ANALIZA TOPLOTNIH POTREBA ZA POUZDANO ZAGRIJAVANJE AUTOBUSA

HEAT DEMAND ANALYSIS FOR RELIABLE BUS HEATING

Mr Svetozar Grahovac, dipl. inž.,
„Evo Bus GmbH", Mannheim, BR Deutschland

Nastojanja na zamjeni nafte alternativnim izvorima energije za pogon i grijanje autobusa, predviđaju nove uređaje za pretvaranje alternativne energije u toplotnu. Određivanje kapaciteta novog uređaja za „direktno" grijanje vode, zahtijeva pouzdanu analizu toplotnih gubitaka, koje će nadoknaditi postojeće „indirektno" vazdušno grijanje. Pouzdano zagrijavanje unutrašnjosti autobusa podrazumijeva postizanje podešene temperature unutrašnjeg vazduha od 22°C u trajanju od 90 minuta i njeno održavanje, stalnim pokrivanjem gubitaka toplote, pri temperaturi vanjskog vazduha od –18°C. Sadržaj rada se oslanja na danas raspoložive preporuke i norme za provjeru grijanja autobusa.

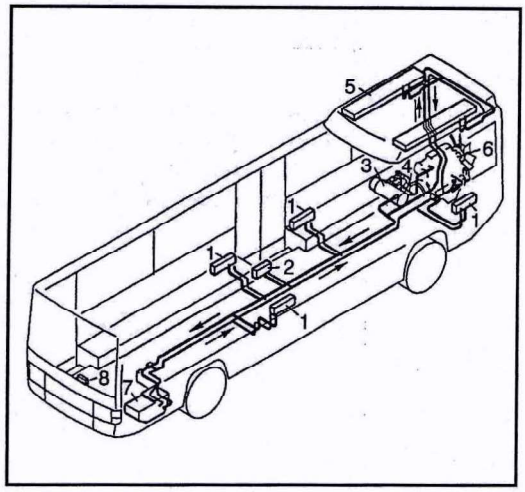
Efforts to replace oil with alternative energy sources for bus drive and heating predict new equipment for converting alternative energy into heat energy. Determination of capacity of such new device, used for "direct" water heating, requires a reliable analysis of heat losses, which would compensate the existing "indirect" air heating. Reliable heating of the bus interior implies obtaining the indoor air temperature adjusted to 22°C lasting 90 minutes and maintenance of such temperature by the constant covering of heat losses at the outdoor air temperature of –18°C. The paper contents rely on recommendations and norms for bus heating checks available today.

Ključne reči: autobus; vazdušno grijanje; toplotni gubici; potrebna količina toplote
Key words: bus; air heating; heat losses; heat demand

1. Uvod

Potreba za stvaranjem ugodne klime u prostoru u kome borave ljudi, nezavisno od uslova okoline, postoji od kada je i ljudi. Sistemi grijanja unutrašnjosti autobusa mogu se svrstati u indirektna vazdušna grijanja. Na slici 1 je prikazana mreža za grijanje vode, odnosno prikazane su osnovne komponente sistema za grijanje autobusa. Vodena pumpa (4) pripada uređaju za dodatno grijanje (3) i potpomaže cirkulaciju tople vode. Automatsko uključivanje i isključivanje uređaja za dodatno grijanje vode, nominalne snage 30 [kW], zavisi od potrebe za grijanjem i od režima rada motora vo-

zila (6). U razmjenjivačima toplote sa unakrsnim strujanjem (1, 2, 5 i 7) sa unutrašnje strane struji primarni nosilac toplote za grijanje, „topla voda", a sa vanjske strane razmjenjivača struji sekundarni nosilac toplote za grijanje, „vazduh". Prinudna cirkulacija vazduha kroz razmjenjivače toplote obično se ostvaruje pomoću radijalnih ili aksijalnih ventilatora. Preko tastature za posluživanje (8) može se uključiti ili isključiti grijanje unutrašnjosti autobusa, ili izvršiti promjena podešene temperature unutrašnjeg vazduha.



Slika 1. Mreža vodenog grijanja autobusa; 1 – podno grijanje sa ventilatorima, 2 – podno grijanje kod vrata, 3 – uređaj za dodatno grijanje vode, 4 – vodena pumpa, 5 – krovno grijanje, 6 – motor vozila, 7 – grijanje vozača, 8 – tastatura za posluživanje

Podno grijanje (1, 2) radi isključivo sa kružnim vazduhom. Ventilatori za prinudno strujanje vazduha su dvostepeni. Stepen ventilatora se reguliše automatskim putem, u ovisnosti o temperaturi vode za grijanje i temperaturi vanjskog i unutrašnjeg vazduha.

Krovno grijanje (5) radi sa kružnim, miješanim ili sa svježim vazduhom, što se opet reguliše automatskim putem u ovisnosti od potreba i mogućnosti sistema za grijanje. Preporučeni udio svježeg vazduha u ukupnoj količini miješanog vazduha iznosi 40±15%. Ventilatori za prinudno strujanje vazduha su kontinualni, a broj obrtaja ventilatora se reguliše automatskim putem, u ovisnosti od temperature vode za grijanje i temperature unutrašnjeg vazduha.

Grijanje vozača (7) radi sa svježim vazduhom, a temperaturu i broj obrtaja ventilatora, odnosno količinu vazduha određuje vozač preko tastature za posluživanje. Pri vožnji kroz tunel uobičava se grijanje kabine vozača kružnim vazduhom. Ventilator za prinudno strujanje vazduha je kontinualni.

2. Zadatak grijanja autobusa

Grijanje autobusa treba da je u stanju da postigne temperaturu unutrašnjeg vazduha od 22°C u trajanju od 90 minuta i da je održava, stalnim pokrivanjem gubitaka toplote, pri temperaturi vanjskog vazduha od –18°C. Za temperature vanjskog vazduha ispod –18°C dozvoljava se sniženje temperature unutrašnjeg vazduha do 15°C. Poželjna temperatura okružujućih površina u unutrašnjosti autobusa ne treba da je za 7 K niža od temperature unutrašnjeg vazduha. Željena minimalna temperatura okružujućih površina od 15°C ne može se ostvariti pri niskim vanjskim temperaturama. Ovaj problem niskih temperatura rješava se nastrujavanjem kritičnih/hladnih površina sa toplim vazduhom. Maksimalna temperatura vazduha iznad poda ili ispod sjedi-

šta ne treba da prekorači vrijednost od 35°C. Poželjno je postizanje nižih temperatura u području glave, a viših temperatura u području nogu („tople noge – hladna glava"). Za unutrašnju temperaturu vazduha od 22°C preporučuje se maksimalna brzina strujanja vazduha do 0,2 m/s u visini glave putnika koji stoje ili sjede. Preporučena relativna vlažnost vazduha ne bi trebalo da padne ispod 35%.

3. Osnove grijanja autobusa

3.1. Analiza gubitaka toplote

Jedan od osnovnih parametara pri određivanju potrebne toplote za grijanje autobusa, predstavlja najniža temperatura vanjskog vazduha, za koju je namijenjeno grijanje. Potrebe za grijanjem unutrašnjosti autobusa $\dot{Q}_{pot}$ [kW] mogu se prikazati zbirom količine toplote za pokrivanje toplotnih gubitaka kroz ukupnu okružujuću površinu putničkog prostora, „transmisione gubitke" $\dot{Q}_{tr}$ [kW], i količine toplote za grijanje svježeg vazduha do temperature vazduha u unutrašnjosti autobusa $\dot{Q}_{ve}$ [kW] – „ventilacione gubitke", može se dati izraz:

$$\dot{Q}_{pot} = \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_{ve} \tag{1}$$

Količina toplote $\dot{Q}_{tr}$ [kW] za pokrivanje ukupnih transmisionih gubitaka kroz ukupnu okružujuću površinu A [m^2] može se dati izrazom:

$$\dot{Q}_{pot} = k\,A\,(t_{uv} - t_{vv}) \tag{2}$$

k [$kW/m^2 \cdot K$] – koeficijent prolaza toplote,
t_{uv} [°C] – zadata odnosno srednja temperatura unutrašnjeg vazduha,
t_{vv} [°C] – najniža predviđena temperatura ventilacionog ili vanjskog vazduha.

U praksi je uobičajeno korišćenje vrijednosti k·A [W/K]. Vrijednost k·A obuhvata prodiranje svježeg vazduha u unutrašnjosti autobusa uslijed nezaptivenosti vrata ili prozora, kreće se između 200 i 700 W/K za moderne putničke autobuse i zavisna je od slijedećih faktora:

– vrste ostaklenja (jednostruko ili dvostruko staklo),
– brzine kretanja autobusa,
– izolacije autobusa,
– konstrukcije vrata.

Toplotu za pokrivanje ukupnih ventilacionih gubitaka $\dot{Q}_{ve}$ [kW] nadoknađuje krovno grijanje $\dot{Q}_{vek}$ [kW] i grijanje vozača $\dot{Q}_{vev}$ [kW], može se dati izraz:

$$\dot{Q}_{ve} = \dot{Q}_{vek} + \dot{Q}_{vev} \tag{3}$$

Toplotu za pokrivanje transmisionih gubitaka $\dot{Q}_{tr}$ [kW] nadoknađuje grijanje vozača $\dot{Q}_{trv}$ [kW], podno grijanje $\dot{Q}_{trp}$ [kW] i krovno grijanje $\dot{Q}_{trk}$ [kW]; može se dati izraz:

$$\dot{Q}_{trv} = \dot{Q}_{trv} + \dot{Q}_{trp} + \dot{Q}_{trk} \tag{4}$$

3.2. Grijanje kružnog i ventilacionog vazduha

Za grijanje vozača može se dati izraz:

$$\dot{Q}_v = \rho_{vg} \cdot \dot{V}_{vgv} \cdot c_{vg} \cdot \Delta T_v = \dot{Q}_{vev} + \dot{Q}_{trv} \quad (5)$$

gdje su:
ρ_{vg} [kg/m^3] – gustina mješavine tople vode i glikola,
$\dot{V}_{vgv}$ [m^3/s] – zapreminski protok vode i glikola kroz razmjenjivač toplote vozača,
c_{vg} [kJ/kg·K] – masena specifična toplota mješavine tople vode i glikola,
ΔT [K] – temperaturna razlika tople vode na ulazu i izlazu razmjenjivača toplote.

Za grijanje se koristi mješavina tople vode i glikola, radi sniženja tačke smrzavanja. Za uobičajeni odnos miješanja 1:1, tačka smrzavanja mješavine iznosi –37°C. Fizička svojstva mješavine vode i glikola za radnu temperaturu od 80°C iznose $\rho_{vg} \approx 1035$ kg/m^3 i $c_{vg} \approx 3{,}5$ kJ/kg·K. Bez dodatka glikola bi fizička svojstva vode za radnu temperaturu od 80°C iznosila $\rho_{vg} \approx 972$ kg/m^3 i $c_{vg} \approx 4{,}2$ kJ/kg·K.

Za ventilacionu toplotu grijanja vozača vrijedi izraz:

$$\dot{Q}_{vev} = \dot{m}_{vvv} \cdot c_{pv} \cdot (t_{uv} - t_{vv}) \quad (6)$$

Toplota grijanja vozača za pokrivanje transmisionih gubitaka se daje izrazom:

$$\dot{Q}_{trv} = \dot{m}_{vvv} \cdot c_{pv} \cdot (t_{iv2v} - t_{uv}) \quad (7)$$

gdje su:
$\dot{m}_{vvv}$ [kg/s] – maseni protok ventilacionog vazduha za grijanje vozača,
c_{pv} [kJ/kg·K] – masena specifična toplota vazduha,
t_{iv2v} [°C] – potrebna srednja temperatura izlaznog vazduha iz grijanja vozača.

Za toplotu krovnog grijanja može se dati izraz.

$$\dot{Q}_k = \rho_{vg} \cdot \dot{V}_{vkg} \cdot c_{vg} \cdot \Delta T_k = \dot{Q}_{vek} + \dot{Q}_{trk} \quad (8)$$

gdje su:
$\dot{V}_{vkg}$ [m^3/s] – zapreminski protok vode i glikola kroz razmjenjivače toplote za krovno grijanje,
ΔT_k [K] – temperaturna razlika vode na ulazu u razmjenjivač toplote i na izlazu iz njega.

Za ventilacionu toplotu od krovnog grijanja vrijedi izraz:

$$\dot{Q}_{vek} = \dot{m}_{vvk} \cdot c_{pv} (t_{uv} - t_{vv}) \quad (9)$$

Toplota krovnog grijanja za pokrivanje transmisionih gubitaka se daje izrazom:

$$\dot{Q}_{trk} = \dot{m}_{vvk} \cdot c_{pv} \cdot (t_{iv2k} - t_{uv}) + \dot{m}_{kvk} \cdot c_p \cdot (t_{iv2k} - t_{uv}) \quad (10)$$

gdje su:
$\dot{m}_{vvk}$ [kg/s] – maseni protok ventilacionog vazduha za krovno grijanje,
$\dot{m}_{kvk}$ [kg/s] – maseni protok kružnog vazduha za krovno grijanje,
t_{iv2k} [°C] – potrebna srednja temperatura izlaznog vazduha iz krovnog grijanja.

Za podno grijanje za *n* razmjenjivača se može dati izraz:

$$\dot{Q}_p = \sum_{i=1}^{i=n} \cdot \rho_{vg} \cdot \dot{V}_{vgpi} \cdot c_{vg} \cdot \Delta T_{pi} = \dot{Q}_{trp} \quad (11)$$

gdje su:

$\dot{V}_{vgpi}$ [m³/s] – zapreminski protok vode i glikola kroz *i*-ti razmjenjivač toplote,
ΔT_{pi} [K] – temperaturna razlika vode na ulazu i izlazu *i*-tog razmjenjivača toplote za podno grijanje.

Toplota podnog grijanja za pokrivanje transmisionih gubitaka $\dot{Q}_{trp}$ [kW], predata kružnom vazduhu, daje se izrazom:

$$\dot{Q}_{trp} = \dot{m}_{kpv} \cdot c_{pv} \cdot (t_{iv2p} - t_{uv}) \tag{12}$$

gdje su:
$\dot{m}_{kpv}$ [kg/s] – maseni protok kružnog vazduha za podno grijanje,
t_{iv2p} [°C] – potrebna srednja temperatura izlaznog vazduha iz podnog grijanja.

Pri ovim razmatranjima toplota oslobođena od elektromotra za pogon ventilatora zanemaruje se. Također se polazi od pretpostavke da se unutrašnjost autobusa ravnomjerno zagrijava; u svim tačkama vlada temperatura t_{uv} [°C]. Priliv toplote od putnika se zanemaruje.

3.3. Raspoloživa toplota

Ukupna raspoloživa toplota za grijanje autobusa $\dot{Q}_{ras}$ [kW] predstavlja zbir toplote uređaja za dodatno grijanje $\dot{Q}_{ndg}$ [kW] i toplote motora vozila $\dot{Q}_{mot}$ [kW] predate toploj vodi. U razmenjivačima toplote se raspoloživa toplota predaje kružnom i svježem vazduhu i treba da je veća od sume toplota: toplote za grijanje vozača $\dot{Q}_v$ [kW], toplote za podno grijanje $\dot{Q}_p$ [kW], toplote za krovno grijanje $\dot{Q}_k$ [kW] i gubitaka toplote u cjevovodima $\dot{Q}_{gubc}$ [kW], pa se može postaviti izraz:

$$\dot{Q}_{ras} = \dot{Q}_{udg} \pm \dot{Q}_{mot} \geq \dot{Q}_v + \dot{Q}_p + \dot{Q}_k + \dot{Q}_{gubc} \tag{13}$$

Raspoloživa toplota motora za grijanje vode daje se izrazom:

$$\dot{Q}_{mot} = \rho_{vg} \cdot \dot{V}_{vgu} \cdot c_{vg} \cdot \Delta T_{mot} \tag{14}$$

Toplota motora može da bude negativna, odnosno da uređaj za dodatno grijanje grije motor, što je obično slučaj pri radu motora vozila na praznom hodu u toku zagrijavanja autobusa. Toplota grijača za dodatno grijanje određuje se prema izrazu:

$$\dot{Q}_{udg} = \rho_{vg} \cdot \dot{V}_{vgu} \cdot c_{vg} \cdot \Delta T_{udg} \tag{15}$$

gdje su:
$\dot{V}_{vgu}$ [m³s] – ukupni zapreminsski protok vode i glikola,
Δt_{mot} [K] – temperaturna razlika vode na izlazu motora autobusa i ulazu u njega,
ΔT_{udg} [K] – temperaturna razlika vode na izlazu uređaja za dodatno grijanje i ulazu u njega.

4. Ispitivanje pouzdanosti zagrijavanja autobusa

4.1. Grijanje unutrašnjosti autobusa

Vrlo precizno ispitivanje pouzdanosti zagrijavanja unutrašnjoti gradskih autobusa sprovodi se u klimatski kontrolisanim kanalima sa vjetrom. Krovno i podno grijanje se ispituje pri temperaturi vanjskog vazduha od –18°C i brzini strujanja vjetra od 30 km/h. Nakon 90 minuta je potrebno da se unutrašnjost autobusa zagrije na temperaturu od 22°C, pri broju obrtaja pogonskog motora od 1500 1/min. Iako pogonski

motor radi bez opterećenja, njegov doprinos zagrijavanju ne može se zanemariti. Za ocjenu pouzdanosti grijanja autobusa, presudne su srednje temperature unutrašnjeg vazduha mjerene u području glave, u području nogu i maksimalna odstupanja pojedinačnih tempertura. Odstupanje pojedinačnih temperatura ne bi trebalo da iznosi više od 4 K. Temperature za područje nogu mjere se iznad poda u visini između 40 i 50 cm. Temperature za područje glave se mjere u visini između 170 i 190 cm.

4.2. Grijanje vozača

Valjanost grijanja vozača ispituje se u kanalima sa vjetrom prema propisima SAE J 381/382. Temperatura izabranog okolnog vazduha treba da bude u granicama $-18\pm3°C$, a brzina vjetra se kreće između 3 i 5 km/h. Na čeonu staklenu površinu kabine vozača izvrši se ravnomjerna raspodjela količine vode od 0,05 ml/cm^2. Nakon 30 do 40 minuta pokrene se motor vozila i uključi uređaj za dodatno grijanje. Sa uklanjanjem leda počinje se kada temperatura vode u sistemu za grijanje dostigne vrijednost od 65°C i broj obrtaja motora vozila se povisi na 1500 1/min. Uklanjanje leda traje 45 minuta. U zavisnosti od ostvarenog vidnog polja donosi se odluka o pouzdanosti grijanja vozača.

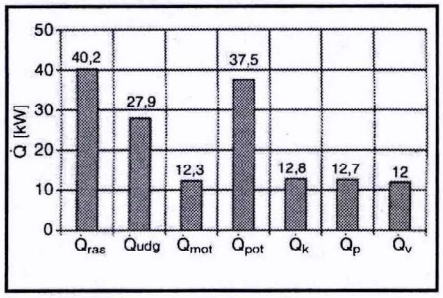
5. Rezultati i zaključak

Na primjeru gradskog autobusa analiziraju se toplotne potrebe za pouzdano zagrijavanje. U tabeli 1 su prikazane količine toplote određene preko vodene strane, prema naprijed opisanim izrazima.

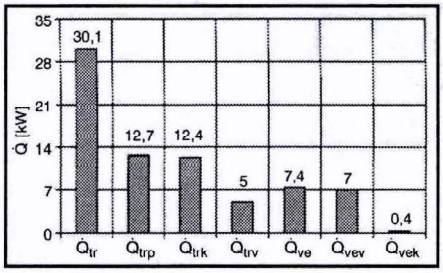
Na slici 2 prikazane su raspoloživa i potrebna količina toplote, kao i količine toplote iz tabele 1. Promjena ovih količina toplote poslije 90 minuta može se zanemariti, jer je postignuto približno stacionarno stanje.

Tabela 1. Proizvođači i potrošači toplote u autobusu

Red. br.	Grijanje vode/vazduha	$\dot{V}_{vg}$ [1/h]	ΔT [K]	$\dot{Q}$ [kW]
1.	Dodatno grijanje vode	4122	6,72	27,9
2.	Grijanje vode u motoru	4122	2,96	12,3
3.	Vazdušno krovno grijanje	1062	11,97	12,8
4.	Vazdušno podno grijanje	1578	7,99	12,7
5.	Vazdušno grijanje vozača	1482	8,04	12,0



Slika 2. Raspoloživa i potrebna toplota



Slika 3. Transmisioni i ventilacioni gubici

Na slici 3 su prikazani transmisioni i ventilacioni gubici, određeni prema naprijed opisanim izrazima. Na osnovu temperaturne razlike između unutrašnjeg i vanjskog vazduha od 41,3 K, može se odrediti vrijednost k·A od 728 W/K za analizirani gradski autobus. Ukupni protok kružnog vazduha kroz krovno grijanje iznosi oko 3500 m^3/h, a udio svježeg vazduha se procjenjuje na 35 m^3/h. Temperaturna razlika između izlaznog i ulaznog kružnog vazduha iznosi 11 K. Ukupna količina toplote za grijanje vozača je preračunata na ventilacionu i transmisionu toplotu, poznajući srednju temperaturu vazduha u autobusu 24,6°C, temperaturu vanjskog vazduha –16,7°/ i izlaznog vazduha iz grijanja vozača od 53,3°C.

Može se izvesti osnovni zaključak da bi zamjena dizelovog motora sa unutrašnjim sagorijevanjem alternativnim pogonom („gorivna ćelija"), zahtijevala uređaj za zagrijavanje tople vode kapaciteta od 40 kW. Na ovu količinu toplote se sa druge strane može uticati preko: načina izolacije autobusa, vrste i veličine stakala, konstrukcije vrata i preko količine ventilacionog/svježeg vazduha. Na osnovu prikazanih rezultata također se zaključuje da gubitak toplote u cjevovodima iznosi 2,7 kW.

Literatura

[1] **Kulić, E.:** *Principi projektovanja sistema grijanja,* Mašinski fakultet, Sarajevo, 1989.

[2] **Zimmermann, F.:** *Busklimatisierung,* KI – Klima-Kälte-Heizung 9/1992, S. 298–303.

[3] **Hucho, W. H.:** *Aerodynamik des Automobils,* 3. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994.

[4] **Todorović, B.:** *Provera letnjeg rada klimatizacije putničkog vagona namenjenog području srednje Evrope,* KGH 1/1999, SMEITS, Beograd.

[5] ***: VDV Schriften Nr. 236, Klimatisierung von Linienbussen, Ausgabe 04/96.

[6] ***: DIN 1946, Blatt 3, Lüftungstechnische Anlagen, Lüftung von Fahrzeugen, Juni 1962.