



ТРАЙНО ПРЕГРЯВАНЕ НА ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЛОКОМОТИВИ СЕРИЯ 61

Тодор Йонов
todyon@tu-sofia.bg

*ТУ “София”, ЕФ, кат. ЕЕЕ,
бул. Кл. Охридски №8, София 1000,
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: тягов двигател, нагряване, топлинни изчисления, локомотив серия 61

Резюме: Настоящата статия има за цел да провери дали методика, използвана за изчисление на температурата на тяговия двигател за електрически локомотив серии 43, 44, 45 е приложима за определяне на температурата при тягови двигатели на други серии локомотиви, по конкретно за локомотиви серия 61.

1. Въведение

Настоящата статия има за цел да провери дали методиката за изчисление на температурата на тяговия двигател за електрически локомотив серии 43, 44, 45 използвана в [1] е приложима за определяне на температурата при тягови двигатели на други серии локомотиви. Задачите, които се поставят е да се намери трайното прегряване на основните части на тяговите двигатели – котва, допълнителни и главни полюси, да се определи най-нагрявата част и да се види какъв е температурния резерв по прегряване при номинален дебит на охлаждане. В локомотивите серия 61 охлаждането се осъществява в автоматичен режим в зависимост от тока на котвата. Предвиден е и ръчен режим на охлаждане. То се използва при необходимост от охлаждане с пълен дебит, независимо от тока на тяговите двигатели /топло време и движение по дълги наклонени участъци/. Тяговият двигател тип ТЕ 009 е постояннооток с независимо възбуждане, четири полюсен с независима вентилация. Изолацията е клас “F” Номиналните данни на двигателя са дадени в табл. 1 [4].

2. Загуби в тяговия двигател

За определяне на прегряването е необходимо да се знаят загубите на мощност. Те се определят за произволно избрани стойности на тока (0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2).I_н. Загубите в електрическите машини се делят на четири основни групи - механични ΔP_m , електрически ΔP_{Cu} , магнитни (загуби в стоманата) ΔP_{st} и допълнителни ΔP_g [2].

Таблица 1

параметър	Данни
Тип	TE009
Мощност	240kW
Ток	740A
Напрежение	360V
Възбуждане, ном. ток	Независимо, 150A
Ном. вентилация	Независима, 60 м ³ .мин ⁻¹
Клас изолация	„F”
Макс. Обороти	1700
Маса	2600кг
Макс.ток	1200A

2.1. Механичните загуби.

Механичните загуби се определят като сума от механичните загуби в четките, вентилационните загуби и загубите от триене в лагерите

$$(1) \quad \Delta P_m = \Delta P_c + \Delta P_v + \Delta P_t ,$$

където ΔP_c - механичните загуби в четките, W;

ΔP_v - вентилационните загуби, W;

ΔP_t - загубите от триене в лагерите, W.

С достатъчна точност тези загуби се определят като процент от общата мощност на тяговия двигател

$$(2) \quad \Delta P_m = 0.002.U_n.I_n .$$

Където U_n и I_n са номиналните напрежение и ток на ТД.

2.2. Електрически загуби.

Електрическите загуби на мощност се определят за всички намотки на двигателя и за четките

$$(3) \quad \Delta P_{ec} = I_N^2 . k_t . r_N ,$$

където I_N - токът, преминаващ през съответната намотка, A.

r_N - съпротивлението на съответната намотка, Ω

k_t - температурният коефициент на промяна на съпротивлението при повишаване на температурата на намотката. С достатъчна точност $k_t = 1,145$ [1,2].

Електрическите загуби в намотките на двигателя се определят от уравнение (2.3), като се замества със стойностите на тока на съответната намотка и съответното съпротивление.

2.3. Магнитни загуби.

Магнитните загуби са сложна функция на качествата на магнитния материал, на геометричната форма на ламелите, технологичната им обработка и др. За определянето им се препоръчва уравнението:

$$(4) \Delta P_{st} = 2,3 . p_{1.0/50} . \left(\frac{f}{50} \right)^\beta . (B_z^2 . m_z + B_j^2 . m_j)$$

където B - магнитната индукция, T;

$p_{1.0/50}$ - специфичните загуби на стоманата, при честота $f = 50\text{Hz}$;

β - коефициентът, отчитащ конструктивните особености на двигателя, обикновено се дава таблично;

m - масата на магнитния материал, kg.

Индексите z и j означават съответно зъби и ярем. Масата на магнитния материал се определя от размерите и специфичното тегло на материала.

2.4. Допълнителни загуби.

Допълнителните загуби в ТД се получават поради пулсиращият магнитен поток. [1,2] За компенсирани двигатели се препоръчва зависимостта

$$(5) \Delta P_g = 0.005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}, W$$

Пълните загуби в двигателя се получават, като сума от всички загуби

$$(6) \Delta P = \Delta P_{\Sigma e} + \Delta P_{st} + \Delta P_m + \Delta P_g$$

Където $\Delta P_{\Sigma e}$ са сумарните електрически загуби на различните намотки на машината (котва - ΔP_{ae} , главен и допълнителен полюс съответно - ΔP_{be} и ΔP_{de}).

Част от загубите се отвеждат от корпуса на двигателя - ΔP_k :

$$(7) \Delta P_k = \Delta P - 0.3 \cdot (\Delta P_{be} + \Delta P_{de})$$

Резултатите от изчисленията на загубите са дадени в табл. 2.

Таблица 2. Загуби в тяговия двигател

I	ΔP_a	ΔP_{dop}	ΔP_{meh}	ΔP_d	ΔP_b	ΔP_{magn}	ΔP_{suma}	ΔP_{korp}
A	W	W	W	W	W	W	W	W
148	335	144	106	527	2250	6298	9661	8943
296	1340	578	213	527	2250	6298	11207	10358
444	3016	1301	319	527	2250	6298	13712	12647
592	5362	2313	426	527	2250	6298	17176	15807
740	8378	3614	532	527	2250	6298	21600	19841
888	12064	5204	639	527	2250	6298	26983	24747

3. Трайно прегряване на двигателя

Използва се теорията за наслагването [1,2], съгласно която установеното прегряване τ , се представя като сума от прегряванията на отделните части. Най-общо то е пропорционално на загубите и обратнопропорционално на площта и коефициента на топлоотдаване:

$$(8) \tau = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S},$$

Зависимостите за определяне на температурата на различните части на тяговия двигател са съгласно [1,2]. Специфичният коефициент на топлоотдаване α , се определя във функция на честотата на въртене на ТД и неговите габарити, начина на охлаждане, скоростта на въздуха v_v , пропорционален на дебита Q и др.

$$(9) v_v = \frac{Q}{s}$$

3.1. Прегряване на въздуха вътре в машината

Прегряването на различните намотки на ТД е непосредствено свързано с това какво е прегряването на въздуха вътре в машината τ_v . То се определя при променливи ток на котвата и дебит на въздуха, от зависимостите

$$(10) \tau_v = \frac{\Delta P_v}{s_v \cdot \alpha_v}$$

$$(11) \Delta P_v = \Delta P - 0.1 \cdot \Delta P_{\Sigma e}$$

където ΔP_v са загубите отведени от охлаждащия вътрешността на двигателя въздух, W;

Коефициентът α_v се определя от:

$$(12) \alpha_v = \alpha_0 \cdot (1 + k_v \cdot \sqrt{v_v})$$

където α_0 е специфичният коефициент на топлоотдаване при свободна конвекция, дава се графично или таблично в посочената литература;

k_v и β – коефициентите отчитащи ефективността на охлаждането. За различните машини и вид на охлаждането те са различни.

v_v – скоростта на охлаждащият въздух.

При принудителна вентилация дебитът остава постоянен независимо от тока на двигателя. Затруднение има и при определяне на температурата на охлаждащият въздух. В зависимост от сезона тя се изменя в голям диапазон от -35 до 45°C . Това затруднение може да се избегне, като вместо с температурата се работи с прегряване.

Прегряването на въздуха в машината влияе върху температурата на различните части на двигателя и затова резултатите от изчисленията са дадени заедно с резултатите за съответните части.

3.2. Трайно прегряване на котвата

Прегряването на котвата, се определя от следното уравнение

$$(13) \quad \tau_{a\infty} = (\tau_{ap} + \tau_{ip}) \cdot \frac{2I_{\delta}}{\bar{l}_a} + (\tau_{ac} + \tau_{ic}) \cdot \left(1 - \frac{2I_c}{\bar{l}_a}\right) + \tau_v$$

където τ_{ap} е прегряването на повърхнината на магнитопровода на котвата над температурата на въздуха вътре в машината, $^{\circ}\text{C}$;

τ_{ip} - прегряването на каналната изолация, $^{\circ}\text{C}$;

τ_{ac} - прегряването на челните съединения, $^{\circ}\text{C}$;

l_{δ} - общата дължина на бандажа на котвата, m;

\bar{l}_a - средната дължина на котвата, m;

l_c - дължината на челните съединения, m;

τ_{ic} - прегряването на изолацията на челните съединения, $^{\circ}\text{C}$;

Прегряването на повърхността на магнитопровода на котвата се определя от зависимостта

$$(14) \quad \tau_{ap} = \frac{\Delta P_{ae} \cdot \left(\frac{2I_{\delta}}{\bar{l}_a}\right) + \Delta P_{st}}{s_a \cdot \alpha_a} ,$$

В (14) [2] се препоръчват следните стойности на параметрите - $k_v = 0,8$ и $\beta = 1$. Скоростта на охлаждащият въздух v_v се определя от зависимостта (10), като в нея се заместват данните за котвата и на дебита на въздуха за ТД. Прегряването на челните съединения се определя от същата зависимост, като се заместват съответните размери.

Прегряването изолацията се определя от уравнението

$$(15) \quad \tau_{ip} = \frac{\Delta P_{ae} \cdot \left(\frac{2I_{\delta}}{\bar{l}_a}\right) \cdot b_i}{s_k \cdot \lambda_e} ,$$

където b_i е дебелината на каналната изолация, m;

S_k - площта на каналната изолация, m^2 ;

λ_e - еквивалентния коефициент на топлопроводност на изолацията.

Прегряването на изолацията на челните части на котвената намотка, се намира по зависимостта (15), като вместо s_k се замести с площта на челните съединения s_c . Трайното прегряване на котвената намотка, се определя от зависимостите (13)-(15) за

различни дебити на охлаждащият въздух. Трайното прегряване на котвата се определя при промяна на дебита и тока. Резултатите са дадени в табл. 3.

Таблица 3. Прегряване на котвата при дебит 100%

I	τ_v °C	τ_{ap} °C	τ_{aiz} °C	τ_{chiz} °C	τ_{ch} °C	τ_{suma} °C
A						
148	7,38	9,66	0,06	0,09	0,70	15,32
296	8,48	11,27	0,24	0,36	2,79	18,32
444	10,27	13,94	0,54	0,82	6,28	23,27
592	12,73	17,68	0,95	1,45	11,16	30,16
740	15,87	22,49	1,49	2,27	17,44	38,99
888	19,68	28,37	2,14	3,27	25,12	49,77

3.3. Трайно прегряване на главен полюс

Средното прегряване на възбудителната намотка се определя от зависимостта

$$(16) \quad \tau_b = \tau_{bp} + \tau_{bi} + \tau_v ,$$

където τ_{bp} е прегряването на полюса, °C;

τ_{bn} - прегряването на намотката, °C.

Прегряването на външната повърхност на възбудителната намотка се определя от зависимостта

$$(17) \quad \tau_{bn} = \frac{\Delta P_{be}}{s_b \cdot \alpha_b} .$$

Охлаждащата повърхност на възбудителната намотка се определя съгласно

$$(18) \quad s_b = 2 \cdot p \cdot [2 \cdot (l_j + b_j + 0.6) + 2 \cdot P \cdot b_k] \cdot h_b ,$$

където p е броят полюси на ТД;

l_j - дължината на полюсното ядро, m;

b_j - ширината на полюсното ядро, m;

p - средният периметър, m;

b_k - ширината на бобината, m;

h_b - височината на бобината, m.

Обобщеният коефициент на топлоотдаване се определя от уравнение (12), като параметрите k_v и β са съответно 0,1 и 1, а коефициентът $\alpha_0 = 13.3$, W/(m².K). Допуска се, че охлаждащият, се разделя на две части, като едната преминава през пространството между полюсите, другата - през въздушната междина между полюса и котвата, като количеството въздух се разпределя пропорционално според тяхната площ.

Резултатите за прегряването на намотката на главния полюс са дадени в таблица 4. Прегряването на полюсния крайник на главния полюс се определя от

$$(19) \quad \tau_{bp} = \frac{0.7 \cdot \Delta P_{eb} \cdot \left[1 + k_p^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot l_p}{l} \right) \right]}{s_p \cdot \alpha_p + s_b \cdot \alpha_b} ,$$

където s_p е охлаждащата повърхност на полюса, m²;

s_b - охлаждащата повърхност на намотката на главния полюс, m²;

α_p - коефициентът на топлоотдаване на полюса, W/(K.m²);

l_p - дължината на полюсното ядро, m;

l - средната дължина на една навивка на възбудителната намотка, m;

k_p - коефициентът отчитащ пулсациите на магнитния поток.

α_b - коефициентът на топлопредаване на намотката на главния полюс, W/(K.m²).

Резултатите от изчисленията за главен полюс са дадени в табл. 4.

Таблица 4. Прегряване главен полюс, дебит 100%

I	I _b	τ_v °C	τ_{bn} °C	τ_{bp} °C	τ_{sumb} °C
148	150	7,38	27,26	16,88	51,54
296	150	8,48	27,26	16,88	52,64
444	150	10,27	27,26	16,88	54,42
592	150	12,73	27,26	16,88	56,88
740	150	15,87	27,26	16,88	60,02
888	150	19,68	27,26	16,88	63,84

3.4. Трайно прегряване на допълнителен полюс

Прегряването на допълнителните полюси се определя от зависимостите за главните полюси. Резултатите от изчисленията за главен полюс са дадени в табл. 5

Таблица 5. Прегряване допълнителен полюс, дебит 100%

I	τ_v °C	τ_{bn} °C	τ_{bp} °C	τ_{sumb} °C
148	7,38	1,97	1,09	10,44
296	8,48	7,87	4,34	20,69
444	10,27	17,70	9,77	37,74
592	12,73	31,47	17,36	61,56
740	15,87	49,18	27,13	92,17
888	19,68	70,82	39,07	129,57

4. Изводи

1. Най-нагрятата част на таговете двигатели на локомотивите серия 61, според изчисленията е допълнителният полюс. Неговото получено максимално изчислително прегряване за номинален ток /92°C/ е съществено по-високо от това на котвата /39°C/ и главните полюси /60°C/. Подобни са и данните получени за прегряването на локомотиви серии 43, 44 и 45 по изчислителен [1] и експериментален път [5].

2. Затова, че допълнителните полюси са нагreti най-много си има и физикално обяснение: материала за магнитопровода на последните е с по-ниски качества от тези на котвата и главните полюси [4].

3. Прегряване 92°C и температура на околната среда примерно 38°C, означава сумарна температура на най-нагрятата част на полюса 130°C. Тази температура е с 25°C, по ниска от допустимата за клас F температура 155 °C.

4. При ток по-голям от номиналния е получена приблизителна стойност на прегряване 130°C. Това означава, че при температура на околната среда повече от 25°C и движение на локомотива с ток по-голям от номиналния, ще се получи температура, над допустимата за класа на изолация. Това е възможно за установената температура. Обикновено тя се достига след 3-4 пъти времеконстантата. При двигатели с размери и мощност, както ТЕ 009 времеконстантата е минимум 12 - 15 минути или установената температура се достига след около 48 - 60 минути. Такива токове има ри пусков режим или преминаване в дълги наклонени участъци. В случая времето е достатъчно голямо локомотива да премине от режима за движение с голям в такъв с по-малък ток.

5. От получените резултати се вижда, че при номинален ток полученото максимално прегряване на ограничаващата по температура част – допълнителните

полюси – е много близка по стойност до допустимата температура за класа на изолация. Това означава, че методиката за теоретично определяне на температурата, използвана в [1] за определяне на температурата на тягови двигатели за локомотивите серии 43, 44, 45 е приложима и за тяговите двигатели на локомотивите от серия 61.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Йонов Т.И., Подобряване на енергийните показатели на електрически локомотиви, чрез намаляване на разхода за собствени нужди, дисертационна работа за присъждане на научна и образователна степен “доктор”, защитена 08.06.2010 год.

[2] Копилов И., Проектиране на електрически машини, Техника, София, 1988 г., 532 стр.

[3] Спасов В., Охлаждане и топлообмен в електрическите машини, Техника, София, 1980 г., 156 стр.

[4] Техническа документация на локомотив 61 серия.

[5] Стайков Г., Е. Боршуков, Работни режими на електрически локомотиви в условията на БДЖ, Ж.п. Транспорт, 1973/12, стр. 16-21

[6] Находкин М. Проектирование тяговых электрических машин, Транспорт 1976 г., 624стр.

REGENERATIVE BRAKING IN A SOFIA METRO

Todor Yonov

todyon@tu-sofia.bg

*TU “Sofia”, Department of EEE, №8, Kl. Ohridsky street
BULGARIA*

Key words: *a metro, convalescence, suppressors, regenerative braking*

Abstract: *The analysis on the enclosure is done in the article, stopping at way of regenerative braking in Sofia metro. It is being analyzed, why is this way be with very small dispatch now despite the opportunities of the things for the 81-740/741 type streetcar to end by the return of energy in the net. The recommendations on such application arrest are made.*