

УДК 656.259.9: 625.161.1

Т. М. СЕРДЮК – к. т. н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

А. Л. ЄВДОКИМЕНКО – начальник технічного відділу НВО «Трансавтоматика», Дніпро, Україна, a8a8@ua.fm

ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОШЛАГБАУМІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

Постановка проблеми

При перетинанні залізниці автомобільними дорогами впроваджуються такі автоматичні пристрої: автоматична світлофорна переїзна сигналізація, автоматичні шлагбаумами або автоматична сповіщувальна переїзна сигналізація з неавтоматичними шлагбаумами.

Переїзні світлофори управляються впливом рухомого складу на рейкові кола, які влаштовуються на коліях перед переїздами. Заборонний сигнал при підході поїзда до переїзду в момент вступу поїзда на рейкове коло подається червоними вогнями двох ліхтарів (головок) переїзного світлофора, які поперемінно спалахують і гаснуть з частотою 40...45 мигань за хвилину. Одночасно зі світловим сигналом подається звуковий сигнал.

Автоматичні шлагбауми доповнюють автоматичну світлофорну переїзної сигналізації на переїздах. Автошлагбаумів в закритому стані припиняють в'їзд транспортних засобів на переїзд, перекриваючи загороджувальним брусом половину або всю проїжджу частину дороги. Автошлагбаум нормально відкритий і при наближенні поїзда спочатку подає заборонний сигнал, а потім після закінчення 7...8 с (час подачі сигналів світлофорам) брус шлагбаума починає повільно опускатися протягом 10 с. Цей час необхідний для звільнення транспортним засобом місця для заняття брусом шлагбаума горизонтального положення [1, 2].

На залізницях України знайшли застосування шлагбауми автоматичні

26065У.00.00, які випускалися до 1986 р. й мають вагу 511 кг; АШ-06 вагою 260 кг, ПАШ-1 – 220 кг. В них застосовуються електричні двигуни постійного струму паралельного збудження типу СЛ-571К, які містять щітково-колекторний механізм, що обмежує їх довговічність і є джерелом радіоперешкод. Слід зазначити, що двигун виходить з під контролю, якщо струм індуктора падає до нуля. Корисна потужність таких двигунів 95 Вт, напруга 24 В (+5/–0 %), частота обертання 2200 об/хв, робочий струм 2,5 А, максимальний момент на вихідному валу 165 Н·м, струм при роботі електродвигуна на фрикцію не більше 8,4 А [1–4].

В пристроях переїзної сигналізації автошлагбаумів експлуатуються й асинхронні трифазні двигуни з короткозамкненим ротором типу АИР 56 В4Б. Напруга живлення змінним струмом 220/380 В (+5/–10 %), 50 Гц, струм електродвигуна при підйомі бруса не більше 1 А, потужність 180 Вт; частота обертання 1350 об/хв. До недоліків асинхронних двигунів слід віднести малий пусковий момент, зменшення обертального моменту при збільшенні швидкості, низький коефіцієнт потужності й значний пусковий струм. До того ж в схемах управління шлагбауму ПАШ-1 двигун використовується як однофазний, а АШ-06 як трифазний [1–3].

Метою наукової роботи стала розробка методу діагностування існуючих типів двигунів постійного та змінного струму і впровадження двигунів нового покоління в приводи автошлагбаумів, які дозволять мінімі-

зувати розміри переїзного обладнання і зменшити кількість відмов в двигунах автошлагбаумів і переїзної сигналізації і, таким чином, підвищити безпеку руху. Схему управління автошлагбаумом бажано залишити тією ж для полегшення обслуговування пристроїв залізничної автоматики обслуговуючим персоналом. Отже, тема науково-дослідної роботи є актуальною.

Задачі, що необхідно вирішити в науково-дослідній роботі:

– мінімізувати розміри та масу автошлагбаума за рахунок впровадження нового типу двигуна й редуктора;

– дати наукове обґрунтування впровадженню нових вузлів автошлагбауму (двигуна і редуктора).

Обраний напрям дослідження відповідає Концепції комплексної Програми розвитку залізничного транспорту України на 2007–2020 рр., яка є основою цільових програм оновлення та розвитку засобів залізничної автоматики.

Математична модель двигуна з постійними магнітами

Електродвигуни постійного та змінного струму типів СЛ-571К й АИР 56 В4Б, що застосовуються в автошлагбаумах залізничних переїздів України і країн СНД відрізняються великою вартістю і габаритами. До недоліків двигунів постійного струму з паралельним збудженням слід віднести і те, що двигун виходить з під контроль, якщо струм індуктора падає до нуля. До недоліків асинхронних двигунів, що використовуються в автошлагбаумах слід віднести малий пусковий момент, зменшення обертового моменту при збільшенні швидкості, низький коефіцієнт потужності, значний пусковий струм.

Електроприводи, виконані на базі двигунів постійного струму з постійними магнітами (ДП з ПМ), знаходять все більш широке застосування в різних областях техніки. В якості магнітних матеріалів, завдяки дешевизні і недефіцитності матеріалу, най-

більш вживаними є магнітотверді ферити барію і, останнім часом, ферити стронцію.

Необхідність задоволення постійно зростаючим вимогам, що пред'являються до технічних характеристик електродвигунів, їх економічним і експлуатаційним показникам, змушує виробників ДП з ПМ шукати нові конструкційні рішення, які дозволять підвищити конкурентоспроможність їхньої продукції.

Запропоновано впровадити в автошлагбаумах переїзної сигналізації двигуни постійного струму з постійними магнітами [5, 13]. Для зменшення маси автошлагбаумів запропоновано впровадити планетарний редуктор, який є набагато компактнішим, має зменшене навантаження на опори редуктора й зуби коліс, підвищене передавальне число, знижену шумність й більш тривалий термін служби [11, 12].

Традиційні методи проектування і розрахунку не дозволяють з достатньою точністю розраховувати двигуни постійного струму з незалежним збудженням від постійних магнітів, й врахувати з найбільшою точністю всі фактори, що впливають на не тільки технічні, але й економічні показники. Кількість параметрів, що характеризують роботу двигуна і надається заводом-виробником є обмеженою. Так, не вказані опір і індуктивність обмотки якорю, номінальна величина магнітного потоку, тип обмотки якорю і т.ін. Все це ускладнює вибір двигуна й перевірку його властивостей стосовно надійного функціонування приводу авто шлагбауму, розробку методів діагностування стану двигунів.

У зв'язку з вищевикладеним, є актуальною розробка методики проектування електроприводів на базі ДП з ПМ, що дозволяє з достатньою гнучкістю забезпечити розрахунок, побудову та аналіз основних вихідних характеристик, варіювання фізичних властивостей використовуваних матеріалів, а також магнітних властивостей складових полюсів.

Мета моделювання – розробка методики проектування електроприводів автошлаг-

гбауму на базі двигунів постійного струму зі збудженням від постійних магнітів за еквівалентною схемою заміщення, що дозволяє підвищити споживчі властивості електроприводів.

Завданням дослідження є:

– запропонувати схему заміщення та методику розрахунку ДП з ПМ, які дозволять розраховувати конструкції двигунів з однокомпонентними магнітами;

– апробувати запропоновану схему заміщення та методику розрахунку на прикладі сучасного електроприводу, виконаного на базі ДП з ПМ;

– дати рекомендації з проектування та розробки нових електроприводів на базі ДП із застосуванням магнітів однокомпонентних.

Для отримання математичної моделі необхідно отримати систему диференціальних рівнянь, яка описує роботу системи електроприводу, завдяки чому можна записати рівняння для статичних режимів, прирівнявши похідні функції до нуля.

Математична модель електричної машини (ЕМ) будь-якого типу складається з рівнянь електричної рівноваги всіх контурів і рівняння руху ротора. Для двигунів постійного струму з постійними магнітами схема заміщення буде мати вигляд (рис. 1) [9–17]:

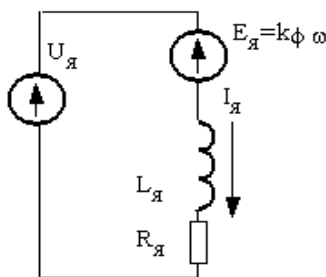


Рис. 1. Схема заміщення кола якорю двигуна постійного струму з постійними магнітами

Будемо вважати, що всі параметри схеми заміщення – постійні величини, а коефіцієнт форми $k_\phi = \text{const}$. Рівняння рівноваги за другим законом Кірхгофа дорівнюватиме:

$$U = k_\phi \omega + IR_\text{я} + L_\text{я} \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

де $R_\text{я}$ – опір обмотки якоря; $L_\text{я}$ – індуктивність обмотки якоря; I – струм якоря, $I = I_\text{я}$; ω – кутова частота.

Рівняння руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_\phi I - M_c, \quad (2)$$

де M_c – момент навантаження.

В канонічній формі:

$$\begin{cases} L_\text{я} \frac{dI}{dt} = U - k_\phi \omega - IR_\text{я}, \\ J \frac{d\omega}{dt} = k_\phi I - M_c. \end{cases} \quad (3)$$

Ця система рівнянь лінійна і допускає аналітичне рішення. Записавши рівняння в операторній формі, отримаємо передаточні функції між напругою, струмом, моментом навантаження і швидкістю

$$W_i(p) = \frac{I(p)}{U(p) - E(p)} = \frac{1/R_\Sigma}{T_e p + 1}, \quad (4)$$

$$W_\omega(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp}, \quad (5)$$

де T_e – електрична постійна, $T_e = L_\text{я}/R_\text{я}$, $T_e = 9,717 \cdot 10^{-3}/0,31 = 0,03135$ Гн/Ом;

R_Σ – сумарний активний опір кола якоря $R_\Sigma = 0,31$ Ом; $M_c = 0,06$ Нм.

Отримані передаточні функції покладені в основу структурної схеми моделі, яка наведена на рис. 2.

Методика визначення характеристик двигуна за паспортними даними

Основним елементом двигунів постійного струму є якор. Електромагнітні процеси в колі якоря визначають характер і якість перетворення енергії. Найважливішою з характеристик, що зв'язує два голов-

них параметра електромеханічного перетворювача з обертовим рухом – швидкість n або частота обертання ω і електромагнітний момент M , $n(M)$ або $\omega(M)$ є механічною характеристикою. Вона показує вплив механічного навантаження (моменту) на валу двигуна на швидкість обертання, що особливо важливо знати при виборі та експлуатації двигунів.

Сучасні приводи зазвичай являють собою автоматизовані системи, призначені для вирішення складних технологічних завдань, більшість з яких вимагають управління процесом перетворення енергії в двигуні і, зокрема, керування швидкістю його обертання. Тому крім механічної характеристики розробникам і користувачам необхідно знати можливості та особливості регулювання, які описуються регулювальною характеристикою $n(V)$, де V – керуюча величина.

Механічні характеристики можуть бути природними і штучними. Під природними характеристиками розуміють характеристики отримані при номінальних параметрах джерела живлення і відсутності будь-яких регулювальних пристроїв в колах якоря і збудження. Всі інші характеристики є штучними.

Рівняння механічної характеристики машини постійного струму можна отримати з рівняння Кірхгофа для кола якоря

$$U = I_a R_a + E_a, \quad (6)$$

де U – напруга на якорі, R_a – опір якоря, а E_a – проти-ЕРС, I_a – струм якорю.

Підставляючи вираз для проти-ЕРС одержимо рівняння швидкісної або електромеханічної характеристики $n(I_a)$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_E \Phi}. \quad (7)$$

Виражаючи струм якоря через електромагнітний момент, одержимо рівняння механічної характеристики

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_M \Phi^2} M. \quad (8)$$

Електрорушійна сила і електромагнітний момент. При обертанні якоря в провідниках його обмотки наводиться ЕРС, яка дорівнює $e = Blv$. Середнє значення цієї ЕРС за половину періоду визначатиметься виразом $E_{cp.} = B_{cp.} l v = \frac{\Phi}{\tau} l v = \frac{\Phi v}{\tau}$, де $B_{cp.}$ – середнє значення магнітної індукції в зазорі, τ – відстань між осями полюсів, Φ – магнітний потік, l – довжина активної частини провідника, v – швидкість перетинання провідниками магнітного поля статора. Тоді повна ЕРС всіх витків обмотки в одній паралельній гілці ($w_a = \frac{N}{2a}$, де N – число провідників в обмотці; a – число пар паралельних гілок), дорівнює ЕРС всій обмотки якоря і складатиме $E_a = E = \Phi \frac{v}{\tau} w_a = \Phi \frac{v N}{2a \tau}$ або, з урахуванням того, що $v = \frac{\pi D n}{60}$, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, де D – діаметр якоря, p – число пар полюсів:

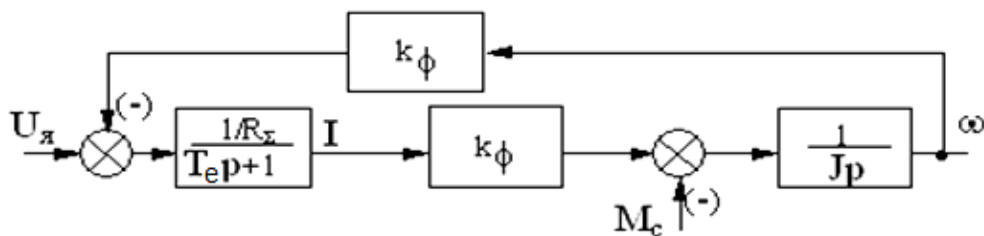


Рис. 2. Структурна схема моделі двигуна постійного струму з постійними магнітами

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_E \Phi n, \quad (9)$$

де C_E – електрична постійна (конструктивний коефіцієнт), $C_E = \frac{pN}{60a}$.

Конструктивний коефіцієнт або постійна ЕРС в цьому виразі відповідає позасистемній одиниці швидкості обертання n , об/хв. Якщо замість швидкості обертання якоря використовувати кутову частоту $\Omega = 2\pi n$, то $C'_E = \frac{pN}{2\pi a}$ і $E = C'_E \Phi \Omega$.

Таким чином, ЕРС обмотки якоря пропорційна величині магнітного потоку головних полюсів і швидкості або частоті обертання.

Електромагнітний момент, який створюється взаємодією струмів обмотки якоря і магнітного поля машини можна визначити з виразу для електромагнітної сили, що діє на провідник зі струмом [9, 15–17]. Оскільки електромагнітний момент дорівнює $M = FN \frac{D}{2}$, а струм в них $i = \frac{I_{\text{я}}}{2a}$, отримаємо

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi n = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (10)$$

де C_M – магнітна постійна.

В загалом, конструктивний коефіцієнт C_M або постійна моменту дорівнює постійній ЕРС C_E в системі одиниць СІ. Для позасистемної одиниці швидкості обертання $\frac{C_M}{C_E} = \frac{60}{2\pi} = 9,57$.

Моделювання робочих і механічної характеристики двигуна постійного струму з постійними магнітами

Вихідними даними для розрахунку параметрів двигуна постійного струму з постійними магнітами типу ЕС020.120 італій-

ського виробництва фірми Альтера є паспортні дані [12, 13]:

- номінальна напруга живлення обмотки якорю $U = 12$ В;
- номінальний струм обмотки якорю $I_{\text{я}} = 2,6$ А;
- номінальний момент обертання на валу двигуна $M = 0,06$ Н·м;
- число пар полюсів $p = 1$;
- номінальна швидкість обертання ротору $n = 2850$ об/хв;
- номінальна потужність $P_2 = 20$ Вт

Як бачимо, кількість параметрів, що характеризують роботу двигуна є обмеженою. Не вказані опір і індуктивність обмотки якорю, номінальна величина магнітного потоку, тип обмотки якорю і т. ін. Все це ускладнює вибір двигуна й перевірку його властивостей стосовно надійного функціонування приводу автошлагбауму.

Нижче наведені результати моделювання потужностей, електромагнітного моменту та інших параметрів, необхідних для побудови характеристик.

Потужність, що споживається від мережі

$$P_1 = UI_{\text{я}}. \quad (10)$$

Кутова швидкість обертання якоря

$$\omega = 2\pi n/60. \quad (11)$$

Механічна потужність, що розвивається двигуном з постійними магнітами

$$P_M = M_{\text{ном}} \omega. \quad (12)$$

Втрати в обмотці якоря

$$\Delta P_{\text{я}} = P_2 - P_M. \quad (13)$$

З іншого боку втрати в обмотці якоря можна визначити за формулою

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}. \quad (14)$$

Отже, $P_1 = 31,2$ Вт; $\omega = 298,451$ с⁻¹;
 $P_M = 17,097$ Вт; $\Delta P_{\text{я}} = 2,093$ Вт.

Звідки $R_{я} = \Delta P_{я} / I_{я} = 0,31 \text{ Ом}$.

З формули (7) отримаємо

$$C_E \Phi = \frac{U - I_{я} R_{я}}{n} = 3,928 \times 10^{-3} \text{ Вб.}$$

За формулою (9) отримаємо величину проти-ЕРС $E = 11,195 \text{ В}$.

З формули (10) $C_M \Phi = M_{ном.} / I_a = 0,023$.

Відношення коефіцієнтів для нашого типу двигуна становитиме $C_M / C_E = 5,875$.

Індуктивність якоря

$$L_{я} = C \frac{U}{I_{я} n p}, \quad (15)$$

де C – коефіцієнт для двигунів без компенсаційних обмоток, $C = 6$.

Механічна характеристика, побудована за формулою (8) для двигуна типу ЕС020.120 з постійними магнітами, дана на рис. 3.

Робочі характеристики, побудовані за визначеними вище параметрами, представлені на рис. 4–6.

Перевірку математичної моделі на адекватність було здійснено за допомогою критерію Фішера на прикладі механічної характеристики двигуна (рис. 7).

Покажемо розрахунки на прикладі порівняння даних розрахованих для побудови механічної характеристики з паспортними (табл. 1).

Критерій Фішера F є параметричним критерієм і використовується для порівняння дисперсій двох варіаційних рядів. Емпіричне значення критерію обчислюється за формулою [18, 19]:

$$F = S_y^2 / S_{y1}^2, \quad (15)$$

де S_y – більша дисперсія, S_{y1} – менша дисперсія розглянутих варіаційних рядів.

Якщо обчислене значення критерію F більше критичного для певного рівня значущості та відповідних чисел ступенів свободи для чисельника і знаменника, то дисперсії вважаються різними.

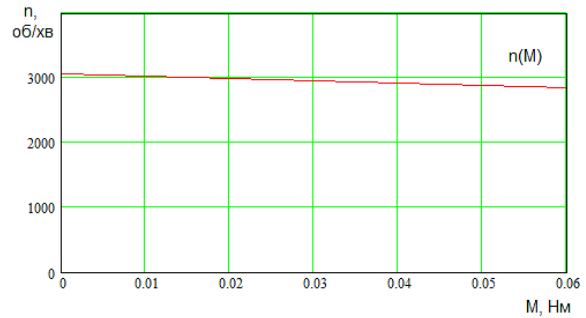


Рис. 3. Механічна характеристика двигуна постійного струму з постійними магнітами

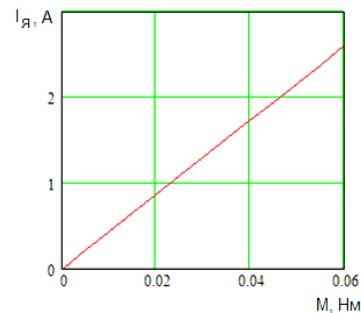


Рис. 4. Залежність струму обмотки якоря від обертового моменту на валу двигуна з постійними магнітами $I_{я}(M)$

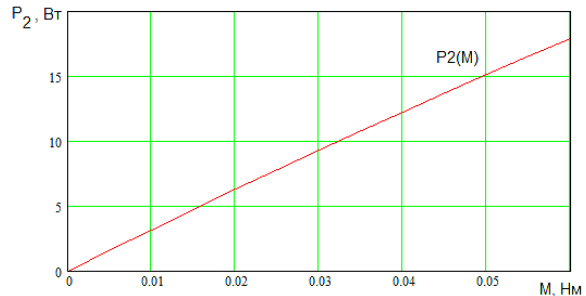


Рис. 5. Залежність механічної потужності від моменту на валу двигуна $P_2(M)$

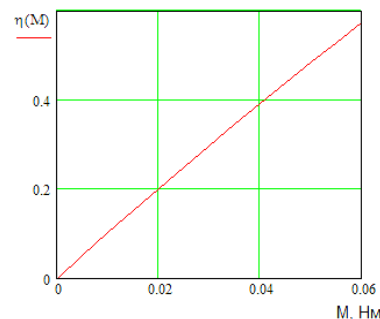


Рис. 6. Залежність ККД двигуна з постійними магнітами від моменту на валу $\eta(M)$

Запишемо вирази для визначення математичного сподівання, дисперсії і середньоквадратичного відхилення:

$$M_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n-1}, S_y = \frac{\sum_{i=1}^n (M - y_i)^2}{n-1},$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - y_i)^2}{n-1}}. \quad (16)$$

Область застосування гіпотези визначається нерівністю $F < F_{кр}$.

Порівняємо спостережуване значення F із критичною точкою розподілу Фішера. Число ступенів свободи $k = n - 1 = 11 - 1 = 10$ (однакове для більшої і меншої дисперсії, де n – число випробувань, дорівнює 11). При рівні $\alpha = 0,05$ значущості $F_{кр} = 2,98$.

Таблиця 1

Дані для розрахунків математичного очікування змодельованих і паспортних даних механічної характеристики двигуна ЕС020.120

N	M, Нм	np, об/хв	n, об/хв	(n-np), об/хв	(Mnp-np)2	(My-n)2
1	0	3054,99	3100	45,01	13636,606	6533,764
2	0,01	3020,677	3058,333	37,65	13636,606	15005,93
3	0,02	2986,363	3016,666	30,30	22827,937	26950,38
4	0,03	2952,05	2974,999	22,94	34374,073	42367,1
5	0,04	2917,737	2933,332	15,59	48275,012	61256,1
6	0,05	2883,423	2891,665	8,24	64530,755	83617,38
7	0,06	2849,11	2850	0,88	83141,303	109449,6
8	0,07	2814,797	2808,331	-6,46	104106,65	138756,8
9	0,08	2780,483	2766,664	-13,81	127426,81	171534,9
10	0,09	2746,17	2724,997	-21,17	153101,77	207785,3
11	0,1	2711,857	2683,33	-28,52	181131,53	247507,9

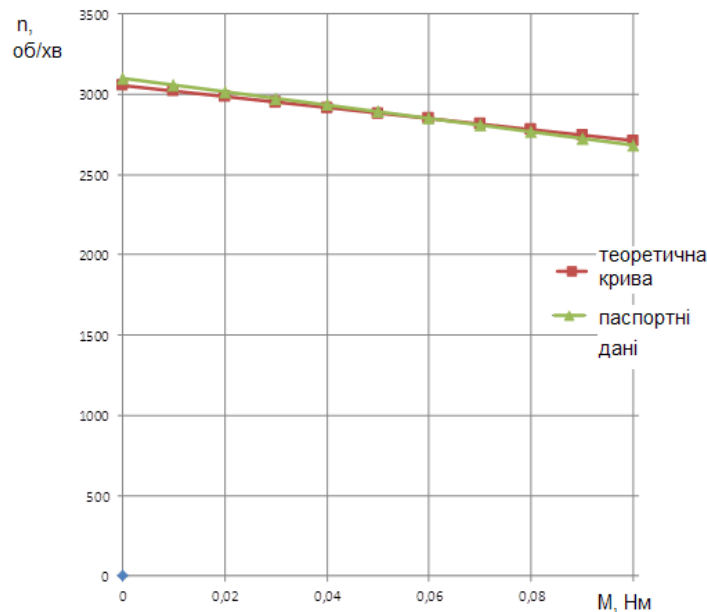


Рис. 7. Механічна характеристика, побудована за змодельованими і паспортними даними двигуна типу ЕС020.120

Математичне очікування розрахованих і паспортних даних механічної характеристики двигуна

$$M_{yp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{pi}}{n-1} = 3171,8, \quad M_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n-1} = 3180,83,$$
$$M_y - M_{yp} = 3171,8 - 3180,83 = 9,07.$$

Дисперсія випадкової величини – це міра розкиду даної випадкової величини, тобто її відхилення від математичного очікування. Дисперсії нормованої заводом-виробником і розрахованої кривої дорівнюють $S_{yp} = 84618,4$; $S_y = 111076,4$.

Критерій Фішера

$$F = \frac{S_y^2}{S_{y1}^2} = \frac{111076,5}{84618,4} = 1,72 < 2,98.$$

Отже, побудована за паспортними даними математична модель є адекватною.

Висновки

Виконаний аналітичний огляд існуючих типів автошлагбаумів підкреслює необхідність впровадження двигунів й редукторів нових типів в ньому з метою мінімізації його розмірів, зменшення вартості, підвищення надійності роботи переїзної сигналізації, і за рахунок цього підвищення безпеки руху залізничного транспорту в загалом. Схема управління автошлагбаумом залишається тією ж, що полегшує етапи реновації й не потребує додаткового навчання обслуговуючого персоналу.

Пропонується мінімізувати розміри й масу автошлагбауму за рахунок впровадження двигунів постійного струму з постійними магнітами, які є більш дешевими і надійними в експлуатації проти існуючих двигунів типу СЛ-571к й АИР 56В4Б43. Також зменшити масу автошлагбаумів можна за рахунок впровадження планетарного редуктору, який є набагато компактнішим, йому властиве зменшене навантаження на опори редуктора й зуби коліс, підвищене

передавальне число, знижена шумність й більш тривалий термін служби.

Дано наукове обґрунтування впровадженню двигунів постійного струму з постійними магнітами й планетарного редуктора в автошлагбаумі.

Розроблена методика визначення первинних параметрів схеми заміщення двигуна обраного типу, його робочих й механічних характеристик за паспортними даними.

Удосконалено математичну модель двигуна постійного струму з постійними магнітами за рахунок введення методики визначення співвідношення електричної й магнітної постійних за вказаними паспортними даними, визначення первинних параметрів і його робочих й механічних характеристик, що було покладено в основу наукового обґрунтування методу діагностування приводів автошлагбауму і дозволить у подальшому перейти від планово-попереджувальної технології обслуговування до обслуговування за станом об'єктів – автошлагбаумів залізниць України й країн СНД.

Бібліографічний список

1. Резников, Ю. М. Автоматизированные электропривода железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. М. Резников – М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
2. Казаков, А. А. Станционные устройства автоматики / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов. – М.: Транспорт, 1990. – 485 с.
3. Сапожников, В. В. Станционные системы автоматики / В. В. Сапожников, Б. Н. Елкин. – М.: Транспорт, 2000. – 450 с.
4. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М.: Маршрут, 2004. – 318 с.
5. Сердюк, Т. М. Впровадження автошлагбаумів нового покоління на залізницях України / Т. М. Сердюк // IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті». – Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2015. – С. 37.

6. ЦШ-0042: Пристроїв сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування. Наказ № 347-ЦЗ від 26.04.2006. – Міністерство транспорту: Київ – 2006.
 7. ЦШ-0060: Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування : Затв. Наказ № 090-ЦЗ від 07.10.2009. – Міністерство транспорту: Київ. – 2009.
 8. ЦШ-0095: Інструкція з улаштування та експлуатації переїздів. Технологія обслуговування. Наказ № 469 від 12.07.2002. – Міністерство транспорту: Київ – 2002.
 9. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
 10. Планетарные редукторы [Електронний ресурс]. Режим доступа: http://www.encebmbh.ru/rus/planetary_reducers.php
 11. Энциклопедия по машиностроению XXL. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕХАНИКА [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://mash-xxl.info/page/214071224127018244129138091216103007060237206155/>
 12. Редукторные механизмы. Методика выбора редуктора [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://reductor.com.ua/content/metodika-vybora-reduktora-0>
 13. Каталог Альтера [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://www.svaltera.ua/catalog/825/4060.php>
 14. Fritz, P. Efficient diagnostics for supporting the availability of turnouts and tracks / P. Fritz // Signal and Draht. – 2004. – № 11. – PP. 42–45.
 15. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines/ P. Tavner, L. Ran, J. Penman and H. Sedding.. – London : The Institution of Engineering and Technology, UK, 2008.
 16. Tsyppkin Mikhail. Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – a Practical Implementation / Mikhail Tsyppkin // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011. – PP. 406–411.
 17. Subhasis Nandi. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review / Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, Xiaodong Li. // IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, No. 4, December, 2005. – PP. 719–729.
 18. Барлоу, Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан – Москва: Наука, 1984. – 328 с.
 19. Кибзун, А. И. Теория вероятностей и математическая статистика / А. И. Кибзун, Е. Р. Горяинова, А. В. Наумов, А. Н. Сиротин. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 224 с.
- Ключові слова:** залізничний автошлагбаум, двигун постійного струму з постійними магнітами, математична модель, первинні параметри, робочі й механічна характеристики.
- Ключевые слова:** железнодорожный автошлагбаум, двигатель постоянного тока с постоянными магнитами, математическая модель, первичные параметры, рабочие и механическая характеристики.
- Keywords:** railway level crossing, DC motor with permanent magnets, mathematical model, primary parameters, working and mechanical characteristics.
- Рецензенти:**
д. т. н., проф., А. Б. Бойник,
д. ф.-м. н., проф., В. І. Гаврилюк.
- Надійшла до редколегії 12.10.2016 р.
Прийнята до друку 28.10.2016 р.