

ВПЛИВ ДОПУСКІВ НА КОМУТАЦІЮ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСАХ

У статті показано залежність ступеня іскріння тягового двигуна від практичної реалізації допусків на геометричні параметри магнітного кола додаткових полюсів при перехідних режимах під час відриву струмоприймача від контактної мережі та подальшого відновлення живлення.

В статье показана зависимость степени искрения тягового двигателя от практической реализации допусков на геометрические параметры магнитной цепи дополнительных полюсов при переходных режимах во время отрыва токоприемника от контактной сети и дальнейшего восстановления питания.

Dependence of the traction engine sparking degree on practical realization of tolerances on geometric parameters of the magnetic circuit of additional poles under transition modes during the trolley take-off from contact mains and further recovering the feeding is shown in the article.

На відміну від нормальних електричних машин тягові двигуни за умовами комутаційних процесів на колекторі перебувають у більш тяжких умовах. До них відносяться: значні перевантаження по струму, значне підвищення напруги в порівнянні з номінальною, суттєве підвищення частоти обертання понад номінальну, поштовхи напруги живлення та ін.

Вказані фактори створюють тяжкі умови для комутації тягових двигунів, особливо для електровозів постійного струму, номінальна напруга на колекторі яких 1500 В.

Одним з найважчих перехідних процесів є процес у колі тягових двигунів під час короткочасного відриву струмоприймача від контактної мережі і подальшого відновлення напруги живлення. Під час відновлення контакту спостерігається різке збільшення струму, що може негативно впливати на якість комутації. У зв'язку з суттєвою швидкістю зміни струму помітно виявляється вплив індуктивності обмоток, нелінійність магнітних характеристик і, особ-

ливо, вихрових струмів i_{aux} та i_{auxd} у магнітопроводах головних та додаткових полюсів відповідно. При цьому зміна магнітного потоку в магнітопроводах двигуна значно відстає за часом від зміни струму, що приводить до недокомпенсації реактивної електрорухомої сили e_p , яка прямо пропорційна струму, компенсаційною електрорухомою силою e_k , яка залежить від значення магнітного потоку в зоні комутації. В результаті цього погіршуються умови комутації.

Наша мета – дослідити вплив допусків на геометричні параметри магнітного кола додаткових полюсів при вказаному перехідному процесі.

Фізичні процеси, які відбуваються у колі тягових двигунів під час вказаного перехідного процесу, можна описати наступною системою диференціальних рівнянь, з урахуванням зміни магнітних потоків як головних, так і додаткових полюсів [1]:

$$\left. \begin{aligned} ir + L \frac{di}{dt} + \frac{pN}{60a} \Phi n + 2pw \frac{d\Phi}{dt} &= u; \\ -wi + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) + 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} &= \Phi_{ko}R_{mk} - F_{ko}; \\ -wi + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) + 5,29R_{m1}(\Phi - \Phi_1) + 0,477g_{\mu} \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} &= \Phi_{ko}R_{mk} - F_{ko}; \\ -w_d i + \Phi_{\kappa}(R_{mdk} - R_{md1}) + 1,23R_{md1}\Phi_{\kappa 1} + g_{\mu d} \frac{d\Phi_{\kappa 1}}{dt} &= \Phi_{\kappa ko}R_{mdk} - F_{\kappa ko}; \\ -w_d i + \Phi_{\kappa}(R_{mdk} - R_{md1}) + 5,29R_{md1}(\Phi_{\kappa} - \Phi_{\kappa 1}) + 0,477g_{\mu d} \frac{d(\Phi_{\kappa} - \Phi_{\kappa 1})}{dt} &= \Phi_{\kappa ko}R_{mdk} - F_{\kappa ko} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де i – струм двигуна; L – індуктивність розсіювання двигуна; n – число обертів двигуна; u – напруга мережі; w – число витків котушки головних полюсів (ГП); w_d – число витків обмотки додаткових полюсів (ДП); $2p$ – число полюсів; a – число пар паралельних гілок якоря; N – число провідників обмотки якоря; r – опір кола двигуна; Φ , Φ_1 – магнітний потік головних полюсів і його основна гармоніка, відповідно; Φ_k , Φ_{k1} – магнітний потік додаткових полюсів і його основна гармоніка, відповідно; $(\Phi - \Phi_1)$, $(\Phi_k - \Phi_{k1})$ – сумарний магнітний потік вищих гармонік головних та додаткових полюсів, відповідно; g_μ – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП; $g_{\mu d}$ – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП; R_{m1} , R_{mk} – магнітні опори першої та k -ї ділянки магнітної характеристики ГП; R_{md1} , R_{mdk} – магнітні опори першої та k -ї ділянки магнітної характеристики ДП; F_{ko} – частина МРС k -ї ділянки магнітної характеристики ДП, що створює Φ_k .

З допомогою математичної моделі (1) проведено дослідження перехідних процесів у колі тягових двигунів СТК-730 електровозу ДЕ-1. Необхідні обчислення під час дослідження проведені за допомогою чисельного метода Рунге-Кутта-Фелберга [6]. При цьому вважаємо, що електричне коло під час відриву струмоприймача повністю розривається (відсутня електрична дуга між контактною мережею та пантографом). Тоді струм при відновленні контакту буде починатись з нуля і збільшуватись до максимального значення, тобто з точки зору комутації маємо найбільш тяжкий варіант.

Відповідні залежності $i = f(t)$, $\Phi = f(t)$, $i_{\text{вихд}} = f(t)$ і $\Phi_k = f(t)$ під час перехідного процесу у випадку відновлення напруги на двигуні у розмірі 1500 В показані відповідно на рис. 1, 2, 3 та 4.

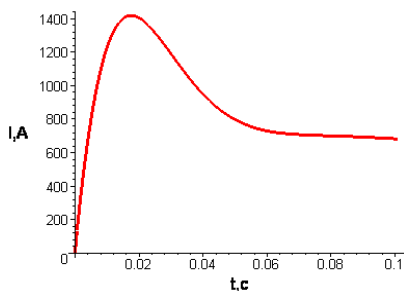


Рис. 1

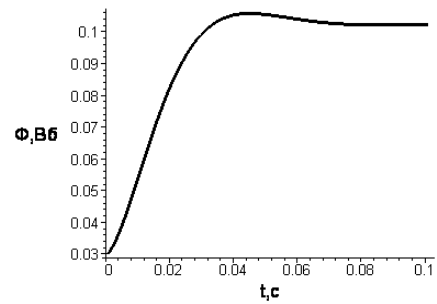


Рис. 2

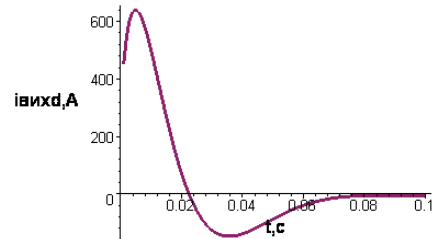


Рис. 3

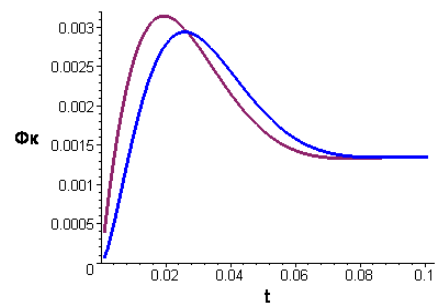


Рис. 4

Маючи криві зміни струму, основного та комутаційного магнітних потоків, визначимо вплив допусків на якість комутації при даному перехідному процесі в різні моменти часу.

Приділимо увагу лише електромагнітним причинам, які викликають іскріння в результаті розриву збільшеного додаткового поперечного струму комутації i_d в порівнянні з варіантом, коли здійснюється надійний контакт між струмоприймачем та контактною мережею.

Для оцінки впливу i_d на процес комутації використовуємо критерій А. Б. Іоффе у вигляді фактора іскріння Φ_1 [2]

$$\Phi_1 = \left(\frac{0,4}{D_k} \right)^{1,5} \frac{L_c \cdot i_d^2 \cdot v_k}{2t_k \cdot L_{щ}}, \quad (2)$$

де D_k – діаметр колектора; $L_{щ}$ – довжина щіток одного щіткотримача; v_k – окружна швидкість колектора; t_k – колекторний розподіл.

Для вирішення поставленої задачі про вплив допусків на якість (ступінь іскріння) комутації застосуємо поняття математичного очікування та дисперсії функції k -мірних незалежних випадкових величин. Залежність Φ_i від величин, які стоять в правій частині рівняння, можна розглядати як функцію k -мірних незалежних випадкових величин, яка сама буде також випадковою величиною.

Лінійна швидкість v_k знаходиться як:

$$v_k = \pi D_k n, \quad (3)$$

де n – частота обертів якоря.

Позначимо

$$\frac{L_c}{t_k \cdot L_{щ}} = C. \quad (4)$$

Підставивши вирази (3) та (4) у формулу визначення Φ_i , отримуємо:

$$\Phi_i = \frac{40^{1.5} i_d^2 \cdot C \cdot \pi \cdot n}{2\sqrt{D_k}}. \quad (5)$$

Розглядаємо режим, коли $n \approx const$ і $D_k = const$. Із формули (5) видно, що при вказаних умовах $\Phi_i = f(i_d)$. Тобто, фактор іскріння, у нашому випадку, буде залежати тільки від змін величини i_d .

Відомо, що небалансова ЕРС Δe представляє собою залишкову величину після взаємодії реактивної e_p та комутаційної e_k ЕРС. Оскільки ми розглядаємо перехідний процес, то на значення Δe також має вплив трансформаторна ЕРС e_t , яка направлена в одну сторону з e_k .

$$e_t = w \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

З урахуванням кривої $\Phi = f(t)$, наведеної на рис. 2, графік $e_t = f(t)$ показаний на рис. 5.

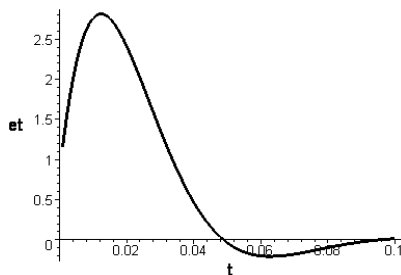


Рис. 5

З урахуванням e_t формула для i_d запишеться:

$$i_d = \frac{\beta(e_p - e_k - e_t) + \kappa_p e_p}{R_{щ} + \beta r_c}, \quad (7)$$

де β – коефіцієнт, який враховує властивості якірних обмоток двигуна (для петльової обмотки $\beta = 1$); e_p – реактивна ЕРС; e_k – комутаційна ЕРС; κ_p – коефіцієнт, що враховує некомпенсовану частину реактивної ЕРС; $R_{щ}$ – опір контакту щітка-колектор для кола короткозамкнутої секції; r_c – опір секції, яка комутує.

Вважаємо, що вплив допусків на значення $R_{щ}$ незначний. $R_{щ}$ визначається формулою:

$$R_{щ} = \frac{\Delta U}{I_{щ}} \cdot \gamma, \quad (8)$$

де ΔU – спад напруги у двох перехідних шарах контакту «щітка-колектор» і визначається по вольт-амперній характеристиці щітки, В [3];

$I_{щ}$ – струм одного щіткотримача,

γ – щіточне перекриття.

Значення L_c обчислюємо за формулою [5]:

$$L_c = 2\lambda \cdot l_a \cdot w_c^2 \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

де λ – магнітна провідність потоку розсіювання; l_a – довжина пакета заліза якоря, м; w_c – число витків у секції.

Значення e_k визначається за формулою:

$$e_k = B_k \cdot 2l_a \cdot \omega_c \cdot v_a, \quad (10)$$

де B_k – індукція в зоні комутації;

v_a – лінійна швидкість обертання якоря.

Згідно формули (10), комутаційна ЕРС є функцією: $e_k = f(B_k, l_a, v_a)$. Оскільки ми розглядаємо режим, коли $v_a \approx const$ ($\sigma_{v_a} = 0$), а σ_{l_a} складає десятки долі відсотка, тобто $\sigma_{l_a} \approx 0$, то відповідно з формулою про дисперсію функції k -мірних незалежних випадкових величин можна у першому наближенні записати, що відхилення комутаційної ЕРС відносно номінального значення σ_{e_k} дорівнює:

$$\sigma_{e_k} = \left(\frac{\partial e_k}{\partial B_k} \right) \sigma_{B_k}. \quad (11)$$

У відносних одиницях формула (11) запишеться як:

$$\sigma_{e_{\kappa}^*} = \left(\frac{2l_a \cdot \omega_c \cdot \nu_a}{2B_{\kappa} \cdot l_a \cdot \omega_c \cdot \nu_a} \right) \sigma_{B_{\kappa}} = \sigma_{B_{\kappa}^*} \quad (12)$$

Формула для знаходження B_{κ} має вигляд [5]:

$$B_{\kappa} = \frac{\Phi_{\kappa}}{l_a \cdot b_{3\kappa}}, \quad (13)$$

де Φ_{κ} , $b_{3\kappa}$ – магнітний потік зони комутації та ширина зони комутації, відповідно.

Відхилення магнітної індукції зони комутації від номінальної величини $\sigma_{B_{\kappa}}$ дорівнює:

$$\sigma_{B_{\kappa}} = \sqrt{\left(\frac{\partial B_{\kappa}}{\partial \Phi_{\kappa}} \right)^2 \sigma_{\Phi_{\kappa}}^2 + \left(\frac{\partial B_{\kappa}}{\partial b_{3\kappa}} \right)^2 \sigma_{b_{3\kappa}}^2 + \left(\frac{\partial B_{\kappa}}{\partial l_a} \right)^2 \sigma_{l_a}^2} \quad (14)$$

Дослідження показують, що вплив допусків для параметрів $b_{3\kappa}$ і l_a , які впливають на значення $\sigma_{B_{\kappa}}$, є незначним. Тому формула (14) у нашому випадку має вигляд:

$$\sigma_{B_{\kappa}} = \left(\frac{\partial B_{\kappa}}{\partial \Phi_{\kappa}} \right) \sigma_{\Phi_{\kappa}} \quad (15)$$

У відносних одиницях формула (15) запишеться як:

$$\sigma_{B_{\kappa}^*} = \left(\frac{l_a \cdot b_{3\kappa}}{l_a \cdot b_{3\kappa} \cdot \Phi_{\kappa}} \right) \sigma_{\Phi_{\kappa}} = \sigma_{\Phi_{\kappa}^*} \quad (16)$$

де $\sigma_{\Phi_{\kappa}^*} = \frac{\sigma_{\Phi_{\kappa}}}{\Phi_{\kappa}}$.

Магнітний потік Φ_{κ} визначається за формулою:

$$\Phi_{\kappa} = \frac{0,4\pi \cdot w \cdot I}{\sum_1^n \frac{l_i}{\mu_i S_i}}, \quad (17)$$

де $w \cdot I$ – ампер-витки, що необхідні для створення магнітного потоку заданої величини;

l_i , μ_i , $S_i = a_i \cdot b_i$ – довжина середньої магнітної лінії, магнітна проникність, площа поперечного перерізу i -ої ланки магнітного кола додаткового полюса, відповідно.

Відхилення магнітного потоку $\sigma_{\Phi_{\kappa}}$ при відхиленні параметрів магнітного кола додаткових полюсів запишеться [4]:

$$\sigma_{\Phi_{\kappa}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial l_i} \right)^2 \sum_1^n \sigma_{l_i}^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial b_i} \right)^2 \sum_1^n \sigma_{b_i}^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial a_i} \right)^2 \sum_1^n \sigma_{a_i}^2 + \left(\frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \mu_i} \right)^2 \sum_1^n \sigma_{\mu_i}^2} \quad (18)$$

Дослідження та аналіз літературних джерел показують, що відхилення σ_{b_i} , σ_{a_i} , σ_{μ_i} малі в порівнянні з σ_{l_i} і ними можна знехтувати. Тоді $\sigma_{\Phi_{\kappa}}$ дорівнює:

$$\sigma_{\Phi_{\kappa}} = \left(\frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial l_i} \right) \sum_1^n \sigma_{l_i} \quad (19)$$

У відносних одиницях вираз (19) має вигляд:

$$\sigma_{\Phi_{\kappa}^*} = \sum_1^n \sigma_{l_i^*}, \quad (20)$$

де $\sigma_{l_i^*} = \frac{\sigma_{l_i}}{l_i}$.

В загальному випадку $\sum_1^n l_i$ складається із:

ярма якоря, зубців якоря, зазору між якорем та осердям ДП («перший зазор»), осердя ДП, зазор між осердям ДП та остовом («другий зазор») та ярма остова.

Магнітне коло ДП, як правило, ненасичене. При номінальному режимі нехтуємо падінням МРС на дільницях осердя ДП F_{md} , ярма остова F_{jd} , ярма якоря F_{ad} та зубців якоря F_{zd} із-за їхнього малого значення.

Спад МРС на ділянках повітряних зазорів пропорційна їх магнітним опорам. Відносна частина магнітного опору дільниць повітряних зазорів ДП a_i дорівнює:

$$a_i = \frac{(w \cdot I)_i}{\sum_1^n (w \cdot I)_i} = \frac{F_i}{\sum_1^n F_i} \quad (21)$$

де F_i – МРС i -ої дільниці, n – кількість дільниць магнітного кола ДП.

Оскільки МРС F_{κ} , що необхідна для проведення магнітного потоку ДП по магнітному колу, визначається як:

$$F_{\kappa} = F_{\delta d} + F_{\delta j} + F_{md} + F_{jd} + F_{ad} + F_{zd}, \quad (22)$$

де $F_{\delta d}$, $F_{\delta j}$ - спад магнітної напруги в «першому» повітряному зазорі, спад магнітної напруги в «другому» повітряному зазорі, відповідно.

МРС додаткового полюса F_d дорівнює:

$$F_d = F_{aq} - F_{ko} + F_k, \quad (23)$$

де F_{aq} , F_{ko} - МРС якоря в зоні комутації, МРС компенсаційної обмотки, відповідно.

Згідно (21), відносна частина $a_{\delta d}$ магнітного опору дільниці «першого» повітряного зазору під ДП:

$$a_{\delta d} = \frac{F_{\delta d}}{F_d - F_{aq} + F_{ko}} = \frac{F_{\delta d}}{F_{\delta d} + F_{\delta j}}. \quad (24)$$

Відповідно до «другого» повітряного зазору під ДП відносна частина $a_{\delta j}$ магнітного опору:

$$a_{\delta j} = \frac{F_{\delta j}}{F_d - F_{aq} + F_{ko}} = \frac{F_{\delta j}}{F_{\delta d} + F_{\delta j}}. \quad (25)$$

Спади МРС на усіх дільницях, крім повітряного зазору, мають невеликі значення. За цієї умови у відповідності з формулою про дисперсію функції k -мірних незалежних випадкових величин можна у першому наближенні записати відносне відхилення магнітного потоку $\sigma_{\Phi_k^*}$ у зоні комутації у вигляді:

$$\sigma_{\Phi_k^*} = \sqrt{a_{\delta d}^2 \sigma_{\delta d}^2 + a_{\delta j}^2 \sigma_{\delta j}^2}, \quad (26)$$

де $\sigma_{\delta d}$, $\sigma_{\delta j}$ - відносні відхилення значень «першого» та «другого» повітряних зазорів, відповідно.

Тоді магнітний потік Φ_k у зоні комутації з урахуванням можливих відхилень значень зазорів дорівнює:

$$\Phi_k = \bar{\Phi}_k \pm \Phi_k \cdot \sigma_{\Phi_k^*}. \quad (27)$$

Таким чином, маючи відхилення магнітного потоку в зоні комутації, ми можемо визначити e_k , i_d і, як наслідок, Φ_1 та ступінь іскріння з урахуванням відхилень розмірів ділянок магнітного кола додаткових полюсів при різних значеннях відновленої напруги U на тяговому двигуні під час перехідного процесу.

З урахуванням вищенаведеного пропонується наступна методика визначення залежності $\Phi_1 = f(U)$: для конкретного моменту часу визначаємо значення струму i , магнітного потоку Φ_k (рис. 4) без врахування вихрових струмів

($i_{вихд} = 0$), магнітного потоку Φ_k з врахуванням вихрових струмів та значення трансформаторної ЕРС e_t . Знаючи вищенаведені значення величин, визначається i_d , Φ_1 і, як наслідок, ступінь іскріння для конкретного часу перехідного процесу з урахуванням допусків.

У відповідності з наведеною методикою отримані залежності (рис. 6, рис. 7) фактору іскріння Φ_1 від напруги на колекторі при різних значеннях струму та при різних значеннях результуючих допусків магнітного кола ДП (від $-2,5$ мм до $+2,5$ мм відносно номінального результуючого значення повітряних зазорів у колі ДП).

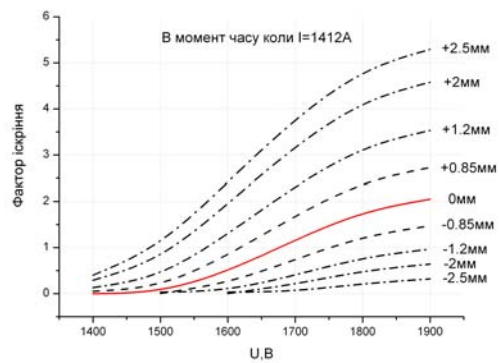


Рис. 6

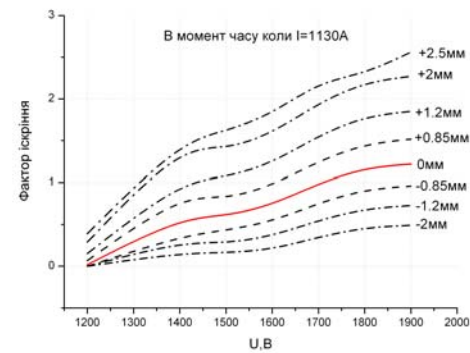


Рис. 7

Відповідно до креслень сумарні граничні допуски на елементи магнітного кола ДП складають $\pm 0,85$ мм. З метою оцінки якості комутації при зміні вказаних допусків у межах, більших, ніж $\pm 0,85$ мм проведені дослідження також при граничних допусках $\pm 2,5$ мм.

При необхідності визначення ступені іскріння користуємось залежністю ступені іскріння від фактору іскріння Φ_1 , наведеною у [2]. При цьому з метою більш точного визначення

ступені іскріння в балах шкала балів вказана детальніше (рис. 8).

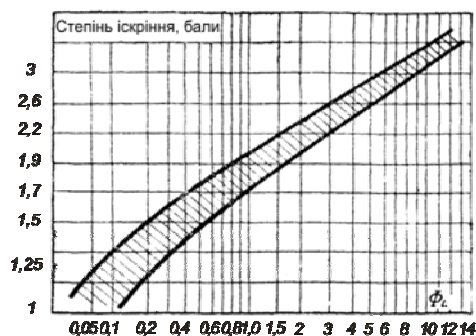


Рис. 8

На рис. 9 показані залежності фактора іскріння від значень відхилення результуючого зазору від його номінальної величини.

Із розгляду кривих рис. 9 видно, що інтенсивність зміни фактора іскріння, тобто зміна фактора на зміну зазору 0,1 мм, є різною у досліджуваному інтервалі змін відхилень зазору.

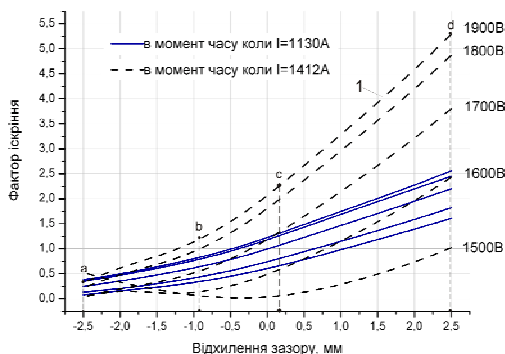


Рис. 9

Наприклад, крива 1 має три ділянки з однаковою інтенсивністю зміни фактору іскріння (a-b, b-c, c-d). Якщо технологічно виготовити машину, яка буде відповідати ділянці a-b, то можна стверджувати, що комутація при перехідному режимі буде кращою порівняно з випадком, коли машина виготовлена точно за номінальними розмірами (ділянка b-c). Якщо машина буде виготовлена з параметрами, які відповідають ділянці c-d, то комутація буде гіршою.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.
2. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 232 с.
3. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
4. Исаев И. П. Допуски на характеристики электрических локомотивов. – М.: Транспорт, 1958. – 369 с.
5. Находкин М. Д. Проектирование тяговых электрических машин: Учеб. пос. для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов; Под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
6. Васильев А. Н. Maple 8: Самоучитель. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 352 с.

Надійшла до редколегії 26.05.2008.