)$$

a_a ... zrychlení ze zastávky [m/s^2]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

t_a ... doba zrychlení na průměrnou rychlost v obci [s]

Zpomalení (do úplného zastavení) do zastávky:

$$a_b = \frac{0 - v_{po}}{\frac{3,6}{t_b}} \quad (18)$$

a_a ... zrychlení ze zastávky [m/s^2]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

t_b ... doba k zastavení z průměrné rychlosti v obci [s]

Dráha zrychlení:

$$s_a = \frac{v_{po}}{\frac{3,6}{2}} \cdot t_a \quad (19)$$

s_a ... dráha zrychlení [m]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

t_a ... doba zrychlení na průměrnou rychlost v obci [s]

Dráha zpomalení:

$$s_b = \frac{v_{po}}{\frac{3,6}{2}} \cdot t_b \quad (20)$$

s_b ... dráha zpomalení [m]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

t_b ... doba zrychlení na průměrnou rychlost v obci [s]

Celková dráha zrychlení:

$$s_{ca} = (x_z + x_{nz}) \cdot s_a \quad (21)$$

s_{ca} ... celková dráha zrychlení [m]

s_a ... dráha zrychlení [m]

x_z ... počet zastávek [1]

x_{nz} ... počet neplánovaných zastavení [1]

Celková dráha zpomalení:

$$s_{cb} = (x_z + x_{nz}) \cdot s_b \quad (22)$$

s_{cb} ... celková dráha zpomalení [m]

s_b ... dráha zpomalení [m]

x_z ... počet zastávek [1]

x_{nz} ... počet neplánovaných zastavení [1]

Dráha průměrné rychlosti v obci:

$$s_{po} = s_l - \frac{s_{ca}}{1000} - \frac{s_{cb}}{1000} - s_{mo} \quad (23)$$

s_{po} ... dráha průměrné rychlosti v obci [km]

s_{mo} ... úsek mimo obec [km]

s_l ... délka linky [km]

s_{ca} ... celková dráha zrychlení [m]

s_{cb} ... celková dráha zpomalení [m]

Síla valivého odporu:

$$F_v = \varphi \cdot m_c \cdot g \quad (24)$$

F_v ... síla valivého odporu [N]

φ ... měrný jízdní odpor [1]

m_c ... střední celková hmotnost [kg]

g ... gravitační zrychlení [m/s^2]

Síla ke zrychlení:

$$F_z = \delta \cdot m_c \cdot a_a \quad (25)$$

F_z ... síla ke zrychlení [N]

a_a ... zrychlení ze zastávky [m/s^2]

δ ... součinitel rotačních hmot [1]

m_c ... střední celková hmotnost [kg]

Síla odporu vzduchu při rozjezdu:

$$F_{oz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot \left(\frac{v_{po}}{3,6}\right)^2 \quad (26)$$

F_{oz} ... síla odporu vzduchu při rozjezdu [N]

ρ ... hustota prostředí [kg/m⁻³]

C_x ... součinitel odporu [1]

S ... čelní plocha vozidla [m²]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

Celková tažná síla při rozjezdu:

$$F_{CZ} = F_v + F_z + F_{oz} \quad (27)$$

F_{CZ} ... celková tažná síla při rozjezdu [N]

F_{oz} ... síla odporu vzduchu při rozjezdu [N]

F_z ... síla ke zrychlení [N]

F_v ... síla valivého odporu [N]

Síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci:

$$F_{ozo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot \left(\frac{v_{po}}{3,6}\right)^2 \quad (28)$$

F_{ozo} ... síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci [N]

ρ ... hustota prostředí [kg/m⁻³]

C_x ... součinitel odporu [1]

S ... čelní plocha vozidla [m²]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

Síla pro jízdu ustálenou rychlostí v obci:

$$F_{po} = F_v + F_{ozo} \quad (29)$$

F_{po} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí v obci [N]

F_{ozo} ... síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci [N]

F_v ... síla valivého odporu [N]

Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlostí v obci:

$$P_{tvo} = F_{po} \cdot \frac{v_{po}}{3600} \quad (30)$$

P_{tvo} ... trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlostí v obci [kW]

F_{po} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí v obci [N]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

Síla odporu vzduchu mimo obec:

$$F_{vzo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot \left(\frac{v_{pv}}{3,6}\right)^2 \quad (31)$$

F_{vzo} ... síla odporu vzduchu mimo obec [N]

ρ ... hustota prostředí [kg/m^3]

C_x ... součinitel odporu [1]

S ... čelní plocha vozidla [m^2]

v_{pv} ... průměrná rychlost mimo obec [km/h]

Síla pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec:

$$F_{pv} = F_v + F_{vzo} \quad (32)$$

F_{pv} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec [N]

F_{vzo} ... síla odporu vzduchu mimo obec [N]

F_v ... síla valivého odporu [N]

Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec:

$$P_{tvv} = F_{pv} \cdot \frac{v_{pv}}{3600} \quad (33)$$

P_{tvv} ... trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec [kW]

F_{pv} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec [N]

v_{pv} ... průměrná rychlost mimo obec [km/h]

Kinetická energie 1. rozjezdu:

$$E_{a1} = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot m_c \cdot \frac{\left(\frac{v_{po}}{3,6}\right)^2}{3600000} \quad (34)$$

E_{a1} ... kinetická energie 1. rozjezdu [kWh]

δ ... součinitel rotačních hmot [1]

m_c ... střední celková hmotnost [kg]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

Trakční energie 1. rozjezdu:

$$P_{a1} = F_{cz} \cdot \frac{s_a}{3600000} \quad (35)$$

P_{a1} ... trakční energie 1. rozjezdu [kWh]

F_{cz} ... celková tažná síla při rozjezdu [N]

s_a ... dráha zrychlení [m]

Kinetická energie 2. rozjezdu:

$$E_{a2} = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot m_c \cdot \frac{\left(\frac{v_{pv}}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{v_{po}}{3,6}\right)^2}{3600000} \quad (36)$$

E_{a2} ... kinetická energie 2. rozjezdu [kWh]

δ ... součinitel rotačních hmot [1]

m_c ... střední celková hmotnost [kg]

v_{po} ... průměrná rychlost obcí [km/h]

v_{pv} ... průměrná rychlost mimo obec [km/h]

Celková trakční energie rozjezdů:

$$P_a = E_{a1} \cdot (x_z + x_{nz}) + E_{a2} \cdot x_{mo} \quad (37)$$

P_a ... celková trakční energie rozjezdů [kWh]

E_{a1} ... kinetická energie 1. rozjezdu [kWh]

E_{a2} ... kinetická energie 2. rozjezdu [kWh]

x_{mo} ... počet úseků mimo obec [1]

x_z ... počet zastávek [1]

x_{nz} ... počet neplánovaných zastavení [1]

Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí v obci:

$$P_o = F_{po} \cdot s_{po} \cdot \frac{1000}{3600000} \quad (38)$$

P_o ... trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí v obci [kWh]

F_{po} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí v obci [N]

s_{po} ... dráha průměrné rychlosti v obci [km]

Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí mimo obec:

$$P_v = F_{pv} \cdot s_{pv} \cdot \frac{1000}{3600000} \quad (39)$$

P_v ... trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí mimo obec [kWh]

F_{pv} ... síla pro jízdu ustálenou rychlostí mimo obec [N]

s_{pv} ... dráha průměrné rychlosti mimo obec [km]

Celková trakční energie:

$$P_c = P_v + P_o + P_a \quad (40)$$

P_c ... celková trakční energie [kWh]

P_o ... trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí v obci [kWh]

P_v ... trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí mimo obec [kWh]

P_a ... celková trakční energie rozjezdů [kWh]

Gradient spotřeby trakční energie:

$$g_c = \frac{P_c}{s_l} \quad (41)$$

g_c ... gradient spotřeby trakční energie [kWh/km]

P_c ... celková trakční energie [kWh]

s_l ... délka linky [km]

Měrná dopravní spotřeba trakční energie:

$$P_{dc} = \frac{P_c}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (42)$$

P_{dc} ... měrná dopravní spotřeba trakční energie [kWh/tkm]

P_c ... celková trakční energie [kWh]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná přepravní spotřeba trakční energie:

$$P_{pc} = \frac{P_c}{s_l \cdot x} \quad (43)$$

P_{pc} ... měrná přepravní spotřeba trakční energie [kWh/oskm]

P_c ... celková trakční energie [kWh]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Diferenciální účinnost pohonu:

$$\gamma_c = (\gamma_m \cdot \gamma_{př} \cdot \gamma_k) / 10\,000 \quad (44)$$

γ_c ... diferenciální účinnost pohonu [%]

γ_m ... diferenciální účinnost spalovacího motoru [%]

$\gamma_{př}$... účinnost převodovky [%]

γ_k ... účinnost pohonu kol [%]

Celková trakční energie na vstupu vozidla:

$$P_{ic} = \frac{P_c}{\frac{\gamma_c}{100}} \quad (45)$$

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

P_c ... celková trakční energie [kWh]

γ_c ... diferenciální účinnost pohonu [%]

Gradient spotřeby trakční energie na vstupu vozidla:

$$g_{ic} = \frac{P_{ic}}{s_l} \quad (46)$$

g_{ic} ... gradient spotřeby trakční energie na vstupu vozidla [kWh/km]

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

Měrná dopravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla:

$$P_{dic} = \frac{P_{ic}}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (47)$$

P_{dic} ... měrná dopravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla [kWh/tkm]

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná přepravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla:

$$P_{pic} = \frac{P_{ic}}{s_l \cdot x} \quad (48)$$

P_{pic} ... měrná přepravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla [kWh/oskm]

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Doba působení základní a vedlejší spotřeby = t_c

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Provozní příkon vedlejší spotřeby:

$$P_{přv} = P_{jpřv} \cdot \frac{\gamma_{přv}}{100} \quad (49)$$

$P_{přv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby [kW]

$P_{jpřv}$... jmenovitý příkon vedlejší spotřeby [kW]

$\gamma_{přv}$... zatěžovatel vedlejší spotřeby [%]

Účinnost vedlejší spotřeby:

$$\gamma_v = \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{pz}}{100} \quad (50)$$

γ_v ... účinnost vedlejší spotřeby [%]

γ_m ... diferenciální účinnost spalovacího motoru [%]

γ_m ... účinnost náhonu pomocných zařízení [%]

Provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla:

$$P_{přiv} = \frac{P_{přv}}{\frac{\gamma_v}{100}} \quad (51)$$

$P_{přiv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

γ_v ... účinnost vedlejší spotřeby [%]

$P_{přiv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby [kW]

Energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla:

$$E_{iv} = \frac{t_c \cdot P_{přiv}}{60} \quad (52)$$

E_{iv} ... energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

$P_{přiv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Energie základní spotřeby na vstupu vozidla:

$$E_{iz} = \frac{t_c \cdot P_{přiz}}{60} \quad (53)$$

E_{iz} ... energie základní spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

$P_{přiz}$... příkon základní spotřeby na vstupu vozidla [kW]

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Příkon základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla:

$$P_{přvz} = P_{přiz} + P_{přiv} \quad (54)$$

$P_{přvz}$... příkon základní spotřeby a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

$P_{přiz}$... příkon základní spotřeby na vstupu vozidla [kW]

$P_{přiv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

Energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla:

$$E_{vz} = \frac{P_{přvz} \cdot t_c}{60} \quad (55)$$

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

$P_{přvz}$... příkon základní spotřeby a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Gradient základní a vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla:

$$g_{vz} = \frac{E_{vz}}{s_l} \quad (56)$$

g_{vz} ... gradient základní a vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla [kWh/km]

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

Měrná základní a vedlejší spotřeba dopravní energie na vstupu vozidla:

$$E_{dvz} = \frac{E_{vz}}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (57)$$

E_{dvz} ... měrná základní a vedlejší spotřeba dopravní energie na vstupu vozidla [kWh/tkm]

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná základní a vedlejší spotřeba přepravní energie na vstupu vozidla:

$$E_{pvz} = \frac{E_{vz}}{s_l \cdot x} \quad (58)$$

E_{pvz} ... měrná základní a vedlejší spotřeba přepravní energie na vstupu vozidla [kWh/oskm]

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Celková spotřeba energie na vstupu vozidla:

$$E_{ic} = E_{vz} + P_{ic} \quad (59)$$

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

Gradient spotřeby energie na vstupu vozidla:

$$g_{eic} = \frac{E_{ic}}{s_l} \quad (60)$$

g_{ic} ... gradient spotřeby energie na vstupu vozidla [kWh/km]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

Měrná dopravní spotřeba energie na vstupu vozidla:

$$E_{dic} = \frac{E_{ic}}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (61)$$

E_{dic} ... měrná dopravní spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh/tkm]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná přepravní spotřeba energie na vstupu vozidla:

$$E_{pic} = \frac{E_{ic}}{s_l \cdot x} \quad (62)$$

E_{pic} ... měrná přepravní spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh/oskm]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Podíl trakce na celkové spotřebě energie:

$$\beta_t = 100 \cdot \frac{P_{ic}}{E_{ic}} \quad (63)$$

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

β_t ... podíl trakce na celkové spotřebě energie [%]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

Podíl základní a vedlejší spotřeby na celkové spotřebě energie:

$$\beta_{vz} = 100 \cdot \frac{E_{vz}}{E_{ic}} \quad (64)$$

E_{vz} ... energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

β_{vz} ... podíl základní a vedlejší spotřeby na celkové spotřebě energie [%]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

Výhřevnost paliva:

$$H_c = H_j \cdot m_f \quad (65)$$

H_c ... výhřevnost paliva [kWh/litr]

H_j ... jmenovitá výhřevnost paliva [kWh/kg]

m_f ... měrná hmotnost paliva [kg/litr]

Celková spotřeba paliva na vstupu vozidla:

$$V_f = \frac{E_{ic}}{H_c} \quad (66)$$

V_f ... celková spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

H_c ... výhřevnost paliva [kWh/litr]

Gradient spotřeby paliva na vstupu vozidla:

$$g_{vic} = \frac{V_f}{s_l} \quad (67)$$

g_{vic} ... gradient spotřeby paliva na vstupu vozidla [litr/km]

V_f ... celková spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr]

s_l ... délka linky [km]

Měrná dopravní spotřeba paliva na vstupu vozidla:

$$V_{df} = \frac{V_f}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (68)$$

V_{df} ... měrná dopravní spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr/tkm]

V_f ... celková spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná přepravní spotřeba paliva na vstupu vozidla:

$$V_{pff} = \frac{V_f}{s_l \cdot x} \quad (69)$$

V_{pff} ... měrná přepravní spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr/oskm]

V_f ... celková spotřeba paliva na vstupu vozidla [litr]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Gradient spotřeby paliva DP (skutečná hodnota):

$$g_{rf} = \frac{g_{rjf}}{100} \quad (70)$$

g_{rf} ... gradient spotřeby paliva DP [litr/km]

g_{rjf} ... gradient spotřeby paliva DP [litr/100km]

Poměr skutečné a vypočtené hodnoty:

$$\beta_f = \frac{g_{rf}}{g_{vic}} \cdot 100 \quad (71)$$

β_f ... poměr skutečné a vypočtené spotřeby [%]

g_{rf} ... gradient spotřeby paliva DP [litr/km]

g_{vic} ... gradient spotřeby paliva na vstupu vozidla [litr/km]

Celková energie valení:

$$E_r = F_v \cdot \frac{s_l}{3600} \quad (72)$$

E_r ... celková energie spotřebovaná na valení [kWh]

s_l ... délka linky [km]

F_v ... síla valivého odporu [N]

Celková energie spotřebovaná na aerodynamiku:

$$E_{ad} = \frac{F_{oz} \cdot \frac{s_{ca}}{1000} + F_{ozo} \cdot s_{po} + F_{vzo} \cdot s_{mo}}{3600} \quad (73)$$

E_{ad} ... celková energie spotřebovaná na aerodynamiku [kWh]

s_{ca} ... celková dráha zrychlení [m]

F_{oz} ... síla odporu vzduchu při rozjezdu [N]

F_{ozo} ... síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci [N]

s_{po} ... dráha průměrné rychlosti v obci [km]

F_{vzo} ... síla odporu vzduchu mimo obec [N]

s_{mo} ... úsek mimo obec [km]

Celková energie spotřebovaná na třecí brzdění:

$$E_{tb} = E_{a1} \cdot (x_z + x_{nz}) + E_{a2} \cdot x_{mo} \quad (74)$$

E_{tb} ... celková energie spotřebovaná na třecí brzdění [kWh]

E_{a1} ... kinetická energie 1. rozjezdu [kWh]

E_{a2} ... kinetická energie 2. rozjezdu [kWh]

x_z ... počet zastávek [1]

x_{nz} ... počet neplánovaných zastavení [1]

x_{mo} ... počet úseků mimo obec [1]

Energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla:

$$E_{iv} = \frac{t_c \cdot P_{přiv}}{60} \quad (75)$$

E_{iv} ... energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

$P_{přiv}$... provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla [kW]

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Energie základní spotřeby na vstupu vozidla:

$$E_{iz} = \frac{t_c \cdot P_{přiz}}{60} \quad (76)$$

E_{iz} ... energie základní spotřeby na vstupu vozidla [kWh]

$P_{přiz}$... příkon základní spotřeby na vstupu vozidla [kW]

t_c ... doba pohotovosti vozidla [min]

Energie spadající do ztrát v pohonu:

$$E_{zp} = P_{ic} - P_c \quad (77)$$

E_{zp} ... energie ztrát v pohonu [kWh]

P_{ic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

P_c ... celková trakční energie [kWh]

Celková energie spotřebovaná vozidlem = E_{ic}

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

1.4.2. Vzorce pro trolejbus

Diferenciální účinnost pohonu:

$$\gamma_c = (\gamma_{em} \cdot \gamma_{ch} \cdot \gamma_k) / 10\,000 \quad (78)$$

γ_c ... diferenciální účinnost pohonu [%]

γ_{em} ... účinnost elektromotoru [%]

γ_{ch} ... účinnost měniče [%]

γ_k ... účinnost pohonu kol [%]

Kinetická energie:

$$P_{ak} = E_{a1} \cdot (x_z + x_{nz}) + E_{a2} \cdot x_{mo} \quad (79)$$

P_{ak} ... kinetická energie [kWh]

E_{a1} ... kinetická energie 1. rozjezdu [kWh]

E_{a2} ... kinetická energie 2. rozjezdu [kWh]

x_{mo} ... počet úseků mimo obec [1]

x_z ... počet zastávek [1]

x_{nz} ... počet neplánovaných zastavení [1]

Rekuperovaná energie:

$$P_{rak} = P_{ak} \cdot \gamma_{rb} \cdot \gamma_c / 10000 \quad (80)$$

P_{rak} ... rekuperovaná energie [kWh]

P_{ak} ... kinetická energie [kWh]

γ_{rb} ... podíl rekuperačního brzdění [%]

γ_c ... diferenciální účinnost pohonu [%]

Celková trakční energie na vstupu vozidla:

$$P_{tic} = P_{ic} - P_{rak} \quad (81)$$

P_{tic} ... celková trakční energie na vstupu vozidla [kWh]

P_{ic} ... celková odebraná trakční energie [kWh]

P_{rak} ... rekuperovaná energie [kWh]

Celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice:

$$E_{tnp} = \frac{E_{ic}}{\gamma_{tz}} \cdot 100 \quad (82)$$

E_{tnp} ... celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

γ_{tz} ... účinnost pevných trakčních zařízení [%]

Gradient spotřeby energie na vstupu napájecí stanice:

$$g_{teic} = \frac{E_{tnp}}{s_l} \quad (83)$$

g_{teic} ... gradient spotřeby energie na vstupu napájecí stanice [kWh/km]

E_{tnp} ... celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh]

s_l ... délka linky [km]

Měrná dopravní spotřeba energie na vstupu napájecí stanice:

$$E_{tdic} = \frac{E_{tnp}}{s_l \cdot \frac{m_v}{1000}} \quad (84)$$

E_{tdic} ... měrná dopravní spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh/tkm]

E_{tnp} ... celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh]

s_l ... délka linky [km]

m_v ... pohotovostní hmotnost [kg]

Měrná přepravní spotřeba energie na vstupu napájecí stanice:

$$E_{tpic} = \frac{E_{tnp}}{s_l \cdot x} \quad (85)$$

E_{tpic} ... měrná přepravní spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh/oskm]

E_{tnp} ... celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh]

s_l ... délka linky [km]

x ... střední počet cestujících [1]

Energie spadající do ztrát v pevných trakčních zařízeních:

$$E_{zptz} = \frac{E_{tnp}}{s_l \cdot x} \quad (86)$$

E_{zptz} ... energie ztrát v pevných trakčních zařízeních [kWh]

E_{tnp} ... celková spotřeba energie na vstupu napájecí stanice [kWh]

E_{ic} ... celková spotřeba energie na vstupu vozidla [kWh]

2. Výpočtový model spotřeby nafty linkového autobusu

2.1. Tabulky s výpočty

Tabulka 1 - Autobus MHD

Typ	Iveco Crossway LE	
Pohotovostní hmotnost	[kg]	10 500
Střední počet cestujících	[kg]	20
Průměrná hmotnost člověka	[kg]	70
Hmotnost všech lidí ve vozidle	[kg]	1 470
Střední celková hmotnost	[kg]	11 970
Šířka vozidla	[mm]	2 550
Výška vozidla	[mm]	3 230
Délka vozidla	[mm]	12 050
Čelní plocha vozidla	[m ²]	8,2

Tabulka 2 - Linka

Počet zastávek (včetně točny)	[1]	18
Délka linky	[km]	10,8
Střední vzdálenost mezi zastávkami	[m]	568
Doba cesty	[min]	26
Doba před odjezdem	[min]	2
Doba po příjezdu	[min]	2
Doba pohotovosti vozidla	[min]	30
Cestovní rychlost	km/h	24,9
Střední Doba stání na 1 zastávce	[s]	25
Doba jízdy	[min]	17,5
Technická rychlost	[km/h]	37,0
Průměrná rychlost obcí	[km/h]	43
Průměrná rychlost mimo obec	[km/h]	75
Doba zrychlení na průměrnou rychlost v obci	[s]	12
Doba k zastavení z průměrné rychlosti v obci	[s]	10
Zrychlení ze zastávky	[m.s ⁻²]	1,0
Zpomalení do zastávky	[m.s ⁻²]	-1,2
Dráha zrychlení	[m]	72
Dráha zpomalení	[m]	60
Celková dráha zrychlení	[m]	1 505
Celková dráha zpomalení	[m]	1 254
Úsek mimo obec	[km]	1,6
Dráha průměrné rychlosti v obci	[km]	6,44
Počet neplánovaných zastavení	[1]	3

Tabulka 3 - Obecné vlastnosti

Součinitel odporu C_x	[1]	0,8
Měrný jízdní odpor φ	[1]	0,008
Hustota vzduchu	[kg/m ³]	1,2

Tabulka 4 – Síly působící na autobus

Gravitační zrychlení	[m/s ²]	9,81
Součinitel rotačních hmot	[1]	1,1
Síla valivého odporu	[N]	939
Síla ke zrychlení	[N]	13 106
Síla odporu vzduchu při rozjezdu	[N]	282
Celková tažná síla při rozjezdu	[N]	14 327
Síla valivého odporu	[N]	939
Síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci	[N]	564
Síla pro jízdu ustálenou rychlosti v obci	[N]	1 503
Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlosti v obci	[kW]	18
Síla valivého odporu	[N]	939
Síla odporu vzduchu mimo obec	[N]	1 716
Síla pro jízdu ustálenou rychlosti mimo obec	[N]	2 655
Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlosti mimo obec	[kW]	55

Tabulka 5 – Energie autobusu

Kinetická energie 1. rozjezdu	[kWh]	0,26
Trakční energie 1. rozjezdu	[kWh]	0,29
Počet úseků mimo obec	[1]	1
Kinetická energie 2. rozjezdu	[kWh]	0,53
Celková trakční energie rozjezdů	[kWh]	6,52
Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí v obci	[kWh]	2,69
Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí mimo obec	[kWh]	1,18
Celková trakční energie	[kWh]	10,39
Gradient spotřeby trakční energie	[kWh/km]	0,96
Měrná dopravní spotřeba trakční energie	[kWh/tkm]	0,092
Měrná přepravní spotřeba trakční energie	[kWh/oskm]	0,048
Diferenciální účinnost spalovacího motoru	[%]	43
Účinnost převodovky	[%]	96
Účinnost pohonu kol	[%]	96
Diferenciální účinnost pohonu	[%]	40
Celková trakční energie na vstupu vozidla	[kWh]	26,2
Gradient spotřeby trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	2,43
Měrná dopravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,231
Měrná přepravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,121
Doba působení základní a vedlejší spotřeby	[min]	30
Jmenovitý příkon vedlejší spotřeby	[kW]	15
Zatěžovatel vedlejší spotřeby	[%]	45
Provozní příkon vedlejší spotřeby	[kW]	6,8

Účinnost náhonu pomocných zařízení	[%]	96
Účinnost vedlejší spotřeby	[%]	41
Provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kW]	16,4
Energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kWh]	8,2
Příkon základní spotřeby na vstupu vozidla	[kW]	16
Energie základní spotřeby na vstupu vozidla	[kWh]	8
Příkon základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kW]	32,4
Energie základní a vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kWh]	16,2
Gradient základní a vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	1,50
Měrná dopravní základní a vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,143
Měrná přepravní základní a vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,075
Celková spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh]	42,4
Gradient spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	3,93
Měrná dopravní spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,37
Měrná přepravní spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,20
Podíl trakce na celkové spotřebě energie	[%]	62
Podíl základní a vedlejší spotřeby na celkové spotřebě energie	[%]	38
Výhřevnost paliva	[kWh/kg]	12
Měrná hmotnost paliva	[kg/litr]	0,84
Výhřevnost paliva	[kWh/litr]	10,08
Celková spotřeba paliva na vstupu vozidla	[litr]	4,21
Gradient spotřeby paliva na vstupu vozidla	[litr/km]	0,389
Měrná dopravní spotřeba paliva na vstupu vozidla	[litr/tkm]	0,037
Měrná přepravní spotřeba paliva na vstupu vozidla	[litr/oskm]	0,019

Tabulka 6 – Validace hodnot autobusu

Gradient spotřeby paliva DP (skutečná hodnota)	[litr/100 km]	37
Gradient spotřeby paliva DP (skutečná hodnota)	[litr/km]	0,37
Poměr skutečné a vypočtené spotřeby	[%]	95

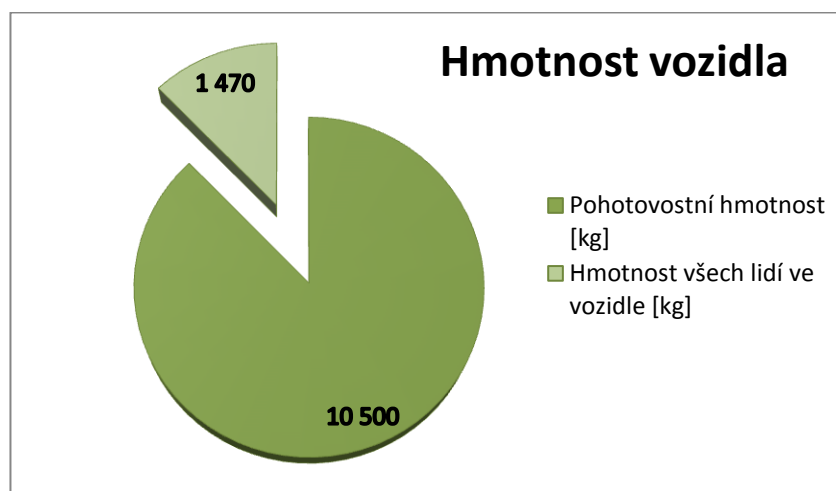
Tabulka 7 - Energetická bilance autobusu

Valení	[kWh]	2,82
Aerodynamika	[kWh]	1,89
Třecí brzdění	[kWh]	6,01
Vedlejší spotřeba	[kWh]	8,18
Základní spotřeba	[kWh]	8,00
Ztráty v pohonu	[kWh]	15,83

2.2. Analýza výpočtu

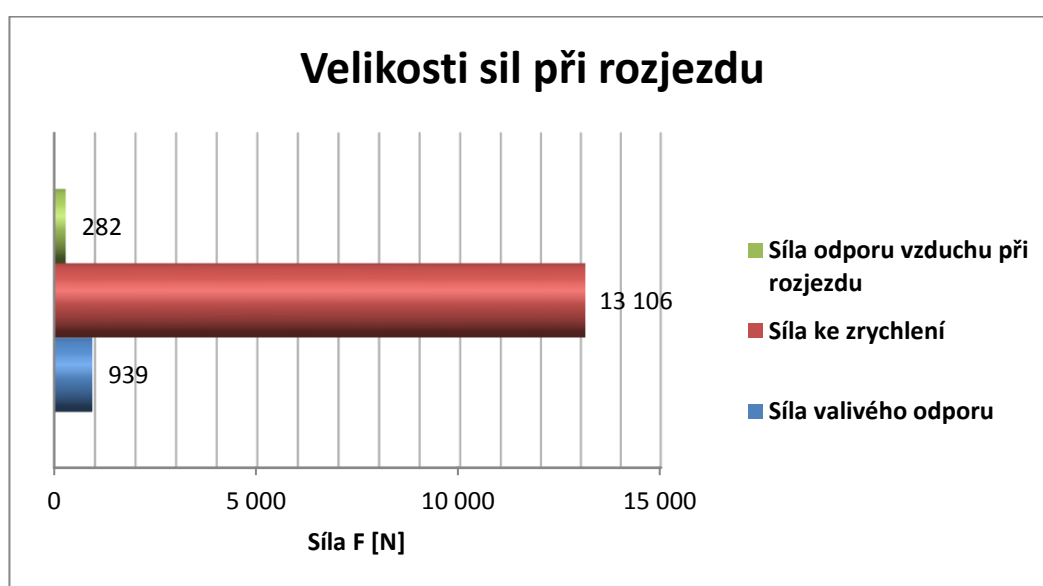
V této části si rozebereme, co vše nám říkají výpočty matematického modelu spotřeby. Hned zpočátku si můžeme ukázat rozdělení celkové hmotnosti vozidla v závislosti na obsazení. Z grafu je patrné, že při průměrném obsazení vozidla se hmotnost vozidla zvýší o více než 12 %, což už se na delší distanci může výrazně projevit. Nicméně stále nutno počítat s tím, že

se jedná o stav průměrného obsazení. To znamená, že například před osmou hodinou ranní, kdy je vytíženost asi největší, se poměr hmotnosti lidí k celkové hmotnosti vozidla může blížit i 30 %.



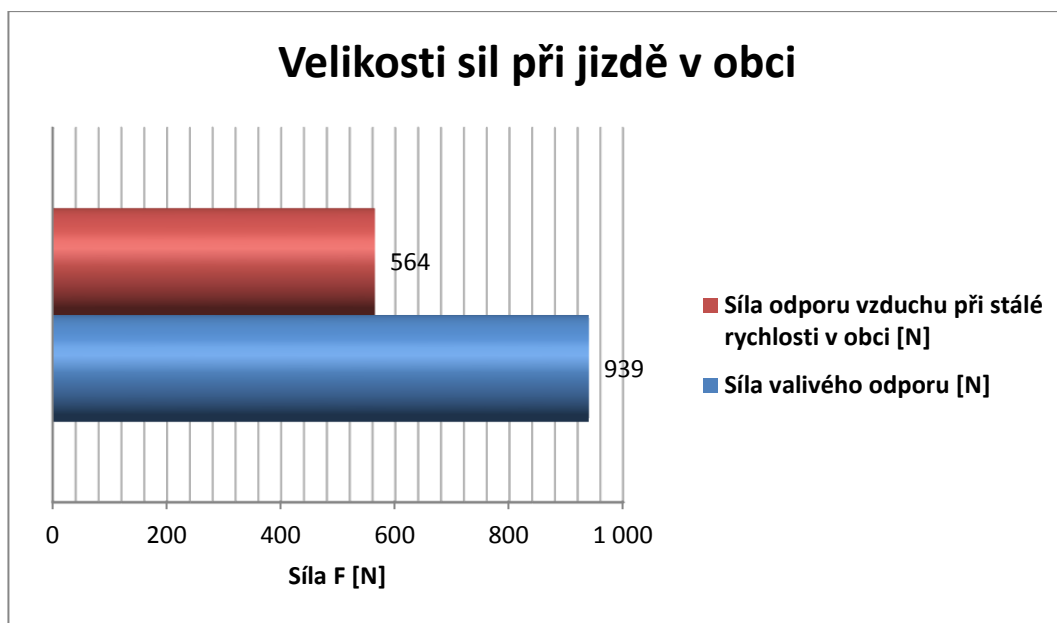
Graf 1 - Celková hmotnost vozidla autobusu

V následujícím grafu se můžeme podívat na velikosti sil při rozjezdech. Nejvýraznější část zde zabírá síla potřebná k jednomu zrychlení z klidu na průměrnou rychlost. Tento parametr je nejvíce ovlivňován dobou, za kterou se vozidlo na průměrnou rychlost rozjede. Tím pádem čím delší doba, tak sice i delší potřebná dráha, ale výsledná síla a později i spotřeba menší. Dalšími parametry jsou síla odporu vzduchu a síla valivého odporu. Síla posledně jmenovaného je v závislosti na rychlosti neměnná a pro nízké rychlosti výrazně přesahuje sílu odporu vzduchu. Blíže o těchto dvou parametrech v následujících grafech.

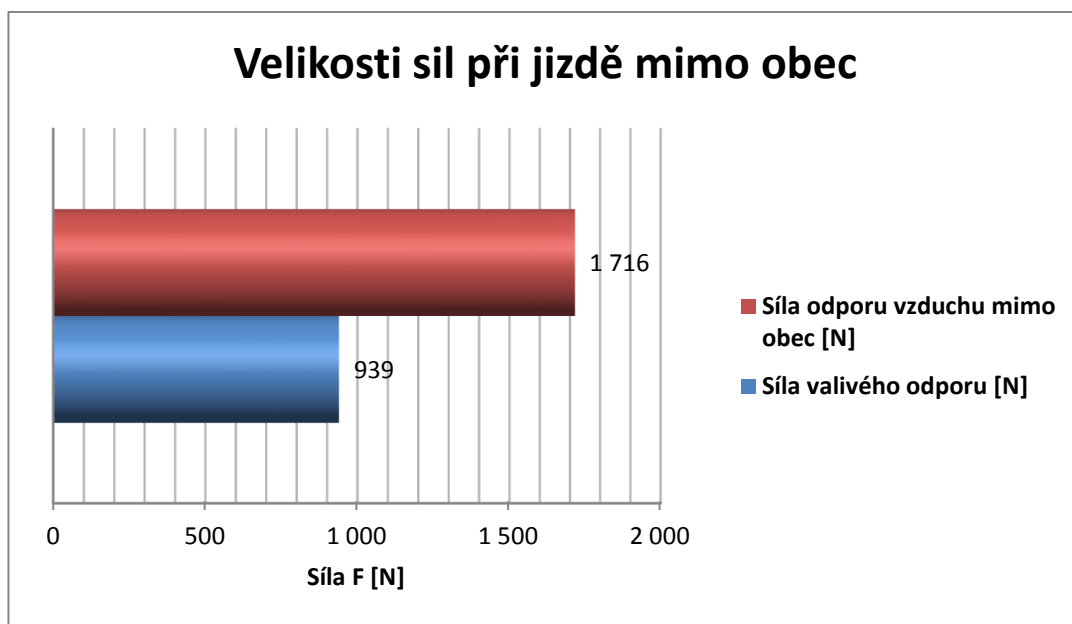


Graf 2 - Síly při rozjezdu autobusu

Následující dva grafy se přímo týkají vztahu mezi silou odporu vzduchu a silou valivého odporu. Jak již bylo řečeno, hodnota valivého odporu je stále stejná, ale velikost odporu vzduchu se mění. Zcela zásadní veličinou pro odpor vzduchu je rychlost. Toto je dáno hlavně tím, že odpor vzduchu závisí na rychlosti kvadraticky, nikoliv lineárně. Z této vlastnosti potom také plyne, že při velmi vysokých rychlostech je možno všechny další odpory zanedbat a řešit jen odpor vzduchu (typické například pro rychlovlaky).

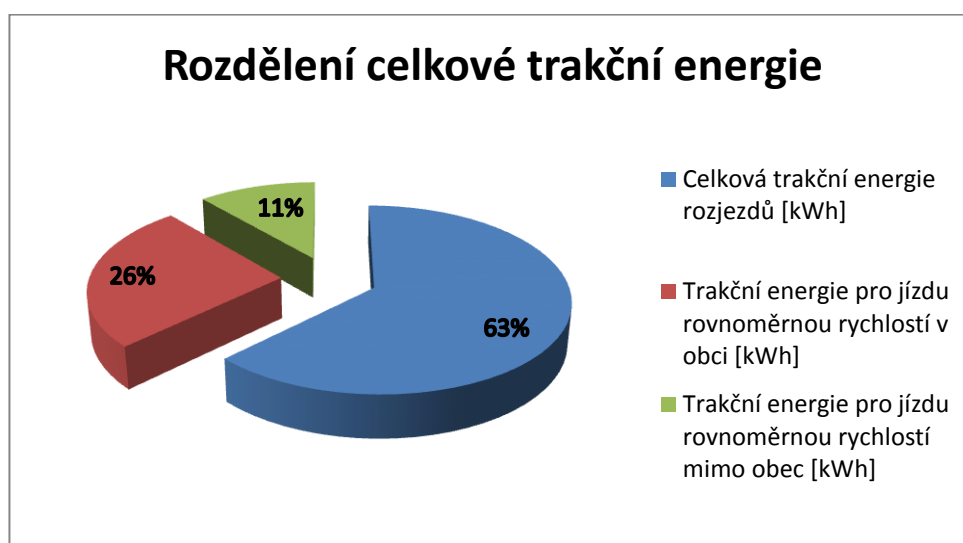


Graf 3 - Velikost sil při jízdě rovnoměrnou rychlostí obcí autobusu



Graf 4 - Velikost sil při jízdě rovnoměrnou rychlostí mimo obec autobusu

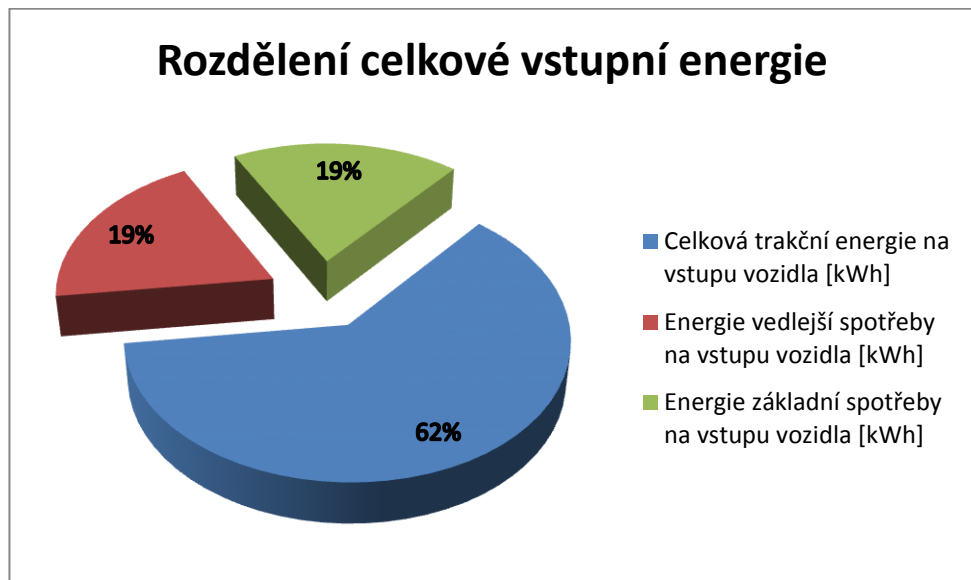
Další z grafů se bude zabývat rozdělením trakční energie. Tento graf jenom potvrzuje předešlé teze o tom, že majoritní podíl na spotřebě bude mít trakční energie rozjezdů. Velikost tohoto parametru je hlavně dána silou potřebnou ke zrychlení a počtu zastávek na lince. Do této části taktéž spadají i neplánovaná zastavení na semaforech, kruhových objezdech či přechodech. Je patrné, že procentuálně rozjezdy zabírají necelé 2/3 celkové trakční energie (63 %). Zbylá více než třetina se rozděluje na jízdu ustálenou rychlostí v obci a mimo obec. Tento poměr záleží samozřejmě na charakteru linky. Na lince číslo 3 lze říci, že poměr zbylé energie je 7:3 (v obci : mimo obec).



Graf 5 - Rozdělení trakční energie autobusu

Následující graf ukazuje rozdělení celkové vstupní energie. Zde můžeme vidět rozdělení na 3 části. Největší část zabírá energie trakční. Zde je nutno zdůraznit, že trakční energie na vstupu vozidla je více než dvakrát tak velká jako potřebná trakční energie v provozu. Tento fakt je dán takzvanou diferenciální účinností pohonu. Laicky řečeno účinností, v našem případě, vznětového motoru. Další část grafu, zabírající 38 % patří základní a vedlejší spotřebě. Parametr základní spotřeby příliš ovlivnit nelze. Jedná se o spotřebu, která probíhá stále, když je motor v chodu. Jedná se tedy hlavně o stav volnoběhu. Tento parametr je závislý na mechanických vlastnostech motoru. Tuto spotřebu lze nepatrně ovlivňovat hlavně z hlediska dlouhého časového horizontu, kdy pravidelnými údržbami motoru lze docílit, co nejmenšího opotřebení, což by mělo za následek růst spotřeby. Nicméně energii vedlejší spotřeby ovlivňovat lze. Do vedlejší spotřeby řadíme pohon vzduchového kompresoru, pohon chladivového kompresoru klimatizace, pohon pomocného alternátoru palubní sítě a příkon topení. Z výčtu těchto částí vedlejší spotřeby je patrné, že celková energie této spotřeby bude nejvíce závislá na klimatických podmínkách. Zvláště velký nárůst vedlejší spotřeby

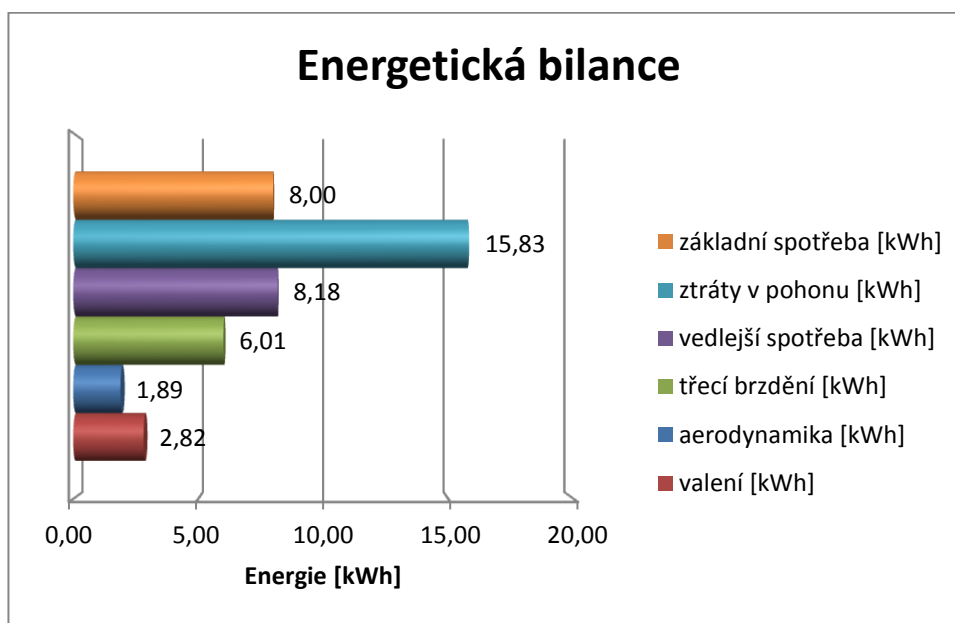
(následně i celkové spotřeby) budeme moci spatřovat v zimních měsících. Zde bude hlavně růst příkon topení. Nicméně nárůst určitě můžeme zaznamenat i v druhém teplotním extrému, který je stále častější a to při velmi vysokých teplotách. Zde naopak se projeví energetický odběr klimatizace.



Graf 6 - Rozdělení celkové vstupní energie autobusu

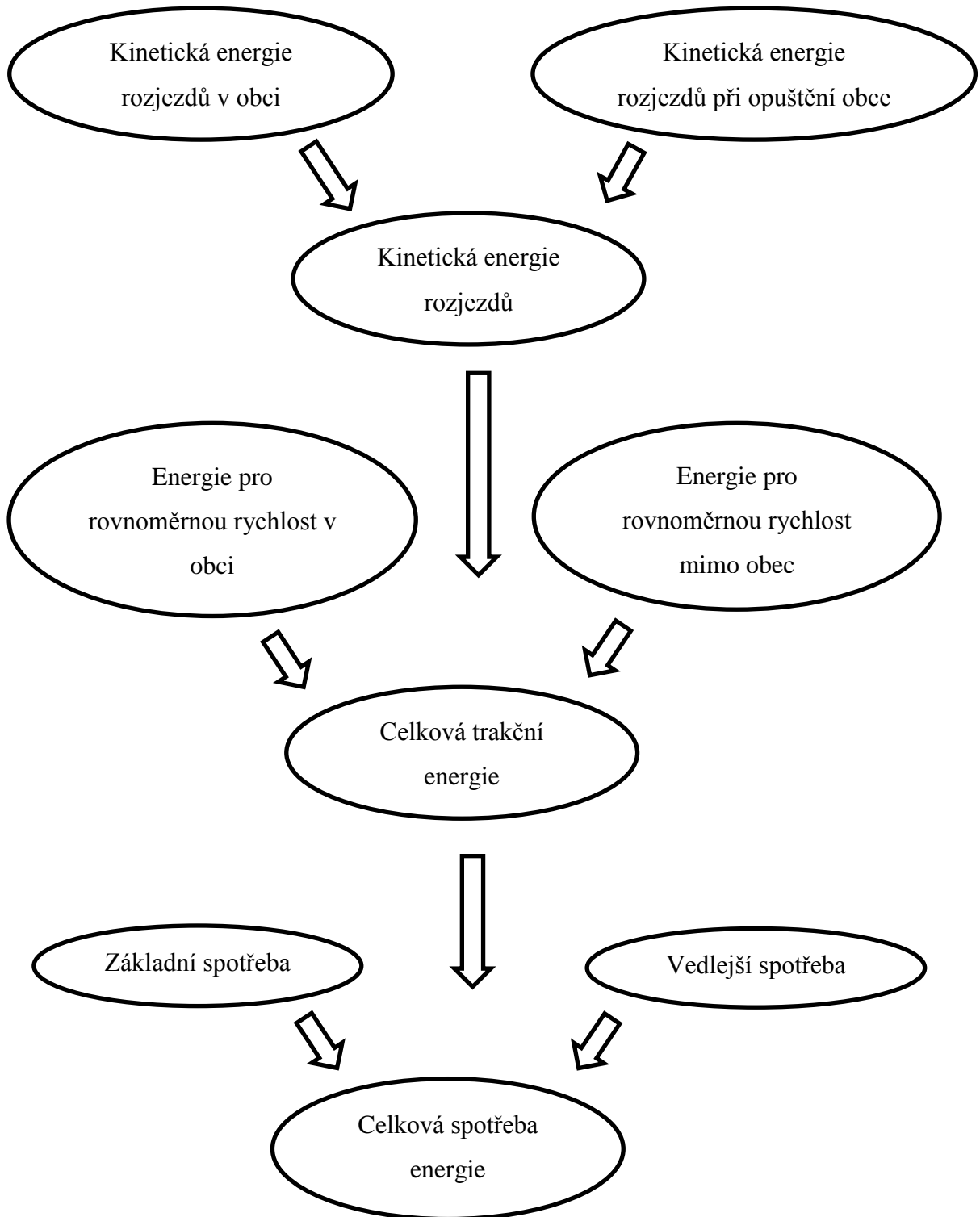
2.3. Energetická bilance

Tato část se zabývá energetickou bilancí autobusu. Energetická bilance nám vlastně ukazuje rozdělení celkové energie mezi jednotlivé části. Z grafu je patrné, že největší část spotřeby energie připadá ztrátám. Viníkem je zde účinnost vznětového motoru, která se pohybuje hluboko pod 50 %. Toto má potom za následek, že ztráty způsobují skoro polovinu celkové spotřeby. S velkým odstupem za ztrátami potom můžeme vidět další části celkové energie. V našem případě podobné energetické hodnoty má základní a vedlejší spotřeba. Za velikost základní spotřeby může hlavně to, že je nepřetržitá. Musíme je zahrnovat po celou dobu chodu motoru. Naopak vedlejší spotřeba je velice proměnná v závislosti na počasí a roční době obecně. Po těchto spotřebách následuje s 6 kWh energie třecího brzdění. Tento parametr v sobě zahrnuje veškeré rozjezdy. Z této hodnoty je patrné, že poměrově oproti ostatním tato energie, tak výrazná není. To, co ji následně umocňuje, jsou ztráty v podobě účinnosti motoru. Nakonec zde máme aerodynamiku a valení. První jmenovaná část zabírá vůbec nejmenší podíl. Může za to nízká rychlost pohybu. Lze předpokládat, že například pro nějaký dálkový spoj bude podíl aerodynamiky vyšší než valení. Dostáváme se tedy k poslední části energetické bilance a to je valení. Energie připadající na valení je závislá na hmotnosti vozidla a dráze, po které se pohybuje. Rychlost, zrychlení na tuto veličinu nemá vliv.



Graf 7 - Energetická bilance autobusu

2.4. Schéma energetických toků



2.5. Validace

Tato bakalářská práce je tvořena pro linky spadající pod Dopravní podnik města Pardubic. Po vypočítání domnělé spotřeby bylo zapotřebí zjistit spotřebu skutečnou. Zde ovšem nastal problém, neboť tento dopravní podnik nesleduje jednotlivé spotřeby na linkách. Jediné o co se lze opřít jsou normy spotřeby nafty pro jednotlivá vozidla. Pro vozidlo Iveco Crossway LE platí normovaná spotřeba cca 32l/100km v letních měsících a až 37l/100km v zimních měsících. Při pátrání po přesnější spotřebě jsem narazil přesná měření spotřeby konkrétních vozidel na lince pro Dopravní podnik města Brna. Výsledek obecně byl ten, že stejně jako u civilních vozidel, je skutečná spotřeba vyšší. Za tímto zvýšením spotřeby může stát například přílišná snaha konstruktérů získat, co nejnižší spotřebu. Problém s nepřesným určením spotřeby se koneckonců týká i osobních vozidel. Skutečná spotřeba je tedy o cca 12 % vyšší než udávají normy pro jednotlivé měsíce. Po zprůměrování norem v jednotlivých měsících mi vyšla normovaná spotřeba cca 33l/100km. Po zvýšení o 12 % jsem dostal spotřebu 37l/100km. Lze říci, že tato spotřeba bude velmi blízko realitě. V zimních měsících bude nepochybně ještě vyšší. Ačkoliv se tato hodnota může zdát vysoká sama o sobě, tak musím zdůraznit, že tento autobus Iveco Crossway LE patří v rámci čistě naftových vozidel k velice úsporným na našem území. Například, když podobné měření probíhalo pro velmi populární City bus Renault Agora vyráběný firmou Karosa, tak výsledný průměr spotřeby byl 50l/100km. Zajímavý je také údaj spotřeby Iveca Crossway LE na regionální lince. Zde spotřeba dosahovala více než 31l/100km. Je nutno zdůraznit ovšem, že se jednalo o regionální linku. Nicméně může nám to také ukázat nárůst spotřeby, za který může časté rozjíždění a obecně změny rychlosti. Taky ovšem je nutno vzít v úvahu fakt, že regionální autobus byl jinak vnitřně uspořádán a jinak vytižen cestujícími.



obr 2 - Iveco Crossway LE [1]

Po mnou provedených výpočtech jsem získal hodnotu cca 38,9l/100km. Dle očekávání je moje zjištěná hodnota vyšší než předpokládaná skutečná. Výsledná odchylka činí nicméně pouhých 5 %, což lze pokládat za úspěch. Za hlavní důvod této odchylky lze označit fakt, že konstruktéři se snaží, co nejvíce snižovat spotřebu. Spadá sem zvyšování účinností různých mechanických prvků a další možnosti úspory energie. Toto nicméně již spadá do ostře střeženého know-how každého výrobce a je velice těžké to podchytit. Nicméně při porovnání s jinými vozidly, jež jsou konstrukčně podobné, ale již starší (kdy se na spotřebu kladl menší důraz), tak výsledná vypočtená hodnota může být totožná. V některých případech dokonce nižší.

3. Výpočtový model spotřeby elektrické energie linkového trolejbusu

3.1. Tabulky s výpočty

Tabulka 8 - Trolejbus MHD

Typ	Škoda 24Tr	
Pohotovostní hmotnost	[kg]	11 500
Střední počet cestujících	[kg]	20
Průměrná hmotnost člověka	[kg]	70
Hmotnost všech lidí ve vozidle	[kg]	1 470
Střední celková hmotnost	[kg]	12 970
Šířka vozidla	[mm]	2 500
Výška vozidla	[mm]	3 500
Čelní plocha vozidla	[m ²]	8,8

Tabulka 9 - Linka trolejbusu MHD

Počet zastávek (včetně točny)		18
Délka linky	[km]	10,8
Střední vzdálenost mezi zastávkami	[m]	568
Doba cesty	[min]	26
Doba před odjezdem	[min]	2
Doba po příjezdu	[min]	2
Doba pohotovosti vozidla	[min]	30
Cestovní rychlost	[km/h]	24,9
Střední doba stání na 1 zastávce	[s]	25
Doba jízdy	[min]	17,5
Technická rychlost	[km/h]	37,0
Průměrná rychlost obcí	[km/h]	43
Průměrná rychlost mimo obec	[km/h]	60
Doba zrychlení na průměrnou rychlost v obci	[s]	13
Doba k zastavení z průměrné rychlosti v obci	[s]	9
Zrychlení ze zastávky	[m.s ⁻²]	0,9
Zpomalení do zastávky	[m.s ⁻²]	-1,3
Dráha zrychlení	[m]	78
Dráha zpomalení	[m]	54
Celková dráha zrychlení	[m]	1 630
Celková dráha zpomalení	[m]	968
Úsek mimo obec	[km]	1,6
Dráha průměrné rychlosti v obci	[km]	6,60
Počet neplánovaných zastavení		3

Tabulka 10 – Obecné

Součinitel odporu C_x		0,8
Měrný jízdní odpor φ		0,008
Hustota vzduchu	[kg/m ⁻³]	1,2

Tabulka 11 – Síly působící na trolejbus

Gravitační zrychlení	[m/s ²]	9,81
Součinitel rotačních hmot		1,1
Síla valivého odporu	[N]	1 018
Síla ke zrychlení	[N]	13 109
Síla odporu vzduchu při rozjezdu	[N]	300
Celková tažná síla při rozjezdu	[N]	14 426
Síla odporu vzduchu při stálé rychlosti v obci	[N]	599
Síla pro jízdu ustálenou rychlosti v obci	[N]	1 617
Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlosti v obci	[kW]	19
Síla odporu vzduchu mimo obec	[N]	1 167
Síla pro jízdu ustálenou rychlosti mimo obec	[N]	2 185
Trakční výkon pro jízdu ustálenou rychlosti mimo obec	[kW]	36

Tabulka 12 - Energie trolejbusu

Kinetická energie 1. rozjezdu	[kWh]	0,28
Trakční energie 1. rozjezdu	[kWh]	0,31
Počet úseků mimo obec		1
Kinetická energie 2. rozjezdu	[kWh]	0,27
Celková trakční energie rozjezdů	[kWh]	6,80
Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí v obci	[kWh]	2,97
Trakční energie pro jízdu rovnoměrnou rychlostí mimo obec	[kWh]	0,97
Celková trakční energie	[kWh]	10,74
Gradient spotřeby trakční energie	[kWh/km]	0,99
Měrná dopravní spotřeba trakční energie	[kWh/tkm]	0,086
Měrná přepravní spotřeba trakční energie	[kWh/oskm]	0,050
Účinnost měniče	[%]	95
Účinnost elektromotoru	[%]	93
Účinnost pohonu kol	[%]	95
Účinnost pohonu	[%]	83,9
Celková odebraná trakční energie na vstupu vozidla	[kWh]	12,8
Kinetická energie	[kWh]	6,2
Podíl rekuperčního brzdění	[%]	90,0
Rekuperovaná energie	[kWh]	4,7
Celková trakční energie na vstupu vozidla	[kWh]	8,1
Gradient spotřeby trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	0,75
Měrná dopravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,065
Měrná přepravní spotřeba trakční energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,038
Doba působení vedlejší spotřeby	[min]	30

Jmenovitý příkon vedlejší spotřeby	[kW]	15
Zatěžovatel vedlejší spotřeby	[%]	45
Provozní příkon vedlejší spotřeby	[kW]	6,8
Účinnost napájení pomocných zařízení	[%]	96
Účinnost vedlejší spotřeby	[%]	89
Provozní příkon vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kW]	8,0
Energie vedlejší spotřeby na vstupu vozidla	[kWh]	4,0
Gradient vedlejší spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	0,37
Měrná dopravní vedlejší spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,032
Měrná přepravní vedlejší spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,019
Celková spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh]	12,1
Gradient spotřeby energie na vstupu vozidla	[kWh/km]	1,12
Měrná dopravní spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/tkm]	0,10
Měrná přepravní spotřeba energie na vstupu vozidla	[kWh/oskm]	0,06
Podíl trakce na celkové spotřebě energie	[%]	67
Podíl vedlejší spotřeby na celkové spotřebě energie	[%]	33
Účinnost pevných trakčních zařízení	[%]	85
Celková spotřeba energie na vstupu nap. stanice	[kWh]	14,3
Gradient spotřeby energie na vstupu nap. stanice	[kWh/km]	1,32
Měrná dopravní spotřeba energie na vstupu nap. stanice	[kWh/tkm]	0,11
Měrná přepravní spotřeba energie na vstupu nap. stanice	[kWh/oskm]	0,07

Tabulka 13 - Validace hodnot trolejbusu

Spotřeba energie DP (skutečná hodnota)	[kWh]	14,9
Gradient spotřeby energie DP (skutečná hodnota)	[kWh/km]	1,380
Poměr skutečné a vypočtené spotřeby	[%]	104

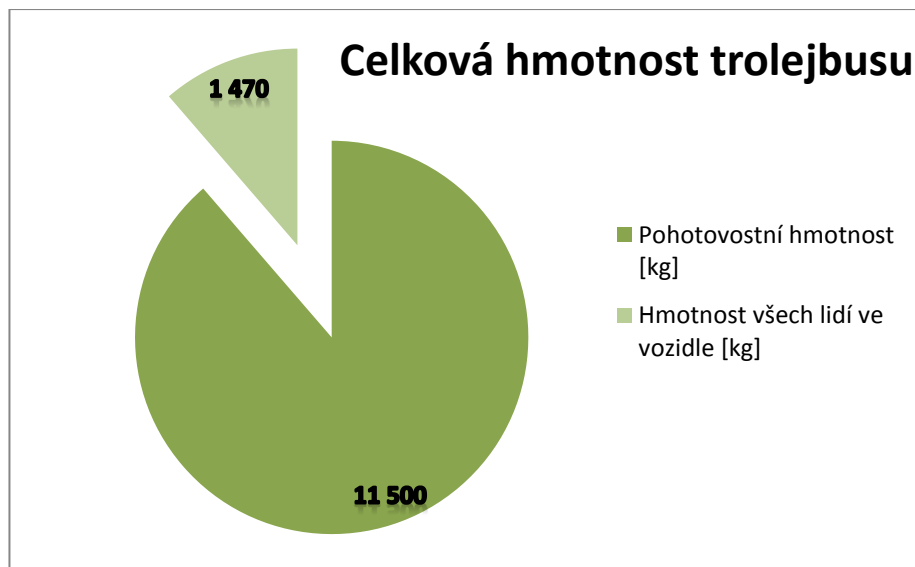
Tabulka 14 - Energetická bilance trolejbusu

Valení	[kWh]	3,05
Aerodynamika	[kWh]	1,75
Třecí brzdění	[kWh]	6,20
Vedlejší spotřeba	[kWh]	4,02
Ztráty v pohonu	[kWh]	2,06
Ztráty v pevných trakčních zařízeních	[kWh]	2,14

3.2. Analýza výpočtů

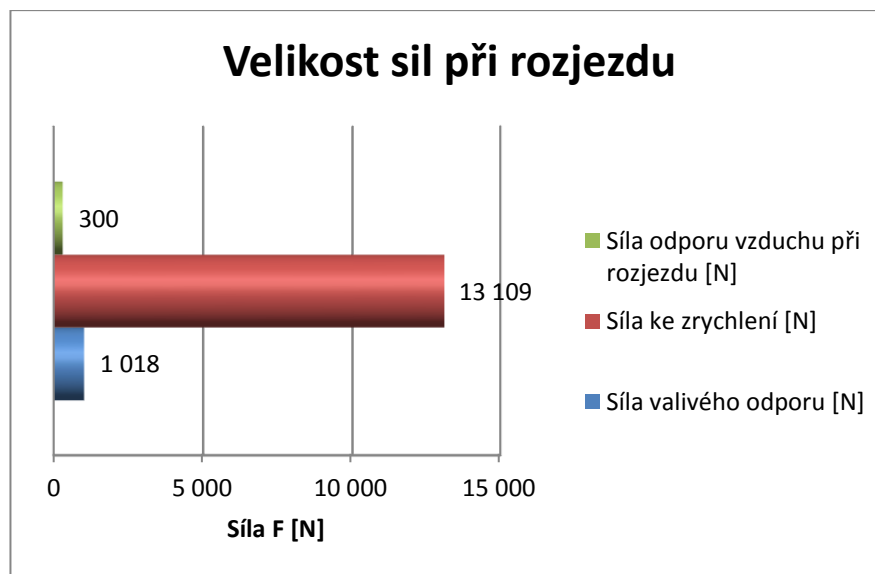
V této části si ukážeme výsledky výpočtů spotřeby elektrické energie linkového trolejbusu. Občas zde také budeme porovnávat grafy týkající se trolejbusu s jeho autobusovým protějškem. Pro úplnost, tyto grafy lze najít v předchozí kapitole.

První graf této části se zabývá rozdělení celkové hmotnosti vozidla. Z grafu je patrné, že více než 11 % celkové hmotnosti zabírá celková hmotnost lidí ve vozidle. To je asi o 1 % více než v případě autobusu. Obecně lze vidět, že hmotnost trolejbusu je o tunu vyšší než v případě autobusu (porovnáváme nyní stroje podobné velikosti). Rozdíl můžeme hledat například v elektrické výzbroji trolejbusu. Vyšší hmotnost se poté výrazně projevuje v silových působeních, zvláště ve valivém odporu a rozjezdech. S vyšší silou je poté požadováno větší množství energie.



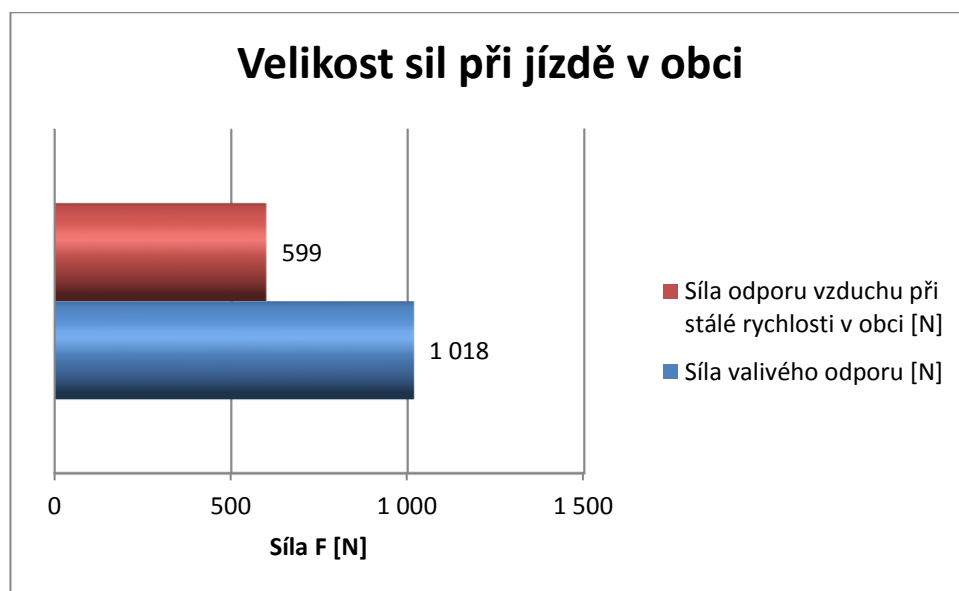
Graf 8 - Rozdělení hmotnosti trolejbusu

Na dalším grafu si ukážeme velikosti působících sil při rozjezdu trolejbusu. Majoritní podíl zde má samozřejmě síla nutná ke zrychlení. Její hodnota přesahuje 13 kN. Zajímavé je opět srovnání s autobusem, kde síla nutná ke zrychlení byla prakticky totožná. Hlavním důvodem je, že ačkoliv rozdíl ve hmotnosti činí tunu, tak díky rozdílné době zrychlení, je celková síla skoro totožná. Při rozjezdech nelze opomínat odpory vzduchu a valivý odpor. Valivý odpor bude za každého pohybového stavu stejný a odpor vzduchu bude kvadraticky s rychlostí narůstat. Proto v případě rozjezdu je valivý odpor větší než odpor vzduchu.

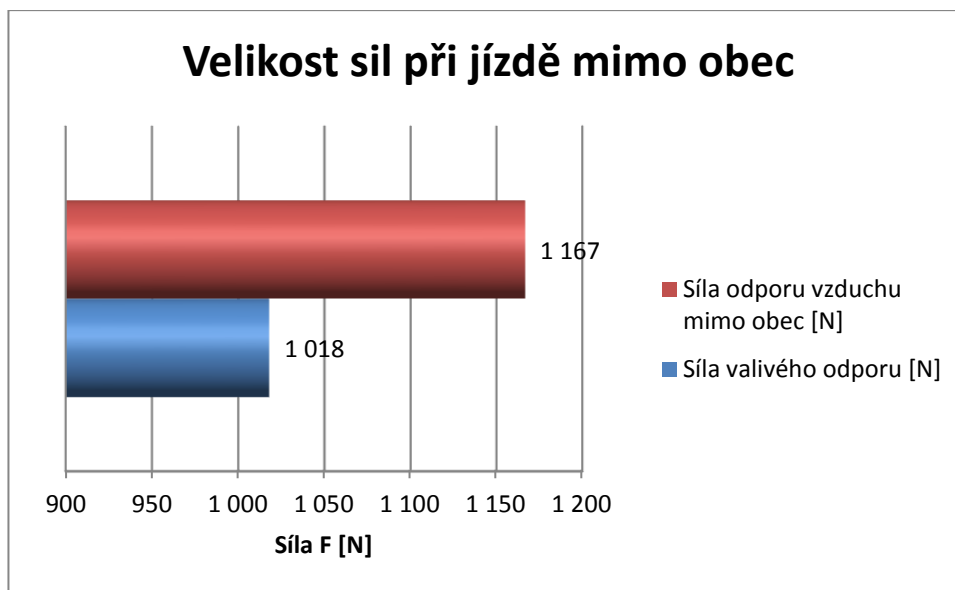


Graf 9 - Velikost sil při rozjezdu trolejbusu

Na dalších dvou grafech si ukážeme vztah mezi jízdními odpory při konstantní rychlosti v obci a mimo obec. Síla valivého odporu je stále stejná. Na rozdíl od rozjezdu již roste síla odporu vzduchu. Při jízdě v obci již odpor vzduchu dosahuje bezmála 60 % odporu valivého a v případě jízdy mimo obec je již odpor vzduchu o více než 100 N větší. Jedná se o podobný poměr jako v případě autobusu, nicméně ještě je nutno brát v potaz, že odpor vzduchu mimo obec bude obecně nižší, protože trolejbus nevyvine tak vysokou rychlost jako autobus. Rozdíl v rychlosti může činit například až 20 km/h.

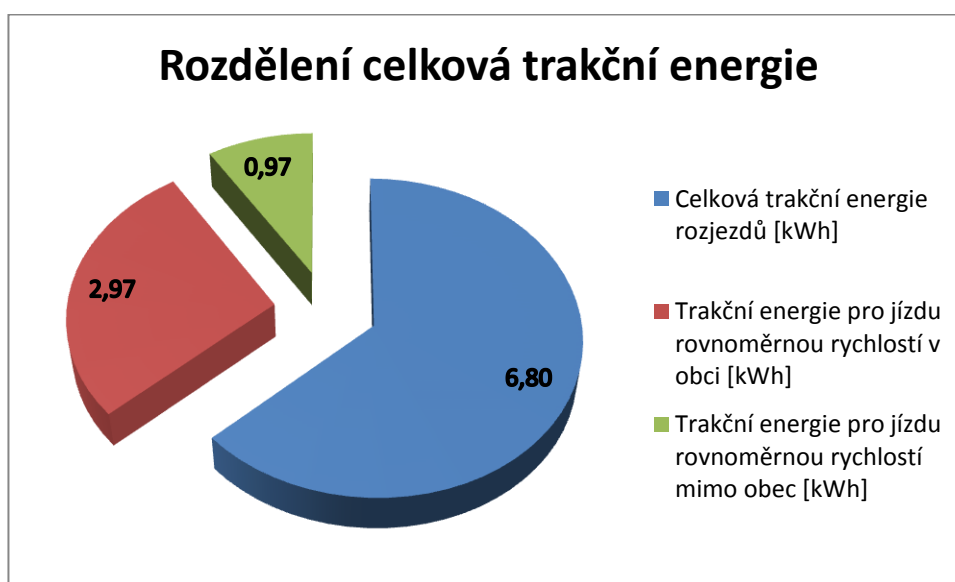


Graf 10 - Velikost sil při jízdě v obci působící na trolejbus



Graf 11 - Velikost sil působících na trolejbus při jízdě mimo obec

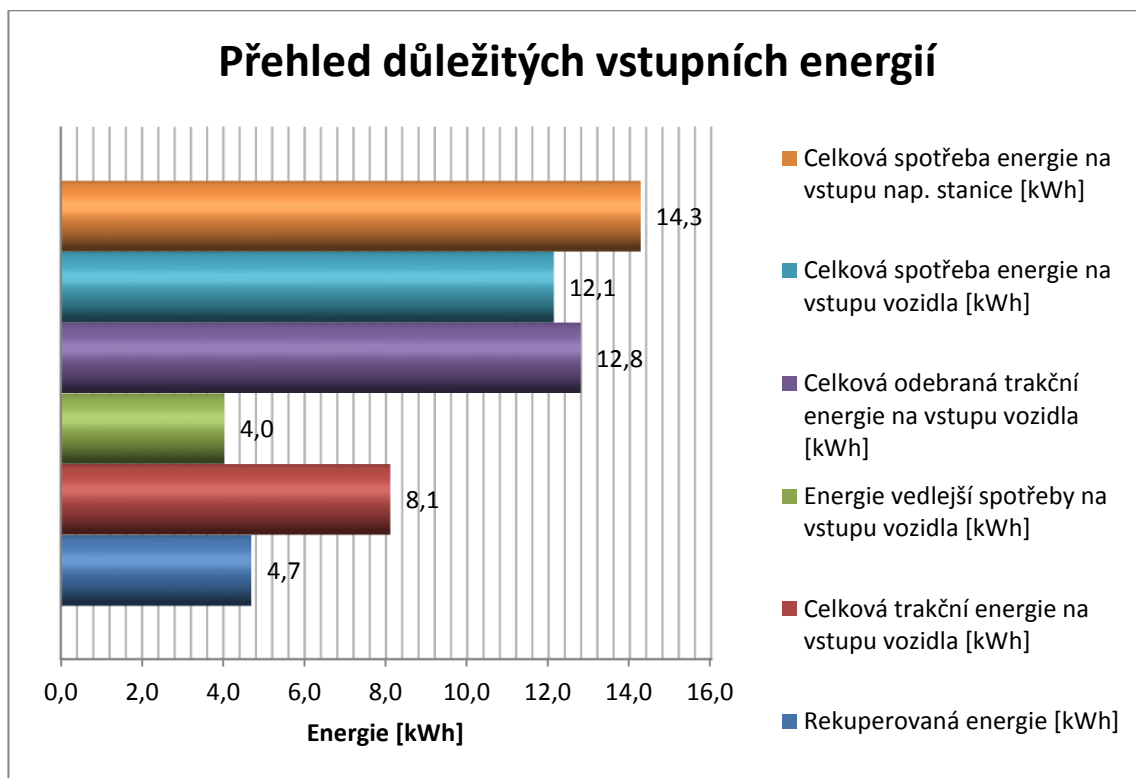
Další graf nám ukazuje rozdělení celkové trakční energie. Z grafu je patrné, že největší podíl trakční energie spadá do kategorie rozjezdů. Jedná se o celé $\frac{2}{3}$ celkové trakční energie. Zbylá část se rozdělí mezi energie pro rovnoměrné rychlosti v obci a mimo obec. Energie nutná pro rovnoměrnou jízdu v obci se bude blížit 28 % celkové trakční energie a zbylých 9 % zaujímá energie nutná pro jízdu mimo obec.



Graf 12 - Rozdělení celkové trakční energie trolejbusu

V následujícím grafu si můžeme ukázat přehled zajímavých vstupních energií. Nejmenší hodnotu energie zde zastává energie vedlejší spotřeby. Ta je velice závislá na klimatických podmínkách. Spadá sem například klimatizace, topení atd. Velice důležitá část v tomto grafu

je rekuperovaná energie. Jedná se o úsporu nepoužité energie, která se uloží a následně využije. V tomto grafu koneckonců si lze hezky ukázat vztahy mezi jednotlivými energiemi. Když od celkové odebrané trakční energie na vstupu vozidla odečteme úsporu vzniklou rekuperací, vyjde nám nová nižší celková trakční energie na vstupu vozidla. Dále k poslední jmenované energii přičteme vedlejší spotřebu a dostaneme celkovou spotřebu energie na vstupu vozidla. Nakonec je taktéž nutné brát v potaz účinnost pevných trakčních zařízení, proto si ukážeme i celkovou spotřebu energie na vstupu napájecí stanice.

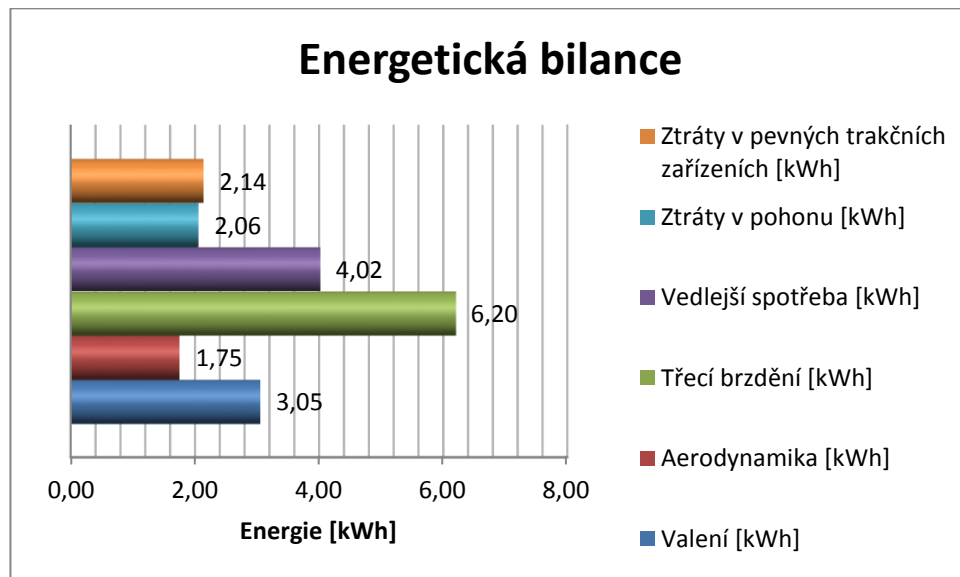


Graf 13 - Přehled velikostí vstupních energií trolejbusu

3.3. Energetická bilance trolejbusu

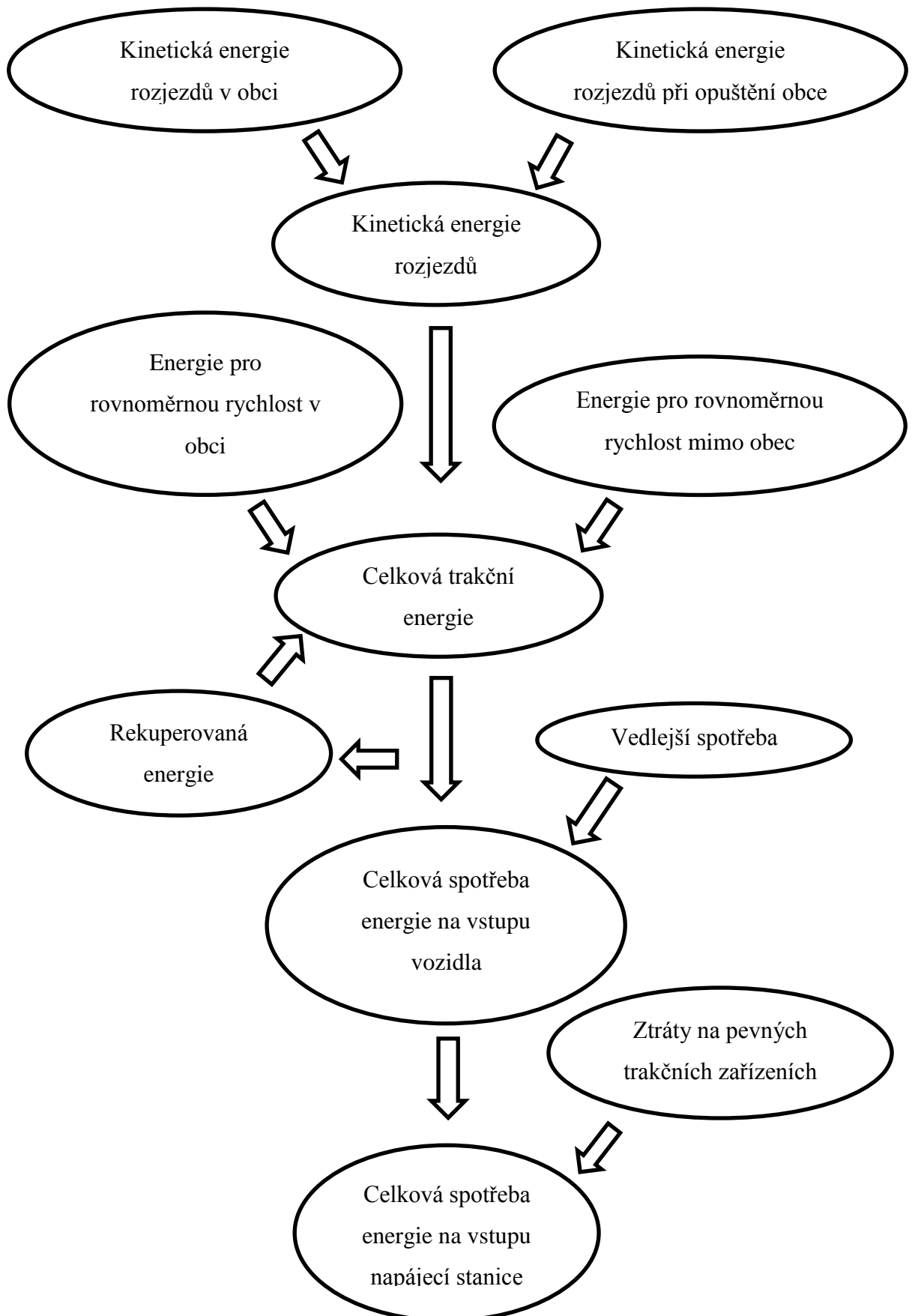
V této části si ukážeme poslední graf, který nám ukazuje energetickou bilanci trolejbusu. Na rozdíl od autobusu můžeme vidět, že největší hodnota energie nepatří ztrátám, nýbrž třetímu brzdění, které se projevuje při rozjezdech. Tato energie a energie vedlejší spotřeby jsou nejvýraznější, ale jak již bylo řečeno, energie vedlejší spotřeby se může velmi měnit, například i v závislosti na době působení. Nezanedbatelnou částí energetické bilance je taktéž energie valení. To je nejvíce závislé na hmotnosti, proto je výsledná hodnota vyšší než v případě lehčího autobusu. Dále si je nutné také ukázat ztráty. Lze si je rozdělit na ztráty v pohonu a ztráty na pevných trakčních zařízeních. Je patrné, že tyto ztráty mají velice

podobnou velikost, nicméně mohou se i měnit, například v závislosti na klimatických podmínkách se budou měnit ztráty na pevných trakčních zařízeních. Ale i po sečtení obou ztrát se nebudeme blížit energii třecího brzdění a už vůbec velikosti ztrát v případě autobusu. Nakonec zde máme ještě energii nutnou pro aerodynamiku. Tato hodnota je nyní zhruba o desetinu kWh nižší (než pro autobus), neboť ačkoliv čelní průřez vozidel je podobný, tak zvláště mimo obec se projevuje nižší rychlost trolejbusu. Jinak je tato hodnota v celku konstantní. Změny teploty vzduchu a tedy jeho hustoty mají zanedbatelný vliv.



Graf 14 - Energetická bilance trolejbusu

3.4. Schéma energetických toků trolejbusu



3.5. Validace spotřeby trolejbusu

V této části provedeme analýzu vypočtené hodnoty celkové spotřeby trolejbusu s hodnotou skutečnou. Určení skutečné hodnoty nyní již nebyl takový problém, neboť řidiči trolejbusů zapisují spotřebu elektrické energie do jízdního výkazu. Výsledná spotřeba na lince číslo 3, dle jízdního výkazu je 14,9 kWh. Po přepočtu na kilometr se jedná o 1,38 kWh/km.

Pro tento účel vytvořený matematický model vypočítat spotřebu trolejbusu na 14,3 kWh, což odpovídá průměrné spotřebě 1,32 kWh/km. Porovnáme-li vypočítanou a reálnou hodnotu zjistíme, že reálná spotřeba je o 4 % vyšší než vypočítaná. Tato odchylka je velice příznivá, neboť je nutno brát v potaz, že ačkoliv byla snaha se co nejlépe přiblížit výpočtem realitě, tak mnoho vstupních dat bylo pouze odhadováno a například pohyb vozidla v mnoha případech idealizován. V idealizaci pohybu bych taktéž hledal ona 4 % rozdílu, neboť trolejbus jezdí centrem, kde nelze držet ustálenou rychlost. Zajisté zde bude mnoho zpomalení, například na poloviční rychlost než je průměrná. Tyto zpomalení lze jen velice těžko podchytit, neboť se jedná o zpomalení na různou rychlost. Počet těchto zpomalení je také velice proměnný v závislosti na čase a dnu v měsíci. Je tedy nutné tyto zpomalení zahrnout do průměrné rychlosti v obci, tak abychom se co nejlépe přiblížili realitě.



obr 3- Trolejbus 24Tr [1]

Závěr

Bakalářská práce se zabývala energetickou náročností MHD. Výpočty probíhaly na území Dopravního podniku města Pardubic. Z tohoto důvodu byla spotřeba počítána pro autobus a trolejbus. Jako vzorový autobus byl zvolen nově zakoupený typ Iveco Crossway LE. V případě trolejbusu byl vybrán typ Škoda 24Tr. Řešení výpočtu spotřeby probíhalo na konkrétní lince číslo 3. Samotný matematický model výpočtu spotřeby lze však upravit, jak pro jiné linky, tak pro jiné typy vozidel. Tyto vozidla byly záměrně zvoleny tak, aby byly konstrukčně co nejvíc podobná.

Díličí analýzy výpočtu matematického modelu ukázala mnoho zajímavostí. Například, jak výrazný podíl na spotřebě má obsazenost vozidla. Dále nám grafy ukázaly velikosti jednotlivých sil při pohybu. Zde byl velice zajímavý vztah mezi silou valivého odporu a aerodynamikou, v závislosti na rychlosti. Z hlediska samotného pohybu vozidla jsme si ukázali i graf rozdělení trakční energie, kde byl vidět výrazný podíl spotřeby energie spotřebované při rozjezdech. Následně ještě ukázka rozdělení energie vstupující do vozidla. Zde bylo vidět (v případě autobusu), jak výrazný podíl má základní a vedlejší spotřeba. Naopak v případě trolejbusu bylo zajímavé pozorovat vliv rekuperace na celkovou trakční energii. Rekuperací bylo získáno 4,7 kWh, což vůči celkové spotřebě je necelá třetina.

V případě spotřeby autobusu, byla vypočítána spotřeba 38,9 l/100 km, což se liší od skutečných 37 l/100 km zhruba o 5 %. V případě naší linky to znamená, že na jednu jízdu (rozuměj pouze na konečnou, nikoliv i zpátky) na lince číslo 3 se spotřebuje (dle výpočtů) 4,21 l nafty. Pro případ trolejbusu byla vypočítaná spotřeba 14,3 kWh. Skutečná spotřeba je 14,9 kWh. Rozdíl činí 4 %. Pro lepší představu hodnot, spotřeba autobusu činila 42,4 kWh. Energetická náročnost trolejbusu je tedy prakticky třetinová oproti energetické náročnosti autobusu.

Seznam obrázků:

obr 1 - Mapa linky [5].....	10
obr 2 - Iveco Crossway LE [1].....	44
obr 3- Trolejbus 24Tr [1]	55

Seznam grafů:

Graf 1 - Celková hmotnost vozidla.....	38
Graf 2 - Síly při rozjezdu	38
Graf 3 - Velikost sil rovnoměrnou rychlostí v obci	39
Graf 4 - Velikost sil rovnoměrnou rychlostí mimo obec	39
Graf 5 - Rozdělení trakční energie.....	40
Graf 6 - Rozdělení celkové vstupní energie.....	41
Graf 7 - Energetická bilance	42
Graf 8 - Rozdělení hmotnosti trolejbusu.....	49
Graf 9 - Velikost sil při rozjezdu trolejbusu	50
Graf 10 - Velikost sil při jízdě v obci působící na trolejbus	50
Graf 11 - Velikost sil působících na trolejbus při jízdě mimo obec	51
Graf 12 - Rozdělení celkové trakční energie trolejbusu	51
Graf 13 - Přehled velikostí vstupních energií trolejbusu	52
Graf 14 - Energetická bilance trolejbusu	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Autobus MHD	35
Tabulka 2 - Linka.....	35
Tabulka 3 - Obecné vlastnosti	36
Tabulka 4 – Síly působící na autobus	36
Tabulka 5 – Energie autobusu	36
Tabulka 6 – Validace hodnot autobusu.....	37
Tabulka 7 - Energetická bilance autobusu	37
Tabulka 8 - Trolejbus MHD	46
Tabulka 9 - Linka trolejbusu MHD	46
Tabulka 10 – Obecné	47
Tabulka 11 – Síly působící na trolejbus.....	47
Tabulka 12 - Energie trolejbusu.....	47
Tabulka 13 - Validace hodnot trolejbusu.....	48
Tabulka 14 - Energetická bilance trolejbusu	48

Zdroje

- [1] Vozový park. *Dpmp* [online]. Pardubice: Dopravní podnik města Pardubic a.s., 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.dpmp.cz/vozovy-park/>
- [2] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj z fyziky*. Druhé. Brno, Mlýnská 44: DIDAKTIS spol. s r. o., 2006. ISBN 80-7358-058-6.
- [3] *Dopravní podnik města Jihlavy* [online]. Jihlava, 2006 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: www.dpmj.cz
- [4] *CIVITAS Ústí nad Labem: Public Transport Route Optimisation Study* [online]. Ústí nad Labem, 2010 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://www.usti-nad-labem.cz/files/civitas/11-2-4_public_transport_route_optimisation_study.pdf
- [5] *Mapy* [online]. Praha: Seznam.cz a.s., 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: www.mapy.cz