

## ANALÝZA PROVOZU MĚSTSKÝCH AUTOBUSŮ

L. Papírník

Došlo: 27. května 2009

### Abstract

PAPÍRNÍK, L.: *Analysis of city buses operation*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009, LVII, No. 5, pp. 235–242

This paper deals with analysis of city buses operation. This analysis is focused on the energy balance of propulsion system of these buses. The energy balance gives an overview about necessary amount of energy for city buses in pure city operation. The operation of city buses is divided for this analysis into three basic modes: stop state, drive and deceleration. The fleet of the same 19 city buses was chosen for collection of all operation data. These city buses are located in one city. The buses were changing all bus routes and were driven by all bus drivers. These conditions are necessary for elimination of bus route topology and bus driver behaviour. The required operation data were saved into engines and transmissions control units. The saved data were uploaded from control units for data processing. The aim of the analysis is determination of the energy for each drive mode. The energy for individual mode gives an overview about possible energy savings when hybrid drive system is used for these buses. The energy balance is groundwork for correct design of hybrid drive system and for hybrid drive system control.

city bus, hybrid drive system, energy, analysis, operation data, saving, design

Zhoršující se dopravní situace ve městech si v posledních letech vyžádala řadu změn při řešení osobní hromadné dopravy. Jedná se zejména o obnovování vozového parku, ať už jde o tramvaje, trolejbusy a autobusy nebo rozšiřování linek městské hromadné dopravy. V tomto článku je pozornost věnována pouze problematice městských autobusů. Na městské autobusy je kladen požadavek na nízkopodlažní konstrukci, která umožňuje snadnou a rychlou výměnu osob při nastupování a vystupování. Největší požadavky na městské autobusy se však týkají jejich pohonu. Stále více se klade důraz na ekologii jejich provozu a hluk. Proto se u městských autobusů můžeme setkat s různými alternativními palivy jako zemní plyn (NG), ropný plyn (LPG), ale i vodík (H). Nejběžnějším palivem však zatím zůstává motorová nafta.

Samotné použití alternativních paliv neřeší požadavky na nižší emise výfukových plynů a nižší spotřebu paliva. Snížení spotřeby paliva a tím i celkových emisí výfukových plynů umožňuje až nasazení městských autobusů s hybridním pohonem. První prototypy hybridních autobusů od různých výrobců jsou již testovány v reálném provozu a do-

sahovaná úspora paliva dosahuje 15 % až 20 % oproti autobusům s klasickým pohonem. Inzerovaná úspora paliva se však pohybuje od 25 % do 35 %. Analýzou provozu klasických městských autobusů je možné zjistit skutečné energetické poměry a následně je aplikovat na návrh hybridních pohonů pro městské autobusy. Tím lze předběžně určit hranici možných úspor paliva, které lze reálně dosáhnout v městském provozu.

### ANALÝZA PROVOZU KLASICKÝCH MĚSTSKÝCH AUTOBUSŮ

Pro pochopení problematiky hybridních městských autobusů je nutné nejdříve poznat provoz klasických městských autobusů. Klasický autobus je pro pohon vybaven pouze jedním zdrojem energie. Nejčastěji to bývá spalovací motor. Klasický autobus neumožňuje využití kinetické a potenciální energie. Hybridní autobus má dva nebo více zdrojů energie sloužících k jeho pohonu. Hybridní pohon umožňuje částečnou rekuperaci kinetické a potenciální energie vozidla k následnému použití ve vozidle.

Pro analýzu provozu byly zvoleny městské autobusy Tedom C 12 G s motorem TG 210 AV TA 04 na stlačený zemní plyn o výkonu 210kW/2000 min<sup>-1</sup>, s točivým momentem 1200Nm/1200–1500 min<sup>-1</sup> a s automatickou převodovkou Voith DIWA.5 v provedení D864.5. Tyto autobusy jsou provozovány v městě Košice. Celkem se jedná o devatenáct shodných autobusů. Požadovaná data pro analýzu provozu jsou získána z uložených statistik řídicích jednotek motoru a převodovky. Pro analýzu dat byl vytvořen fiktivní autobus, který kumuluje data všech devatenácti autobusů.

Provoz motoru lze rozdělit do tří základních režimů: volnoběh, jízda a decelerace. Při volnoběhu je vozidlo v klidu a v převodovce je zařazený neutrál. Při jízdě se kola vozidla otáčejí, v převodovce je zařazený určitý rychlostní stupeň a motor spotřebovává palivo. V deceleraci se kola vozidla otáčejí, v převodovce je zařazený určitý rychlostní stupeň, ale dávka paliva je zastavena, protože je motor unášen kinetickou energií vozidla. Výsledné rozdělení režimů znázorňuje tabulka I a graf 1.

Celkový provoz ve volnoběhu se skládá z provozu ve volnoběhu 0 a volnoběhu 1, viz tabulka II. Volnoběh 0 je základní nezatížený volnoběh a volnoběh 1 je

zatížený volnoběh při připojeném měniči točivého momentu.

Celkovou spotřebu paliva v jednotlivých volnoběžích lze určit podle rovnic 1 až 3. Spotřeby paliva v jednotlivých volnoběžích byly zjištěny ve zkušebně motorů ve firmě Tedom v divizi Motory. Spotřeba plynu ve volnoběhu 0 je 0,7kg/h a spotřeba ve volnoběhu 1 je 0,81kg/h. Výhřevnost zemního plynu je 49MJ/kg.

$$E_{idle} = E_{idle0} + E_{idle1} \quad [J] \quad (1)$$

$$E_{idle0} = M_{p_{idle0}} \cdot H_u \cdot t_{idle0} \quad [J] \quad (2)$$

$$E_{idle1} = M_{p_{idle1}} \cdot H_u \cdot t_{idle1} \quad [J], \quad (3)$$

kde:

$E_{idle}$  .... celková energie volnoběhu [J]

$E_{idle0}$  .... energie ve volnoběhu 0 [J]

$E_{idle1}$  .... energie ve volnoběhu 1 [J]

$H_u$  ..... výhřevnost zemního plynu [MJ.kg<sup>-1</sup>]

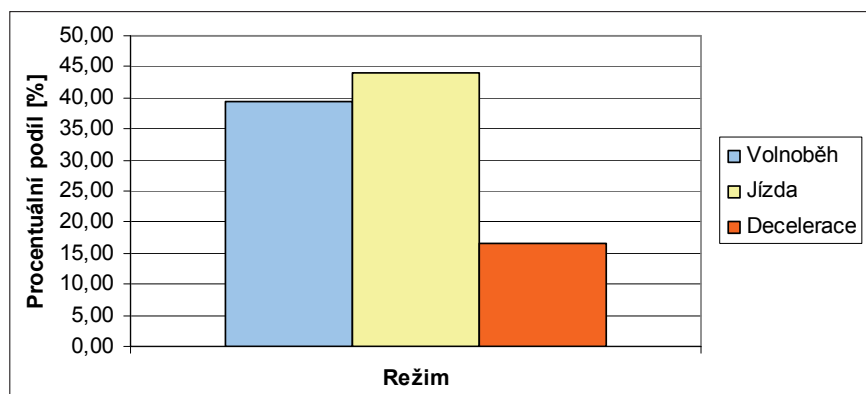
$t_{idle0}$  .... doba provozu ve volnoběhu 0 [h]

$t_{idle1}$  .... doba provozu ve volnoběhu 1 [h].

Výsledky energetické bilance volnoběhů jsou uvedeny v tabulce III. Celková energie volnoběhu

I: Základní režimy motoru

| [parametr]  | [h]      | [%]    |
|---|----------|--------|
| <b>Celková doba běhu motoru <math>t_{total}</math></b>              | 31 822,4 | 100,00 |
| <b>Doba provozu ve volnoběžích: <math>t_{idle}</math></b>           | 12 539,8 | 39,41  |
| <b>Doba provozu při jízdě: <math>t_{run}</math></b>                 | 13 965,6 | 43,89  |
| <b>Doba provozu v deceleračním režimu: <math>t_{dec eng}</math></b> | 5 317,0  | 16,71  |



1: Grafické znázornění základních režimů

II: Rozdělení volnoběhů

| [parametr]  | [h]     | [%]    |
|---|---------|--------|
| <b>Doba provozu ve volnoběžích: <math>t_{idle}</math></b> | 12539,8 | 100,00 |
| <b>Volnoběh 0: <math>t_{idle0}</math></b>                 | 9194,9  | 73,33  |
| <b>Volnoběh 1: <math>t_{idle1}</math></b>                 | 3344,9  | 26,67  |

III: Energetická bilance volnoběhu

| [parametr]  | [J]      |
|---|----------|
| <b>Energie ve volnoběhu 0: <math>E_{idle0}</math></b>   | 3,15E+11 |
| <b>Energie ve volnoběhu 1: <math>E_{idle1}</math></b>   | 1,32E+11 |
| <b>Celková energie volnoběhu: <math>E_{idle}</math></b> | 4,47E+11 |

udává energii dodanou v palivu pro provoz motoru ve volnoběhu. Tato energie může být částečně ušetřena při vypínání motoru (start-stop systém).

Režim jízdy autobusu je energeticky nejnáročnější. Běh motoru při jízdě autobusu lze popsat spektrem točivého momentu motoru a spektrem otáček motoru. Z těchto spekter jsou určeny průměrné hodnoty otáček a točivého momentu motoru. Tyto hodnoty lze použít pro výpočet průměrného výkonu a energie potřebné pro jízdu. Údaje potřebné pro výpočet jsou uvedeny v tabulkách IV a V. Výpočet průměrných hodnot otáček a točivého momentu popisují rovnice 4 a 5.

$$n_{av eng} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{av eng i} \cdot \frac{p_i}{100}}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100}} [\text{min}^{-1}] \quad (4)$$

$$M_{tav i} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{tav i} \cdot \frac{p_i}{100}}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100}} [\text{Nm}], \quad (5)$$

kde:

$n_{av eng}$  ... průměrné otáčky spalovacího motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]

$M_{tav}$  ... průměrný točivý moment spalovacího motoru [Nm]

$p_i$  ..... procentuální podíl daného intervalu [%].

Spektrum otáček udává, jak je motor provozován. Průměrné otáčky jsou v našem případě okolo  $1200 \text{ min}^{-1}$ . Na otáčky motoru mají vliv intervaly řazení automatické převodovky a převod nápravy. Vliv řidiče není v tomto případě významný, protože automatická převodovka udržuje vhodným řazením motor v optimálních otáčkách.

Spektrum točivého momentu motoru dává informace o zatížení motoru. Z tabulky č. V je patrné, že

IV: Spektrum otáček motoru

| Otáčky motoru $n_{eng i}$<br>[ $\text{min}^{-1}$ ]         | Čas provozu $t_{run i}$<br>[h] | Procentuální podíl $p_i$<br>[%] | Střední hodnota<br>$n_{av eng i}$<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] | Váhové podíly<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] |
|--|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| 0–400  | 0,765                          | 0,0055                          | 200  | 0,0                                    |
| 401–650  | 186,587                        | 1,3360                          | 525  | 7,0                                    |
| 651–800  | 1 338,791                      | 9,5863                          | 725  | 69,5                                   |
| 801–1000   | 1 788,468                      | 12,8062                         | 900  | 115,3                                  |
| 1001–1200  | 3 463,067                      | 24,7971                         | 1 100  | 272,8                                  |
| 1201–1400  | 4 579,885                      | 32,7940                         | 1 300  | 426,3                                  |
| 1401–1600  | 1 820,417                      | 13,0350                         | 1 500  | 195,5                                  |
| 1601–1800  | 534,148                        | 3,8247                          | 1 700  | 65,0                                   |
| 1801–2000  | 177,092                        | 1,2681                          | 1 900  | 24,1                                   |
| 2001–2200  | 75,978                         | 0,5440                          | 2 100  | 11,4                                   |
| 2201–2400  | 0,386                          | 0,0028                          | 2 300  | 0,1                                    |
| 2401–2600  | 0,035                          | 0,0002                          | 2 500  | 0,0                                    |
| Průměrné otáčky motoru: $n_{av eng}$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |                                |                                 | 1 187,0  |  |
| Celkový čas jízdy: $t_{run}$ [h]                           |                                |                                 | 13 965,6   |  |

V: Spektrum točivého momentu motoru

| Požadovaný točivý<br>moment $M_{ti}$<br>[Nm] | Čas provozu $t_{run i}$<br>[h] | Procentuální podíl $p_i$<br>[%] | Střední hodnota $M_{tav i}$<br>[Nm] | Váhové podíly<br>[Nm] |
|--|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 0–120  | 5 253,419                      | 37,617                          | 60                                  | 22,6                  |
| 120–240                                      | 1 709,109                      | 12,238                          | 180                                 | 22,0                  |
| 241–360                                      | 1 100,561                      | 7,881                           | 300                                 | 23,6                  |
| 361–480                                      | 729,776                        | 5,226                           | 420                                 | 21,9                  |
| 481–600                                      | 671,308                        | 4,807                           | 540                                 | 26,0                  |
| 601–720                                      | 686,126                        | 4,913                           | 660                                 | 32,4                  |
| 721–840                                      | 731,084                        | 5,235                           | 780                                 | 40,8                  |
| 841–960                                      | 849,982                        | 6,086                           | 900                                 | 54,8                  |
| 961–1080                                     | 860,804                        | 6,164                           | 1 020                               | 62,9                  |
| 1081–1200                                    | 1 373,451                      | 9,835                           | 1 140                               | 112,1                 |
| Průměrný točivý moment: $M_{tav}$ [Nm]       |                                |                                 | 419                                 |                       |
| Celkový čas jízdy: $t_{run}$ [h]             |                                |                                 | 13 965,6                            |                       |

motor je většinu času provozován v nízkém zatížení. Mírný nárůst v oblasti vysokého točivého momentu je v důsledku použití automatické převodovky a jejími požadavky na řazení. Motor je tedy při rozjezdu a řazení více zatěžován a při dosažení určité rychlosti je potřeba pro jízdu pouze nízký točivý moment motoru na překonání jízdních odporů.

Z průměrných hodnot otáček a točivého momentu motoru lze určit potřebnou energii pro jízdu. Tato energie se určí podle rovnice 6. Výsledek je uveden v tabulce VI. Energie pro jízdu reprezentuje energii dodanou palivem.

$$E_{run} = M_{tav} \cdot \omega_{av eng} \cdot t_{run} \quad [J], \quad (6)$$

kde:

$E_{run}$  .... energie potřebná pro jízdu [J]

$\omega_{av eng}$  ... průměrná úhlová rychlost spalovacího motoru [ $s^{-1}$ ]

$t_{run}$  ..... doba jízdy [h].

VI: Energie potřebná pro jízdu

| [parametr]   | [J]      |
|--|----------|
| <b>Celková energie pro jízdu: <math>E_{run}</math></b> | 2,62E+12 |

Režim decelerace je zajímavý z hlediska zmařené energie při zpomalování vozidla. Tato energie může být z části akumulována pro další využití ve vozidle. Rozbor decelerace je ale zároveň složitější než rozbor předcházejících stavů. Režim decelerace se musí rozdělit zvlášť na motor a zvlášť na převodovku. Motor se podílí na deceleraci svými pasivními odpory a převodovka retardérem. Brzdění motorem nastává vždy dříve než brzdění retardérem.

Decelerace motorem probíhá vždy při vypnutí dodávce paliva. Motor je tedy unášen setrvačností vozidla. Brzdný moment vytváří motor svými pasivními odpory vznikajícími při jeho protáčení při odstavené dodávce paliva. Pro určení pasivních odporů motoru bylo nutné provést doplňující měření ve zkušebně. K tomuto účelu bylo použito dynamické zkušební stanoviště DYNAS 400 do 400 kW ve zkušebně motorů TÜV-SÜD v Praze. Motor byl

protáčen v zahřátém stavu při teplotě chladicí kapaliny 80 °C a vypnutém zapalování a dodávce paliva. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce VII. Grafické znázornění brzdného momentu motoru ukazuje graf 2.

VII: Brzdný moment motoru

| Otáčky motoru [ $min^{-1}$ ] | Brzdý moment [Nm] |
|------------------------------|-------------------|
| 411                          | 84,2              |
| 541                          | 95,7              |
| 781                          | 113,7             |
| 1011                         | 136,3             |
| 1260                         | 163,5             |
| 1520                         | 195,0             |
| 1749                         | 226,3             |
| 1989                         | 257,7             |
| 2099                         | 274,6             |

Pomocí regresní analýzy byla určena rovnice brzdného momentu v závislosti na otáčkách. Výsledný tvar této rovnice je následující:

$$M_{b eng} = 2E - 5 \cdot n_{eng}^2 + 0,0546 \cdot n_{eng} + 58,039 \quad [Nm], \quad (7)$$

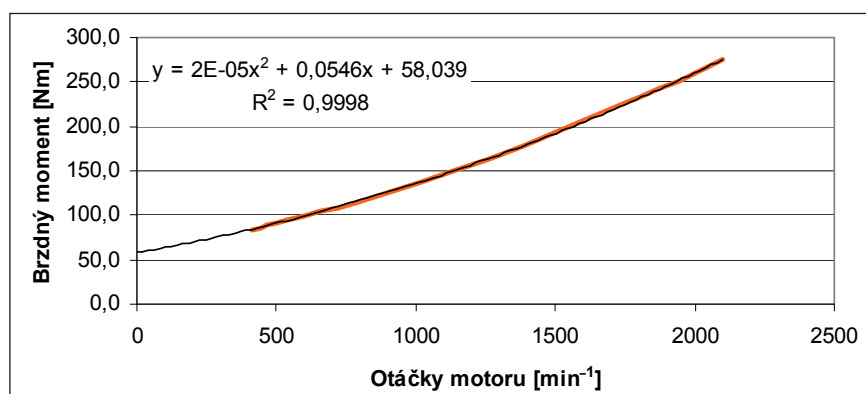
kde:

$n_{eng}$  ..... otáčky spalovacího motoru [ $min^{-1}$ ]

$M_{b eng}$  ... brzdý moment spalovacího motoru [Nm].

Pro určení brzdného momentu se použije průměrná hodnota otáček dle tabulky IV. Tuto hodnotu dosadíme do rovnice 7 a získáme průměrný brzdý moment motoru.

Převodovka, konkrétně retardér, může být chápán jako sekundární zdroj energie. V našem případě se však energie zmařená v retardéru nevyužívá a je přeměněna na teplo. Pokud by byl retardér nahrazen čerpadlem nebo elektrickým generátorem a vozidlo by bylo vybaveno příslušnými zásobníky energie, je možno využít i brzdou energii vozidla. Průměrné hodnoty otáček a brzdného momentu retardéru určíme stejným způsobem jako u motoru.



2: Brzdý moment motoru

Výpočet průměrných hodnot popisují rovnice 8 a 9. Hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tabulkách VIII a IX.

$$n_{av\ ret} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{av\ ret\ i} \cdot \frac{p_i}{100}}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (8)$$

$$M_{b\ av\ ret} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{b\ av\ ret\ i} \cdot \frac{p_i}{100}}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100}} \quad [\text{Nm}], \quad (9)$$

kde:

$n_{av\ ret}$  ..... průměrné otáčky retardéru  $[\text{min}^{-1}]$

$M_{b\ av\ ret}$  ..... průměrný brzdňý moment retardéru  $[\text{Nm}]$

$p_i$  ..... procentuální podíl daného intervalu  $[\%]$ .

Průměrné výstupní otáčky hřídele převodovky odpovídají rychlosti autobusu 25 km/h, což je průměrná rychlost jízdy autobusu.

Spektrum brzdňého momentu retardéru vykazuje dvě špičky, a to v oblasti 500 Nm a v oblasti 900 Nm. To je dáno tím, že se retardér ovládá ve třech stupních. První stupeň je 450 Nm, druhý stupeň 900 Nm a třetí stupeň 1800 Nm. V provozu se tedy brzdí nejčastěji na první stupeň retardéru a méně často na druhý stupeň. Brzdění ve třetím stupni se pro vysoký brzdňý moment využívá minimálně.

Hodnoty brzdění motorem a retardérem jsou shrnuty v tabulce X. Jedná se o časy brzdění, průměrné otáčky a průměrné brzdňé momenty.

Výpočet energií daných zařízení popisují rovnice 10 až 12 a výsledky jsou uvedeny v tabulce XI.

VIII: Spektrum otáček retardéru

| Rychlost vozidla –<br>intervaly $v_i$<br>[km/h]               | Rychlost vozidla<br>– střední hodnota<br>$v_{s\ i}$<br>[km/h] | Čas provozu $t_{dec\ ret\ i}$<br>[h:min:s] | Procentuální<br>podíl $p_i$<br>[%] | Otáčky retardéru<br>– střední hodnota<br>$n_{av\ ret\ i}$<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] | Váhové podíly<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] |
|---|---|--|------------------------------------|--|--|
| 0–8   | 4   | 353:17:59                                  | 14,31                              | 138  | 19,7                                   |
| 8–16  | 12  | 398:46:48                                  | 16,12                              | 413  | 66,5                                   |
| 16–24   | 20  | 617:04:18                                  | 25,03                              | 688  | 172,2                                  |
| 24–32   | 28  | 328:33:04                                  | 13,28                              | 963  | 127,9                                  |
| 32–40   | 36  | 283:50:41                                  | 11,42                              | 1 239  | 141,5                                  |
| 40–48   | 44  | 239:56:32                                  | 9,62                               | 1 514  | 145,7                                  |
| 48–56   | 52  | 150:04:11                                  | 6,03                               | 1 789  | 107,9                                  |
| 56–64   | 60  | 68:24:59                                   | 2,77                               | 2 064  | 57,1                                   |
| 64–72   | 68  | 26:47:05                                   | 1,08                               | 2 340  | 25,4                                   |
| 72–80   | 76  | 6:51:09                                    | 0,28                               | 2 615  | 7,3                                    |
| 80–88   | 84  | 1:04:16                                    | 0,05                               | 2 890  | 1,3                                    |
| 88–96   | 92  | 0:03:20                                    | 0,00                               | 3 165  | 0,1                                    |
| Průměrné výstupní otáčky: $n_{av\ ret}$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |   |  |                                    | 873  |  |
| Celkový čas brzdění: $t_{dec\ ret}$ [h]                       |   |  |                                    | 2 474,7  |  |

IX: Spektrum brzdňého momentu retardéru

| Požadovaný brzdňý<br>moment $M_{b\ i}$<br>[Nm] | Čas provozu $t_{dec\ ret\ i}$<br>[h:min:s] | Procentuální podíl $p_i$<br>[%] | Střední hodnota<br>$M_{b\ av\ ret\ i}$<br>[Nm] | Váhové podíly<br>[Nm] |
|--|--|---------------------------------|--|-----------------------|
| 0–200  | 363:09:05                                  | 14,71                           | 100  | 14,7                  |
| 200–400  | 338:56:49                                  | 13,73                           | 300  | 41,2                  |
| 400–600  | 767:04:47                                  | 30,52                           | 500  | 152,6                 |
| 600–800  | 431:19:08                                  | 17,43                           | 700  | 122,0                 |
| 800–1000                                       | 448:14:04                                  | 18,54                           | 900  | 166,9                 |
| 1000–1200                                      | 48:54:09                                   | 1,98                            | 1 100  | 21,8                  |
| 1200–1400                                      | 37:09:33                                   | 1,50                            | 1 300  | 19,5                  |
| 1400–1600                                      | 31:30:01                                   | 1,26                            | 1 500  | 18,9                  |
| 1600–1800                                      | 8:26:40                                    | 0,33                            | 1 700  | 5,6                   |
| 1800–2000                                      | 0:00:05                                    | 0,00                            | 1 900  | 0,0                   |
| Průměrný brzdňý moment: $M_{b\ av\ ret}$ [Nm]  |  |                                 | 563  |                       |
| Celkový čas brzdění: $t_{dec\ ret}$ [h]        |  |                                 | 2 474,7  |                       |

## IX: Spektrum brzděného momentu retardéru

| Požadovaný brzdňý moment $M_{bi}$<br>[Nm]     | Čas provozu $t_{dec\ ret\ i}$<br>[h:min:s] | Procentuální podíl $p_i$<br>[%] | Střední hodnota $M_{b\ av\ ret\ i}$<br>[Nm] | Váhové podíly<br>[Nm] |
|---|--|---------------------------------|---|-----------------------|
| 0–200   | 363:09:05                                  | 14,71                           | 100   | 14,7                  |
| 200–400                                       | 338:56:49                                  | 13,73                           | 300   | 41,2                  |
| 400–600                                       | 767:04:47                                  | 30,52                           | 500   | 152,6                 |
| 600–800                                       | 431:19:08                                  | 17,43                           | 700   | 122,0                 |
| 800–1000                                      | 448:14:04                                  | 18,54                           | 900   | 166,9                 |
| 1000–1200                                     | 48:54:09                                   | 1,98                            | 1 100                                       | 21,8                  |
| 1200–1400                                     | 37:09:33                                   | 1,50                            | 1 300                                       | 19,5                  |
| 1400–1600                                     | 31:30:01                                   | 1,26                            | 1 500                                       | 18,9                  |
| 1600–1800                                     | 8:26:40                                    | 0,33                            | 1 700                                       | 5,6                   |
| 1800–2000                                     | 0:00:05                                    | 0,00                            | 1 900                                       | 0,0                   |
| Průměrný brzdňý moment: $M_{b\ av\ ret}$ [Nm] |  |                                 | 563   |                       |
| Celkový čas brzdění: $t_{dec\ ret}$ [h]       |  |                                 | 2 474,7                                     |                       |

## X: Hodnoty brzdění motorem a retardérem

|   |         |                      |
|---|---------|----------------------|
| Celkový čas brzdění motorem: $t_{dec\ eng}$     | 5 317,0 | [h]                  |
| Průměrné otáčky motoru: $n_{av\ eng}$           | 1187    | [min <sup>-1</sup> ] |
| Prům. brzdňý moment motoru: $M_{b\ av\ eng}$    | 151     | [Nm]                 |
| Celkový čas brzdění retardérem: $t_{dec\ ret}$  | 2 474,7 | [h]                  |
| Průměrné otáčky retardéru: $n_{av\ ret}$        | 873     | [min <sup>-1</sup> ] |
| Prům. brzdňý moment retardéru: $M_{b\ av\ ret}$ | 563     | [Nm]                 |

$$E_{dec} = E_{dec\ eng} + E_{dec\ ret} \quad [J] \quad (10)$$

$$E_{dec\ eng} = M_{b\ av\ eng} \cdot \omega_{av\ eng} \cdot t_{dec\ eng} \quad [J] \quad (11)$$

$$E_{dec\ ret} = M_{b\ av\ ret} \cdot \omega_{av\ ret} \cdot t_{dec\ ret} \quad [J], \quad (12)$$

kde:

$E_{dec}$ ..... celková energie decelerace [J]

$E_{dec\ eng}$ ... energie při deceleraci spalovacím motorem [J]

$E_{dec\ ret}$ ... energie při deceleraci retardérem [J]

$t_{dec\ eng}$ ... doba brzdění spalovacím motorem [h]

$t_{dec\ ret}$ ... doba brzdění retardérem [h]

$\omega_{av\ ret}$ ... průměrná úhlová rychlost retardéru [s<sup>-1</sup>].

## XI: Energetická bilance decelerace

| [parametr]  | [J]      |
|---|----------|
| Energie při deceleraci motorem: $E_{dec\ eng}$    | 3,59E+11 |
| Energie při deceleraci retardérem: $E_{dec\ ret}$ | 4,58E+11 |
| Celková energie decelerace: $E_{dec}$             | 8,18E+11 |

## VÝSLEDKY A DISKUSE

V práci byl podrobně analyzován provoz klasického městského autobusu v typickém městském provozu. Celkový provoz byl rozdělen na tři dílčí režimy charakterizované specifickými parametry. Všechny dílčí výsledky z analýzy jednotlivých režimů uvádějí tabulka XII a graf 3. Do celkového vyhodnocení je zavedena znaménková konvence pro tok energií. Energie vydaná pro jízdu má kladnou hodnotu a energie zmařená při brzdění má zápornou hodnotu.

Z grafu 3 vyplývá, že energeticky nejnáročnější je režim jízdy. Energie potřebná pro jízdu byla za sledovanou dobu 2,62E+12 J. Tato energie je vydaná motorem na překonání valivého odporu, odporu vzduchu, odporu zrychlení, odporu stoupání, pasivních odporů v hnacím řetězci a na pohon pomocných agregátů. Režim jízdy je v celkové době provozu zastoupen přibližně 44 %.

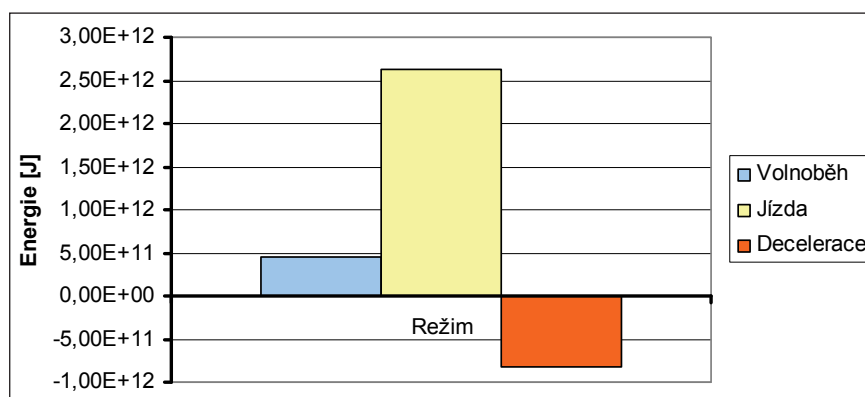
Další režim, ve kterém se spotřebovává energie, je volnoběh motoru, což pro autobus znamená klid. Klidový stav nastává na zastávkách a při stání na křižovatkách. Spalovací motor běží v tomto režimu zbytečně, a proto je možno tuto energii ušetřit při použití systému pro vypínání motoru. Energie, kterou je možné ušetřit ve sledovaném čase, je 4,47E+11 J. Tato energie je významná, protože režim stání je v provozu městského autobusu zastoupen přibližně 40 % z celkového provozního času.

Zajímavý režim z hlediska konstrukce hybridních autobusů je režim decelerace. Režim decelerace na-



## XII: Výsledky vyhodnocení provozu městských autobusů

| [režim]           | [parametr]                                  | [J]       |
|-------------------|---|-----------|
| <b>Volnoběh</b>   | Energie ve volnoběhu 0: Eidle0              | 3,15E+11  |
|                   | Energie ve volnoběhu 1: Eidle1              | 1,32E+11  |
|                   | Celková energie volnoběhu: Eidle            | 4,47E+11  |
| <b>Jízda</b>      | Celková energie pro jízdu: Erun             | 2,62E+12  |
| <b>Decelerace</b> | Energie při deceleraci motorem: Edec eng    | -3,59E+11 |
|                   | Energie při deceleraci retardérem: Edec ret | -4,58E+11 |
|                   | Celková energie decelerace: Edec            | -8,18E+11 |



3: Energetická bilance provozu

stává při snižování kinetické a potenciální energie autobusu, ale až po překonání všech pasivních odporů. Režim decelerace je v celkové době provozu zastoupen přibližně 16%. Energie z deceleračního režimu může být využita pro následný pohon autobusu. Energie, která mohla být vrácena zpět do vozidla během sledování, je  $-8,18E+11$  J.

## ZÁVĚR

Byla provedena analýza provozu městských autobusů. Obecný matematický popis umožňuje přepočítání energetické bilance i pro jiné typy městských

autobusů v mírně odlišných provozech. Tím lze vytvořit rozsáhlejší databázi provozu městských autobusů a lépe poznat charakteristické vlastnosti městského provozu. Energetická analýza byla provedena na konkrétních městských autobusech v reálném provozu. Jsou uváděny časy a zatížení jednotlivých prvků majících vztah k pohonu autobusu. Z hlediska metodiky byly sledovány a diskutovány především otázky možných úspor paliva při použití hybridního pohonu. Byly též naznačeny možnosti dalšího rozšíření analýzy a směr další práce v oblasti konstrukce hybridních pohonů.

## SOUHRN

Předmětem článku je popis výpočtu energií potřebných pro pohon městských autobusů. Hodnoty energií reprezentují energetickou bilanci provozu městského autobusu o délce 12 m, celkové hmotnosti 18 t a při středně těžkém provozu. Dvanáctimetrové autobusy jsou nejčastěji zastoupeny ve vozových parcích dopravních podniků a jsou také nejčastěji konstruované jako hybridní. Hlavním cílem práce je poskytnout postup pro výpočet energií potřebných pro provoz autobusu a vyčíslit energetickou náročnost ve třech základních provozních režimech: stání, jízda a decelerace.

Článek se zabývá analýzou provozu městských autobusů. Analýza je zaměřena na energetickou bilanci hnacího řetězce sloužícího k pohonu městských autobusů. Energetická bilance udává množství energie potřebné pro provoz autobusu ve všech režimech při čistě městském provozu. Provoz městského autobusu je pro potřeby analýzy rozdělen do tří základních režimů: stání, jízda, decelerace. Pro analýzu byla zvolena skupina 19 shodných nízkopodlažních městských autobusů. Autobusy jsou umístěny v jednom městě a během provozu jezdí na všech autobusových linkách a střídají se na nich různí řidiči. Tím je vyloučen vliv topologie linky a vliv řidiče. Potřebná data pro analýzu se ukládají do statistik řídicích jednotek motorů a převodovek. Po určité době provozu, kdy dojde k ustálení hod-

not, jsou data vyvolána a uložena pro další zpracování. Cílem analýzy je určení energií pro jednotlivé režimy jízdy. Energie v jednotlivých režimech jízdy dávají přehled o možných úsporách energií při použití hybridního pohonu pro tyto autobusy. Energetická bilance provozu je základem pro správné navržení hybridního pohonu pro městské autobusy a pro řízení hybridního pohonu.

Výsledkem práce je množství energie potřebné pro stání, jízdu a deceleraci autobusu v městském provozu. Výsledky jsou následující:

- spotřeba energie v režimu stání (volnoběh motoru):  $4,47\text{E}+11$  J
- spotřeba energie pro jízdu (běh motoru):  $2,62\text{E}+12$  J
- energie zmařená při deceleraci (brzdění):  $-8,18\text{E}+11$  J.

Nižší spotřeba paliva může být dosažena použitím autobusů s hybridním pohonem. Energetická spotřeba při stání autobusu může být snížena použitím start-stop systému motoru. Spotřeba energie pro jízdu může být snížena při posunutí pracovní oblasti spalovacího motoru do oblasti s vyšší účinností a energie zmařená při deceleraci může být rekuperována a následně využita pro pohon vozidla.

městský autobus, hybridní pohon, energie, analýza, provozní data, úspora, návrh

### SUMMARY

This report describes the analysis of energy balance of city buses. For analysis were used city buses with length 12 meters and total weight 18 tons. This type of buses is mostly used in public transport and is mostly design as hybrid bus. The required data were taken from electronic control units of engines and transmissions. All investigated buses were located in one city. The buses were changing all bus routes and were driven by all bus drivers. These conditions are necessary for elimination of bus route topology and bus driver behaviour. For the energy analysis is city bus operation divided into three basic modes: stop state, drive and deceleration. These three modes describe operation of city buses well.

The main result of this work is amount of energy necessary for stop state, drive and deceleration. The results are following:

- Energy consumption of stop state (idling):  $4,47\text{E}+11$  J
- Energy consumption of drive mode (run):  $2,62\text{E}+12$  J
- Energy dissipated by deceleration (braking):  $-8,18\text{E}+11$  J.

Lower fuel consumption can be achieved by using of city buses with hybrid drive system. Energy consumption of stop state can be reduced by start-stop system of the engine when the engine is idling and its efficiency is too low. Energy consumption of drive mode can be lower in case of run of the engine in area with higher efficiency. Energy dissipated during deceleration can be stored and consequently used for drive of vehicle.

### LITERATURA

- MEIBOM, P., 2001: Technology Analysis of Public Transport Modes, Technical University of Denmark, 216 s. ISBN 87-7877-077-7.
- ŽÁKOVEC, J., 2007: Informační servis gas – Plyn v dopravě, GAS, 54 s. ISSN 1212-7825.

Adresa

Ing. Luboš Papírník, Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: lubos.papirnik@seznam.cz