

ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ НА ЯКІСТЬ КОМУТАЦІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ОСЛАБЛЕНОГО ПОЛЯ

У статті показано залежність ступеню іскріння тягового двигуна від практичної реалізації відхилень в геометричних параметрах магнітного кола додаткових полюсів при перехідному процесі, що пов'язаний з втраченою живлення з наступним його відновленням під час ослабленого поля.

В статье показана зависимость степени искрения тягового двигателя от практической реализации отклонений геометрических параметров магнитной цепи дополнительных полюсов при переходном процессе, который связан с потерей питания и последующем его восстановлением во время ослабленного поля.

In the paper the dependence of tractive engine sparking degree on practical realization of deviations of geometric parameters of additional poles magnetic circuit under transient process related to the loss of feed and its further restoration during the weakened field is demonstrated.

Відомо, що під дією вихрових струмів, які виникають у магнітопроводі тягових двигунів (ТД) під час перехідних процесів, зростання магнітного потоку сповільнюється відносно зростання струму. Це приводить до появи кидка струму у силовому колі двигуна.

У випадку ослабленого збудження значення максимуму перехідного струму суттєво збільшується. Це приводить до погіршення якості комутації.

Із існуючих експлуатаційних перехідних електричних процесів найбільш важким, з точки зору комутації, є процес, який викликається відривом струмоприймача від контактної провладу з наступним відновленням контакту при ослабленому збудженні двигунів. Крім того,

перерва живлення з різних причин може настати через короткочасне вимкнення напруги безпосередньо на підстанції.

Для ТД питання про їх комутацію при всякого роду перехідних режимах за різних умов має істотне значення, оскільки в умовах експлуатації стійкість двигуна стосовно комутації іноді визначає його працездатність [3, 4].

Наша мета – дослідити вплив відхилень геометричних параметрів магнітного кола додаткових полюсів на якість комутації під час вказаного перехідного процесу з урахуванням ослабленого збудження для двигунів електровозів постійного струму ДЕ1 (рис. 1).

Для цього дослідження пропонується наступна математична модель [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(\frac{pN}{60a} \Phi n + ir + L \frac{di}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt} + 2pw \frac{d\Phi}{dt} + i_3 r_3 \right) \cdot n_{\text{двиг}} = u; \\
 & (i - i_3) \frac{r_{\text{ш}}}{n_{\text{двиг}}} + \frac{L_{\text{ш}}}{n_{\text{двиг}}} \frac{di}{dt} (i - i_3) - i_3 r_3 - 2pw \frac{d\Phi}{dt} - L_3 \frac{di_3}{dt} = 0; \\
 & 1,23R_{m1} \Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi (R_{mk} - R_{m1}) = w_1 i_3 + \Phi_{ko} R_{mk} - F_{ko}; \\
 & 5,29R_{m1} (\Phi - \Phi_1) + 0,477g_{\mu} \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} + \Phi (R_{mk} - R_{m1}) = w_1 i_3 + \Phi_{ko} R_{mk} - F_{ko}; \\
 & 1,23R_{md1} \Phi_{k1} + g_{\mu d} \frac{d\Phi_{k1}}{dt} + \Phi_{\kappa} (R_{mdk} - R_{md1}) = w_d i_3 + \Phi_{\kappa ko} R_{mdk} - F_{dko}; \\
 & 5,29R_{md1} (\Phi_{\kappa} - \Phi_{k1}) + 0,477g_{\mu d} \frac{d(\Phi_{\kappa} - \Phi_{k1})}{dt} + \Phi_{\kappa} (R_{mdk} - R_{md1}) = w_d i_3 + \Phi_{\kappa ko} R_{mdk} - F_{dko}; \\
 & L_3 = 2p(1 - \sigma)w \frac{d\Phi}{di_3}; \quad L = \frac{4l_{\text{я}} \lambda_n w_{\text{я}}^2}{Z} + 2\sigma_d p w_d \frac{d\Phi_{\kappa}}{di} + \frac{2w_{\text{ко}}^2 l_n \lambda_{\text{ко}}}{pZ_{\text{ко}}},
 \end{aligned} \right\} (1)$$

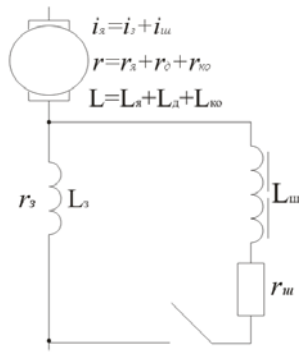


Рис 1. Схема ввімкнення двигуна при ослабленому полі

де i , r – струм та опір кола якоря двигуна відповідно; i_3 , r_3 – струм та опір обмотки збудження відповідно; L – індуктивність якоря, котушок додаткових полюсів та компенсаційної обмотки; L_3 – індуктивність розсіювання котушок головних полюсів; $r_{ш}$, $L_{ш}$ – опір та індуктивність обмотки шунтування; n – число обертів двигуна; u – напруга мережі; w , w_d , $w_{ко}$ – кількість витків котушки головних полюсів, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки відповідно; $w_я$ – приведена кількість витків якоря; $2p$ – число полюсів; a – число пар паралельних гілок якоря; N – число провідників обмотки якоря; $n_{двиг}$ – кількість послідовно з'єднаних двигунів у одній гілці схеми, що розглядається; 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 апроксимованої магнітної характеристики ГП; F_{ko} – частина МРС k -ї ділянки магнітної характеристики ГП, що створює Φ ; R_{md1} , R_{mdk} – магнітні опори першої та k -ї ділянки апроксимованої магнітної характеристики ДП; F_{dko} – частина МРС k -ї ділянки магнітної характеристики ДП, що створює Φ_k ; σ , σ_d – коефіцієнт розсіювання ГП та ДП відповідно; λ_n , $\lambda_{ко}$ – коефіцієнт магнітної провідності паза якоря та компенсаційної обмотки.

Індуктивність шунта в ненасиченому стані $L_{шном} = 0,016$ Гн, в насиченому стані $L_{шнас} = 0,0045$ Гн [10], $L \approx 0,0015$ Гн, $r = 0,067$ Ом, $r_3 = 0,0252$ Ом, $r_{ш} = 0,025$ Ом, $u = 3000$ В, $\Phi = 0,069$ Вб.

За допомогою математичної моделі (1) проведено дослідження перехідних процесів у колі тягових двигунів ЕД-141 електровозу ДЕ1, що пов'язані з перервою та подальшим відновленням живлення двигуна у розмірі 1500 В при максимальному ослабленні збудження $\beta = 43\%$, $I = 565$ А, $n = 1260$ об/хв. При цьому вважаємо, що електричне коло під час відриву струмоприймача повністю розривається. Необхідні обчислення при цьому можливо виконати за допомогою чисельного метода Рунге-Кутта-Фелберга [6].

На Смілянському електромеханічному заводі були проведені заміри фактичних розмірів елементів магнітного кола ДП наступних типів двигунів: ЕД-141 (СТК-730), СТК-520, НБ-511. За допомогою критерію погодженості К. Пірсона [7] доведено, що фактичний розподіл розмірів елементів магнітного кола ДП відповідають нормальному закону. Відповідні гістограми для двигуна ЕД-141 показані на рисунках:

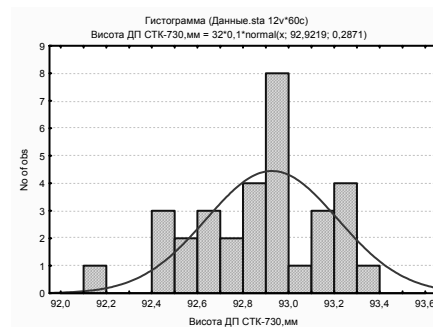


Рис 2. Гістограма висоти ДП

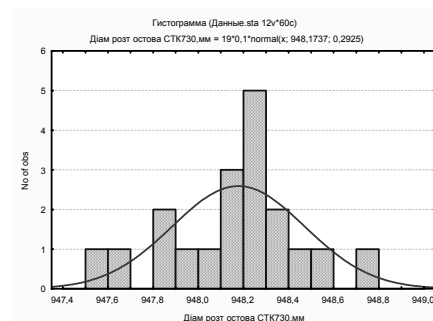


Рис 3. Гістограма діаметра розточки остова

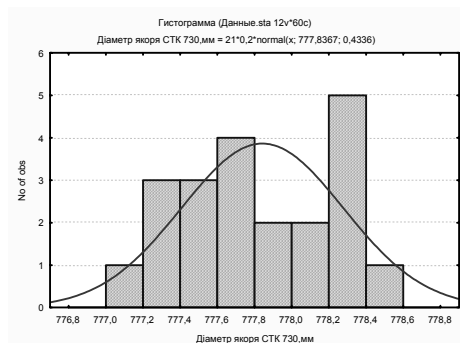


Рис. 4. Гістограма діаметра якоря

Розглянемо електромагнітні причини, які викликають підсилення іскріння під час досліджуваного перехідного процесу з урахуванням впливу відхилень геометричних розмірів елементів магнітного кола ДП в результаті збільшення додаткового поперечного струму комутації i_d порівняно з усталеним режимом.

Для оцінки впливу i_d на процес комутації використовуємо критерій А. Б. Іофе у вигляді фактора іскріння Φ_i [5]

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

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

У двигуна ЕД-141 $D_k = 630$ мм, $L_c = 2,144 \cdot 10^{-6}$ Гн, $L_{щ} = 64$ мм, $v_k = 27,7$ м/с, $t_k = 4,02$ мм.

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

$$e_t = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

З урахуванням трансформаторної ЕРС e_t формула для визначення i_d запишеться:

$$i_d = \frac{\beta(e_p - e_k - e_t) + \kappa_p e_p}{R_{щ} + \beta r_c}, \quad (4)$$

де β – коефіцієнт, який враховує властивості якорних обмоток двигуна (для петльової обмотки $\beta = 1$); e_p – реактивна ЕРС; e_k – комутацій-

на 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.

У ЕД-141 $\kappa_p = 0,18$ [5], $r_c = 2,75 \cdot 10^{-3}$ Ом. В момент часу, коли струм якоря досягає максимуму, $R_{щ} = 0,033$ Ом, $e_p = 13,617$ В, $e_t = 3,4$ В, $e_k = 10,02$ В.

На основі гістограм рис. 2 – 4, використовуючи методи розрахунків розмірних кіл та теорію імовірності, визначені максимальне та мінімальне значення повітряного зазору між осердям ДП та осердям якоря (замикаюча ланка розмірного кола), а також імовірнісне значення цього зазору з урахуванням довірчих інтервалів [8]. Для двигуна ЕД-141 вказані зазори наведені в табл. 1:

Таблиця 1

Значення повітряного зазору між осердям ДП та осердям якоря

Метод розрахунку розмірного кола	Номинальний розмір зазору магнітного кола ДП, мм	Значення повітряного зазору, мм	
		У меншу сторону	У більшу сторону
Метод максимума-мінімуму	5,75	-1,1	+3,2
Імовірнісний метод		-1,325	+1,925

Криві $i = f(t)$, $i_3 = f(t)$, $i_{щ} = f(t)$, $L_3 = f(t)$ та $\Phi_k = f(t)$ для двигуна ЕД-141 при паралельному з'єднанні двигунів, визначені за допомогою математичної моделі (1), показані на рис. 5 – 9:

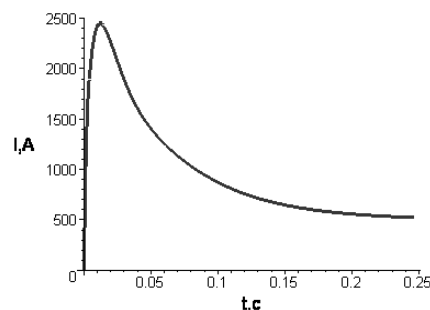


Рис. 5. Графік зміни струму в обмотці якоря

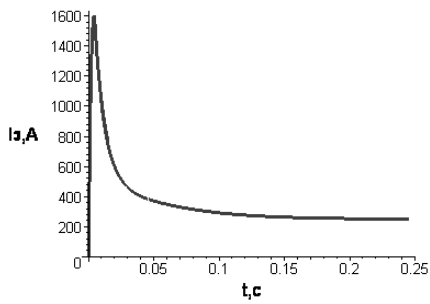


Рис. 6. Графік зміни струму в обмотці збудження

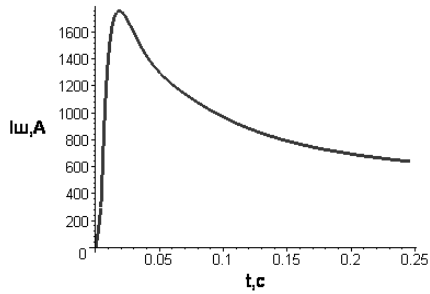


Рис. 7. Графік зміни струму в обмотці шунтування

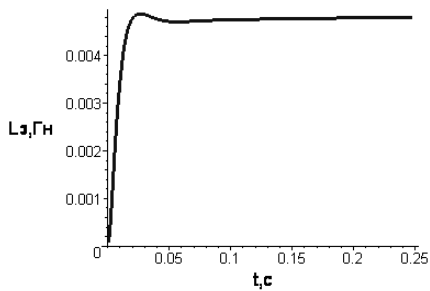


Рис. 8. Графік зміни індуктивності обмотки збудження

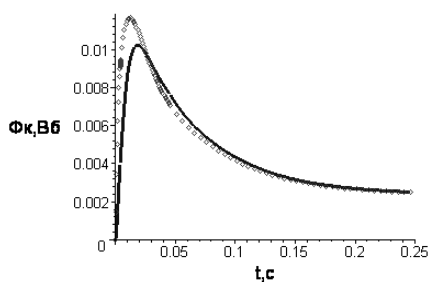


Рис. 9. Графік зміни магнітного потоку в зоні комутації

На рисунку залежності $\Phi_k = f(t)$ пунктиром зображена крива, яка відповідає випадку, коли магнітний потік ДП Φ_k змінюється у повній відповідності до зміни струму кола якоря. Суцільна крива відповідає реальним умовам протікання перехідного процесу.

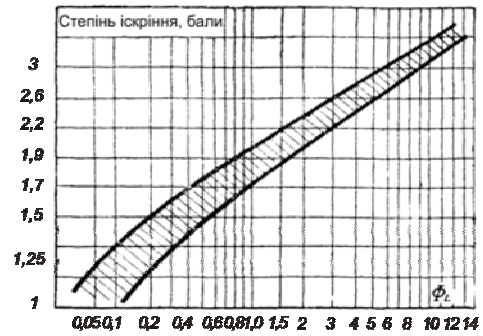


Рис. 10. Залежність ступеня іскріння від фактору іскріння

За методикою, наведеною в [9], визначаємо i_d для конкретного часу протікання перехідного процесу за різних значень зазору в межах відхилень, що розглядаються. Потім за допомогою формули (4) визначаємо фактор іскріння за формулою (2). Знаючи фактор іскріння, користуючись залежністю ступеня іскріння від фактору іскріння (рис. 10) [5], будемо криві залежності ступеня іскріння від фактичного значення зазору.

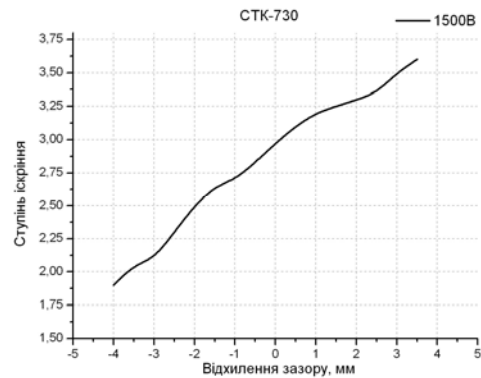


Рис. 11. Графік залежності ступеня іскріння від відхилення загального зазору магнітного кола ДП

Із рисунка видно, що при номінальних значеннях загального повітряного зазору (коли відхилення відсутні) кола ДП ступінь іскріння може досягти 2,95 бала, що може викликати значне іскріння на колекторі. При збільшенні відхилення загального зазору, в порівнянні з номінальним розміром, до 3,2 мм (табл. 1) ступінь іскріння може досягнути 3,48 бала.

Ступінь іскріння, у даному процесі, може бути значно зменшена при мінусових відхиленнях загального зазору порівняно з номінальним значенням. При відхиленні мінус 1,1 мм (табл. 1) ступінь іскріння зменшується до 2,7 бала. Але при цьому треба враховувати, що зменшення зазору можна робити з урахуванням забезпечення нормальної комутації при номінальному режимі роботи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока [Текст] / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.
2. Проектирование тяговых электрических машин [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
3. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст] / В. М. Безрученко. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – 252 с.
4. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых двигателей [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / под ред. А. С. Курбасова, В. И. Седова, Л. Н. Сорина. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
5. Иоффе, А. Б. Тяговые электрические машины [Текст] / А. Б. Иоффе. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 232 с.
6. Васильев, А. Н. Maple 8 [Текст] : самоучитель / А. Н. Васильев. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 352 с.
7. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
8. Шаповалов, А. В. Статистична оцінка впливу відхилень розмірів елементів магнітного кола додаткових полюсів електровозних тягових двигунів на їх ступінь іскріння [Текст] / А. В. Шаповалов // Наук.-техн. зб. НГУ. – Д., 2009. – Вип. 81. – Гірнична електромеханіка та автоматика.
9. Дубинець, Л. В. Вплив допусків на комутацію тягових двигунів при перехідних процесах [Текст] / Л. В. Дубинець, А. В. Шаповалов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 63.
10. Магистральные электровозы. Электрические аппараты, полупроводниковые преобразователи, системы управления [Текст] / под ред. В. И. Бочарова, Б. А. Тушканова. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.

Надійшла до редколегії 23.03.2009.