

Алгоритъм за управление на отоплителни уредби използвани в наземния градски електрически транспорт

Георги Димитров

Algorithm for management of heating systems used in ground urban electric transport: The report presents a variant of an algorithm for automated management of electric heating systems with natural and forced air convection, used in trams and trolleybuses operated in the country. The algorithm was developed in accordance with the requirements for maintaining thermal comfort of passengers according to specialized standard BDS EN 14750. It is adapted to the climatic conditions in the country and the characteristics of the rolling stock. The results are presented in tabular and graphic form.

Key words: Urban electric transport, Electric heating systems, Algorithm for management of heating systems.

ВЪВЕДЕНИЕ

Общественият градски транспорт и в частност електрическият такъв, играе съществена роля за градската мобилност на населението в големите градове.

През последните две години по данни от Националния статистически институт /НСИ/ [4] се наблюдава трайна тенденция към намаляване броя на пътуванията с градски електрически транспорт /ГЕТ/. Малките превозни разстояния (около 2,3÷2,5 km) както и цените на единичните пътувания с наземен градски електрически транспорт, пренасочиха голяма част от населението в дееспособна възраст да използва за придвижване личните си автомобили.

За привличане на повече пътници в обществения градски транспорт е необходимо той да осигурява бързина и удобство на придвижване, както и съответен комфорт на пътуване, който най-често се олицетворява с осигуряване на съответни физиологични параметри на топлинен комфорт.

В доклада е представен вариант на алгоритъм за автоматизирано управление на електронагревателни отоплителни уредби, използвани в трамвайните мотриси и част от тролейбусите, експлоатирани у нас. При разработването му са взети под внимание изискванията за поддържане на топлинен комфорт на пътниците съгласно изискванията на специализирания стандарт БДС EN 14750-1:2006 [1], като същият е адаптиран към климатичните условия у нас и особеностите на топлинните процеси в подвижния състав на ГЕТ. В разработения алгоритъм е направен опит да се обхванат всички основни фактори, оказващи влияние върху колебанията на вътрешната температура в реални експлоатационни условия. Чрез него може да се извършва динамично (оперативно) регулиране на топлинната мощност, въз основа на реално измервани и усреднени стойности на външната околна температура и температура на въздуха в зоните (салоните) за пътници в трамвайните мотриси и тролейбусите. Предвиден е и режим на ускорено затопляне преди излизане на линия, както и в случай на продължителен престой с отворени врати.

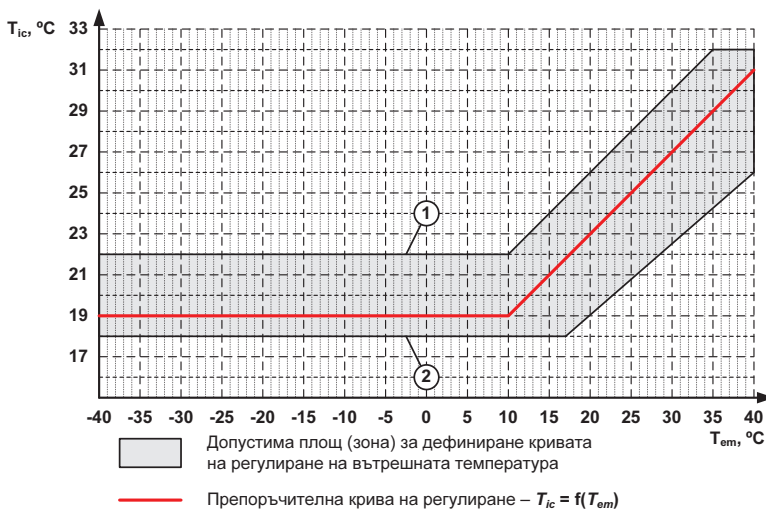
1. СЪЩНОСТ НА ПРОБЛЕМА, ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ И ЗАВИСИМОСТИ

В градовете с електрически градски транспорт у нас се експлоатират повече от 30 модификации подвижен състав – тролейбуси и трамвайни мотриси. Само в град София в редовна експлоатация са 18 модификации. При по-голямата част от тях за отопление се използват електрически отоплителни тела с естествена и принудителна циркулация на въздуха през тях – конвектори и калорифери.

Осигуряването на топлинен комфорт на пътниците през зимата е свързано разбира се и с допълнителен разход на електрическа енергия. Проведени изследвания в тази насока [3] показват, че през характерните за страната зимни месеци (декември, януари и февруари) неговият дял е около 40-45% от общата електрическа енергия за тягови нужди. Именно това изисква те да бъдат

управлявани ефективно, с минимално влияние на субективни фактори. Към настоящия момент в електрическите транспортни средства /ЕТС/ се използват масово релейни температурни регулатори със значителен хистерезис.

На фиг. 1 е показана препоръчителната крива на регулиране, осигуряваща необходимия комфорт на пътниците в обществения градски транспорт [1].



Фиг. 1. Допустима зона за дефиниране кривата на регулиране на температурата в зоната за пътници, съгласно БДС EN 14750-1:2006

T_{ic} – зададена средна стойност на вътрешната температура, °C; T_{em} – средна стойност на външната температура, °C; 1 – горна гранична крива на зоната за регулиране; 2 – долна гранична крива на зоната за регулиране.

Поддържането на определен температурен режим в дадено отопляемо пространство е свързано с покриване на топлинните загуби през ограждащите го повърхнини.

- Топлинни загуби от топлопреминаване през външните непрозрачни ограждащи елементи (стени, таван и под).
- Топлинни загуби от топлопреминаване през прозорци и остъклени врати.
- Топлинни загуби от инфилтрация на външен въздух през врати, прозорци и fugи, както и приток на външен въздух от вентилационни системи.

За да може даден алгоритъм за управление да изпълнява успешно своите функции, съвместно със специализирана електронна система за контрол и управление на отоплителните системи, е необходимо да се познаят в детайли параметрите на конструкцията на граничещите с външен въздух повърхнини (странични и челни стени, под, таван, прозорци и врати), както и топлофизичните характеристики на материалите, от които те са изградени.

Основен параметър, чрез който се оценява способността на подвижния състав да съхранява топлина в зоната за пътници, е общият коефициент на топлопреминаване (според [1] общ коефициент за пренос на топлина) k , $W/m^2.K$, между транспортното средство и външната околна среда, който се дефинира с формулата [2]:

$$k = \frac{P_h}{T_{im} - T_{em}}, \quad (1)$$

където:

P_h е топлинната мощност отдавана вътре в транспортното средство, W;

T_{im} – средна стойност на вътрешната температура на въздуха в транспортното средство, °C;

T_{em} – средна стойност на външната температура на въздуха около транспортното средство, °C.

С използването на формула (1) може по експериментален път, чрез провеждане на серия измервания при различни стойности на външната температура T_{em} и температурни разлики ($T_{im} - T_{em}$), да се определи обобщеният коефициент на топлопреминаване k . Ако същият е известен, чрез нея може да се изчисли необходимата топлинна мощност при дадена температурна разлика между външния и вътрешния въздух.

В литературата [5] са известни и аналитични методи за определяне на топлинните характеристики, както и на потребната електрическа мощност за отопление, приложими и при електрическите транспортни средства. Всички те изискват обаче да бъдат известни в детайли конструкциите на подвижния състав и термодинамичните характеристики на отоплителните тела.

Общият коефициент на топлопреминаване на i -тия подвижен състав може да се изчисли по формулата:

$$k_i = \frac{\sum_{k=1}^n (U_k \cdot A_k)_i + H_{v_i}}{A_{e_i}}, \quad (2)$$

където:

U_k е коефициентът на топлопреминаване през k -тата ограждаща повърхнина в ЕТС, W/m².K;

A_k – площ на k -тата ограждаща повърхнина в ЕТС, m²;

H_{v_i} – коефициент за пренос на топлина с инфилтрирания в ЕТС външен въздух, W/K;

A_{e_i} – обща площ на ограждащите повърхнини граничещи с външен въздух, m².

Във формула (2) чрез H_{v_i} се отчита и преносът на топлина чрез навлизане на външен въздух при циклично отваряне и затваряне на вратите за качване и слизане на пътници.

През последните години тече процес на обновяване на парка на градския електрически транспорт, който се извършва основно чрез внос на рециклирани (заводски обновени) транспортни средства, в чиято техническа документация често не са предоставени подробни данни за конструкциите на каросериите и кошовите им. Затова в съвременната практика за определяне на загубите най-често се прибегва до провеждане на експериментални измервания в реални или тестови условия, въз основа на които се определя и обобщеният коефициент на топлопреминаване (коефициента на пренос на топлина) k_i .

За определяне на необходимата топлинна мощност е удачно да се използва изчислителен израз в относителни единици. Така относителната мощност p_{h_i} , W/m² необходима за покриване на топлинните загуби на i -тата група електрически подвижен състав на ГЕТ, с обобщен коефициент на топлопреминаване k_i , може да се изчисли по формулата:

$$p_{h_i} = k_i \cdot (T_{im} - T_{em}). \quad (3)$$

Съгласно изискванията на стандарт БДС EN 14750-1:2006 [1], за климатичните условия в Република България, стойността на коефициента k за градски транспортни средства трябва да има стойност **3,0 W/m².K**. С използване на формула

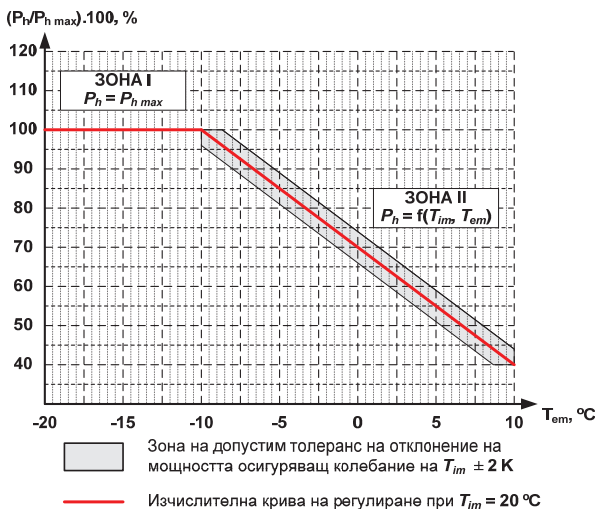
(3) са изчислени стойностите на относителната мощност при различни стойности на k и средната външна температура T_{em} . Резултатите са показани в таблица 1.

Таблица 1

Изчислителни стойности за необходимата относителна топлинна мощност p_h за покриване на общите топлинни загуби през 1 m^2 външна оградаща площ

Стойности на k	Относителна топлинна мощност $p_h, \text{ W/m}^2$ при различни стойности на средната външна температура $T_{em}, \text{ }^\circ\text{C}$						
	-20 $^\circ\text{C}$	-15 $^\circ\text{C}$	-10 $^\circ\text{C}$	-5 $^\circ\text{C}$	0	+5 $^\circ\text{C}$	+10 $^\circ\text{C}$
3,0	117,0	102,0	87,0	72,0	57,0	42,0	27,0
3,5	136,5	119,0	101,5	84,0	66,5	49,0	31,5
4,0	156,0	136,0	116,0	96,0	76,0	56,0	36,0
4,5	175,5	153,0	130,5	108,0	85,5	63,0	40,5
5,0	195,0	170,0	145,0	120,0	95,0	70,0	45,0

Посочените в таблица 1 резултати, показват че за стандартен соло тролейбус (дължина 12 m) с $k = 3,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ и обща площ на външните оградащи повърхнини $A_e = 132 \text{ m}^2$, за отопляването му са необходими около 16 kW. Новодоставените тролейбуси **Škoda Solaris 26Tr** и **27Tr** и трамвайни мотриси **PESA Swing 122NaSF**, са конструирани в съответствие с изискванията на стандарта [1] и осигуряват необходимия комфорт. Не такова е положението с преобладаващата част от подвижния състав на ГЕТ експлоатиран у нас. Проведено изследване през периода януари-март 2014 г. върху някои стари модификации трамвайни мотриси и тролейбуси, експлоатирани в гр. София, показва че обобщеният коефициент на топлопреминаване k варира в широки граници – от $3,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ до около $4,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (при най-старите и амортизирани транспортни средства). Така за двойносъчленена трамвайна мотриса тип Т8М-700М с $k = 3,35$ и обща площ на външните оградащи повърхнини A_e около 240 m^2 с реално инсталираната в нея мощност за отопление от 9 kW (3 калорифера по 3 kW) [6], и с отчитане на отдадената от пътниците топлина съгласно [1] при 50% запълване, средната температура на вътрешния въздух при екстремно ниски външни температури ($T_{em} < -10 \text{ }^\circ\text{C}$) едва ще достигне $1 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.



Фиг. 2. Характеристика на регулиране на топлинната мощност, изразена в относителни единици, % от

$P_{h \max}$

С цел да се избегне излишно преоразмеряване на отоплителните системи в градските електрически транспортни средства, се допуска при екстремно ниски външни температури, поддържане на вътрешна температура по-ниска от комфортната, която обаче не трябва да бъде по-ниска от +10 °C [2, 7]. На фиг. 2 е показана характеристиката на регулиране на топлинната мощност с отчитане на посочената възможност.

Поради съществуващото голямо разнообразие от модификации на градски електрически транспортни средства, които в общия случай се различават по габаритни размери, топлоизолационни характеристики на ограждащите повърхнини, тип и мощност на отоплителните системи, разработеният алгоритъм има универсален характер.

3. СТРУКТУРА И ОСНОВНИ СЪТЪПКИ НА АЛГОРИТЪМА

За реализиране на автоматизирано управление на отоплителните системи в градските електрически транспортни средства с помощта на разработения алгоритъм, е необходимо да са известни основни технически параметри, свързани с процеса. Минимално необходимите изходни данни са: обобщен коефициент на топлопреминаване k , W/m².K (стойността му се установява по експериментален или изчислителен път); обща площ на ограждащите повърхнини, граничещи с външен въздух A_e , m²; максималната мощност на отоплителните тела в зоната $P_{h\ max}$, W.

На фиг. 3 е показана блокова схема на основния алгоритъм за управление на отоплението. Той е логически разделен на две части – първата представлява предварителното инициализиране на системата и изчисляване средните стойности на външната и вътрешната температури, а втората му част представлява логиката на регулиране мощността на отоплителните системи.

Основните стъпки на алгоритъма, описани по номерата на блоковете в схемата, са следните:

Блок 1. Прочитане на данни за базовите параметри на ЕТС – k , A_e и $P_{h\ max}$.

Блок 2. Прочитане на информация за избраният режим – $R = 0$ „форсирано отопление“; $R = 1$ „режим на регулиране“.

Блокове 3, 4 и 5. В тях се извършва измерване и проверка на текущата стойност на външната температура T_{ext} , като при стойност над +12 °C се подава команда за изключване на отоплението или при по-ниска – се стартира цикъл за измерване и изчисляване на средните стойности на външната T_{em} и вътрешната T_{im} температури на въздуха.

Блокове 6÷9. Тези блокове формират цикъла за измерване и изчисляване на средните стойности на външната и вътрешна температури. Интеграционният период от 10 s със стъпка от 1 s е съобразен със спецификата на топлинните процеси.

Блокове 10÷14. В тези пет блока се извършат множество проверки на средните стойности на външната и вътрешната температури на въздуха. Според стойностите им съотношения между тях се избира преход към съответна изчислителна функция.

Блок 15. В този блок се избира режим на максимална мощност и се прави преход към блок 19 за формиране на управляващ сигнал към силовия регулатор.

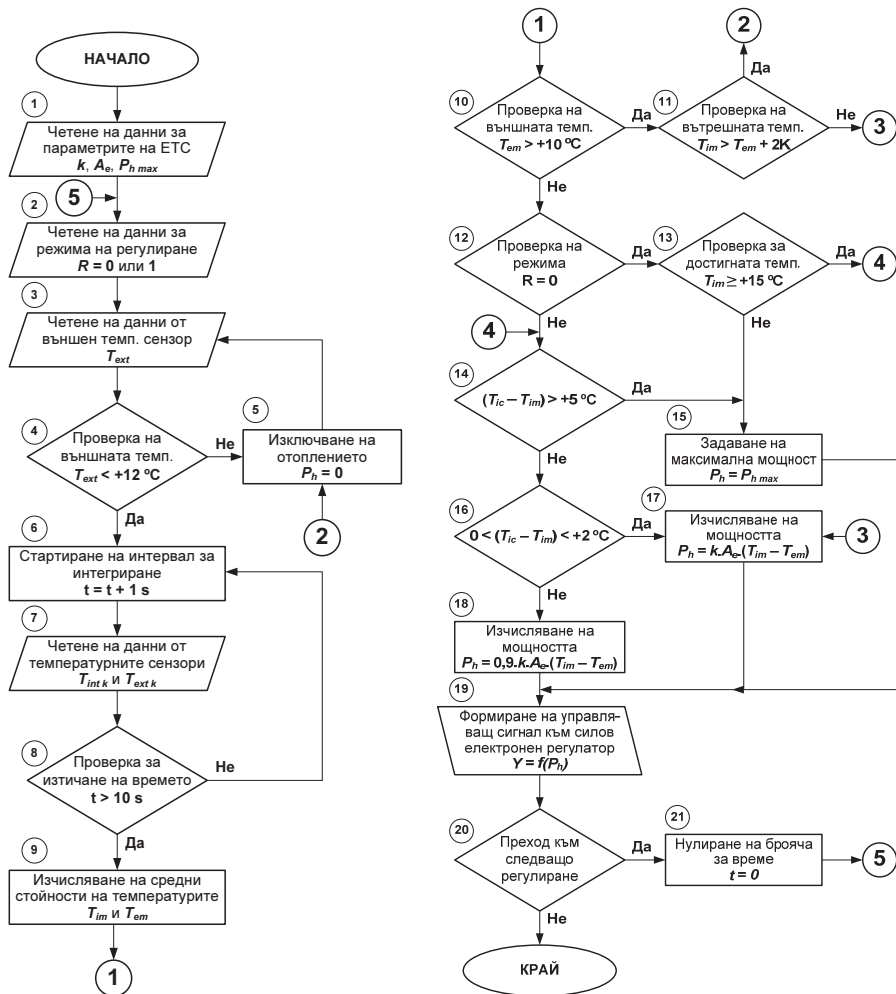
Блокове 16, 17 и 18. Изчисляване на мощността при малка разлика ($T_{ic} - T_{im}$).

Блок 19. Той служи за формиране на управляващ сигнал от микропроцесора към електронния блок за управление на силовия регулатор.

Блокове 20 и 21. Чрез тях се указва преход към следващо измерване и регулиране, при който се нулира броячът (таймерът), указващ времето на интеграционния период и изчислителният цикъл се рестартира от блок 2.

Представеният алгоритъм е разработен за програмиране на специализиран микропроцесорен контролер за управление на конвенционални електронагревателни

отоплителни системи в стари модификации подвижен състав на ГЕТ. На база изчислените стойности за необходимата електрическа мощност P_h , микропроцесорната система за управление формира управляващ сигнал $Y = f(P_h)$, който се подава към електронния регулатор на мощността на отоплителните тела.



Фиг. 3. Опростена блокова схема на алгоритъм за управление на електрически отоплителни системи в трамвайни мотриси и тролейбуси.

Прецизността на регулиране с използване на посоченият алгоритъм зависи както от точността на използваните температурни сензори (препоръчват се такива с вградени електронни преобразуватели на първичния сигнал), така и от техния брой и правилното им геометрично разположение в транспортните средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеният в настоящата работа алгоритъм позволява да се постигнат следните по-значими ефекти:

- Автоматично регулиране на топлинния поток (топлинната мощност) в зависимост от текущите средни стойности на външната и вътрешната температури, вкл. с отчитане на емитираната от пътниците топлина и топлинните печалби от слънчево греене.
- Осигуряване на режим „форсирано отопление” при подготовка на транспортното средство за излизане на линия, както и при понижаване на вътрешната температура с повече от $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ от зададената.
- Автоматично изключване на отоплението при $T_{em} > +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{im} > T_{em} + 2\text{K}$.

Към настоящия момент е трудно да се прогнозира енергийният ефект от прилагане на системата за автоматично регулиране, тъй като осигуряването на топлинен комфорт на пътниците е свързано с определени енергийни потребности за компенсирани на топлинните загуби. Ако при експериментирание на системата за регулиране в реални експлоатационни условия се установи необосновано висок разход на енергия за отопление спрямо превозната работа, може да се търсят други възможности за оптимизиране алгоритъма за управление, напр. преминаване към режим „ограничено отопление – $T_{ic} = (12\div 15\text{ }^{\circ}\text{C})$ ” при запълване на транспортните средства под 10% от превозния им капацитет.

В заключение може да се отбележи, че предлаганият алгоритъм е приложим при всички стари модификации електрически транспортни средства на ГЕТ. За успешното му използване в практиката е необходимо да се установят реалните стойности на обобщения коефициент на топлопреминаване k за даден подвижен състав, чрез провеждане на необходимите експериментални измервания при различни температури (външни и вътрешни). Наред с това е необходимо да бъдат актуализирани мощностите за отопление (в повечето случаи увеличени) с цел осигуряване на необходимата комфортна вътрешна температура от $T_{im} = +19\text{ }^{\circ}\text{C}$ при средна температура на външния въздух диапазона $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{em} \leq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Представените в настоящата работа аналитични и графични зависимости, както и изчислителни резултати могат да се използват за определяне на необходимите мощности за отопление при извършване модернизация (реновиране) на съществуващия парк, а също така и при производството на нови трамвайни мотриси в специализирания за целта завод „Трамкар” ЕАД - София.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 14750-1:2006, Български институт по стандартизация, 2006 г.
- [2] БДС EN 14750-2:2006, Български институт по стандартизация, 2006 г.
- [3] Димитров Г., А. Христова, Анализ на тяговото електропотребление на градския електрически транспорт в гр. София и насоки за оптимизирането му, Научни трудове на Русенски университет – 2012, том 51, серия 3.1, стр. 75-81.
- [4] Национален статистически институт, Данни за превозени товари и пътници и извършена работа по тримесечия през периода 2012-2014 г., <http://www.nsi.bg/bg>
- [5] Стамов С. и кол., Справочник по отопление, вентилация и климатизация – I част, Техника, София, 1990 г.
- [6] Технически и енергетични данни за електрическите транспортните средства в експлоатация в гр. София, „Столичен електротранспорт” ЕАД, 2012 г.
- [7] Haller G., Thermal Comfort in Rail Vehicles Main Features and Experiences, RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH – Vienna, Professional article September 2006.

За контакти: Ас. инж. Георги Димитров, катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане на транспорта”, Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”, тел.: 02 9709 374, GSM: 087 8898788, e-mail: dimitrov_gd@mail.bg

Докладът е рецензиран.