

3. З.Х. Нотик. Тепловози ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЕ. Пособие машинисту. М.: Транспорт, 1996. - 444 с.

4. Локомотив серии ЧМЕЗ-П. Техническое описание. CZ Loko a.s. (г. Ческа-Тршебова) Чешская республика, 2007 – 124 с.

5. Володарець М.В. Аналіз витрат палива тепловозами серії ЧМЕЗ та ЧМЕЗ-П під час виконання маневрової роботи // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2011. - №27. – С. 99-104.

Анотації:

Ключові слова: маневровий тепловоз, модернізація, витрати палива.

Розглянуті питання модернізації маневрового тепловоза ЧМЕЗ і наведений аналіз витрат палива цим локомотивом і модернізованим серії ЧМЕЗ-П під час виконання вивізної роботи.

Рассмотрены вопросы модернизации маневрового тепловоза ЧМЭЗ и приведен анализ расхода топлива этим локомотивом и модернизированным серии ЧМЭЗ-П во время выполнения вывозной работы.

The problems of modernization of the locomotive shunting ChME3 and provides an analysis of fuel that the engine and the upgraded series ChME3-P during the execution of the export operation.

УДК 621.313

БЛИНДЮК В.С., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ).

Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу. Частина 1.

Вступ, аналіз публікацій, формулювання задачі дослідження

Розробка систем автоматичного керування електротяговим рухомим складом потребує вирішення проблеми адекватного відтворення динамічних процесів, які виникають у сталому режимі роботи тягових двигунів та в умовах їх зміни з урахуванням дії сторонніх факторів [1]. Це необхідно для підвищення експлуатаційної надійності, оптимізації використання енергетичних і матеріальних ресурсів та за-

безпечення безпеки руху поїздів [2]. У зв'язку з цим виникає потреба в динамічній функціональній моделі тягового двигуна постійного струму, яка дозволяє отримувати поточні значення основних електромеханічних показників його роботи в реальному масштабі часу.

Виконаємо аналіз основних положень класичної теорії електричних машин. Так, основною залежністю, яка ставить у відповідність електромагнітний момент M_{em} з основним магнітним по-

током Φ_{δ} в повітряному зазорі δ , який приходить на один головний полюс, має наступний вигляд [3]

$$M_{em} = c_m \Phi_{\delta} I_a, \quad (1)$$

де I_a - струм якоря; c_m - постійна для кожної машини величина, яка, в свою чергу, визначається як

$$c_m = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (2)$$

де p - кількість пар полюсів; N - число активних дротів обмотки якоря; a - кількість пар паралельних гілок.

Струм якоря I_a обумовлюється напругою живлення U та залежить від еле-

$$E_a = \frac{2p}{2a} \cdot \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} \cdot l_{\delta} \cdot v = \frac{pl_{\delta}v}{a} \cdot \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}, \quad (4)$$

де $B_{\delta k}$ - індукція в повітряному зазорі під k -м дротом протягом полюсного розподілу; l_{δ} - довжина якоря; v - лінійна швидкість руху.

Перетворюючи вираз (1) з урахуванням (2) – (4) отримуємо залежність створюваного електромагнітного моменту M_{em} від потоку Φ_{δ} , напруги живлення U та індукції $B_{\delta k}$

$$M_{em} = \frac{pN\Phi_{\delta}}{2R_a\pi a} \left(U - \frac{pl_{\delta}v}{a} \cdot \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} \right) \quad (5)$$

Виконаємо аналіз виразу (5) з урахуванням необхідності визначення основних електромеханічних показників роботи двигуна постійного струму апріорно встановленого типу.

Так, найбільш неоднозначним пи-

ктрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції E_a , яка виникає як результат переміщення обмоток якоря в магнітному полі й спрямована в протилежному до I_a напрямку, тобто

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad (3)$$

де R_a - повний активний опір кола якоря.

В свою чергу, E_a визначається як сума ЕРС всіх $\frac{N}{2a}$ дротів паралельної гілки, що розташовані під одним полюсом [3]

танням теорії електричних машин є моделювання розподілу магнітної індукції B_{δ} в повітряному зазорі, яким, відповідно до виразу (4), обумовлюється ЕРС самоіндукції електричної машини. З одного боку, застосування класичних методів (наприклад, [3]) дозволяє з достатньою для практичних цілей похибкою виконувати розрахунки цього чинника в сталому режимі роботи із застосуванням досить простого математичного апарату. З іншого, інтенсивна зміна режимів роботи тягових двигунів рухомого складу, вплив технологічних факторів та зовнішніх збуджень вимагає моделювання динаміки процесів, які відбуваються. Крім цього необхідно враховувати залежність B_{δ} від динаміки зміни струму в основних й додаткових полюсах, характеристик магнітного поля двигуна, процесів комутації тощо.

Ціль першої частини роботи

Дискретне динамічне моделювання розподілення індукції в повітряному зазорі та ЕРС самоіндукції обмоток якоря в двигунах постійного струму. Розроблені моделі повинні бути універсальними і адекватно відтворювати процеси як у тягових двигунах рухомого складу, так і інших, які відрізняються конструктивними особливостями, електричними характеристиками тощо.

Основний матеріал

Магнітне поле у повітряному зазорі, на яке припадає 60-80% повної сили намагнічування в електричній машині, має найбільш складний характер. Теоретичний вигляд форми кривої розподілу індукції в повітряному зазорі B_{δ} наведений в багатьох публікаціях (наприклад, [3, 4]), але при її моделюванні приймається значне спрощення. Тому, з метою підвищення точності оцінки для апріорно визначеного типу двигуна, доцільне представлення розподілу B_{δ} як вектора $\bar{B}_{\delta} = [b_{\delta 1}, b_{\delta 2}, \dots, b_{\delta m}]$, розмірність якого залежить від потрібної точності у часі дискретної динамічної моделі, яка розробляється, тобто

$$m = f_{max_об} \cdot \frac{360}{\Delta\lambda}, \quad (6)$$

де $f_{max_об}$ - максимальна частота обертання якоря (Гц); $\Delta\lambda$ - мінімальне кутове значення моделі ($\frac{360}{\Delta\lambda}$ - кількість визначених значень \bar{B}_{δ} на одне обертання якоря при максимальній швидкості). Вираз (6), по суті, є частотою дискретизації при моделюванні.

В свою чергу, амплітудне значення

індукції в момент часу t_i визначається струмом основних і додаткових полюсів у відповідності до кривої намагнічування з урахуванням гістерезису матеріалу та конструктивних особливостей двигуна. Так, теоретично обґрунтована функція насиченості (Ланжевена) має наступний вигляд [5, 6]

$$L(a) = cth(a) - \frac{1}{a}, \quad (7)$$

в теорії магнетизму $a = m_0 H_{ef} / kT$, де m_0 - елементарний магнітний момент; H_{ef} - ефективне поле; k - постійна Больцмана; T - температура. З іншого боку, в роботі [7] наведена функція, яка точніше описує насиченість нелінійних матеріалів

$$L(a) = sign(a) \left(1 - e^{-\frac{|a|}{\xi}} \right), \quad (8)$$

де ξ - коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу.

З урахуванням викладеного, приймаючи $a = \sigma \cdot i(t_i)$, де σ - коефіцієнт пропорційності між струмом полюсів двигуна $i(t_i)$ та напруженістю магнітного поля двигуна, миттєве амплітудне значення індукції в момент часу t_i визначається наступним виразом

$$B_{\delta}(t_i) = sign(\sigma \cdot i(t_i)) \left(1 - e^{-\frac{|\sigma \cdot i(t_i)|}{\xi}} \right) \cdot b_{\delta j}, \quad (9)$$

де $b_{\delta.j}$ - j -й елемент вектору \bar{B}_{δ} , причому $j = 1, 2, \dots, m$.

В свою чергу, значення j в момент часу t_{i+1} залежить від поточної частоти обертання ротору машини $f_{об}(t_{i+1})$ наступним чином

$$j = \begin{cases} j + f_{об.}(t_{i+1}), & \text{якщо } j < m \\ 1, & \text{якщо } j = m \end{cases}, \quad (10)$$

тобто реалізована циклічна вибірка значень вектору \bar{B}_δ .

Результат комп'ютерного моделю-

вання, у відповідності до виразів (6) - (10), при регульованому нарощуванні значень струму $i(t_i)$ та швидкості обертання для перших двадцяти обертів якоря машини з однією парою полюсів у тримірному вигляді наведений на рис. 1.

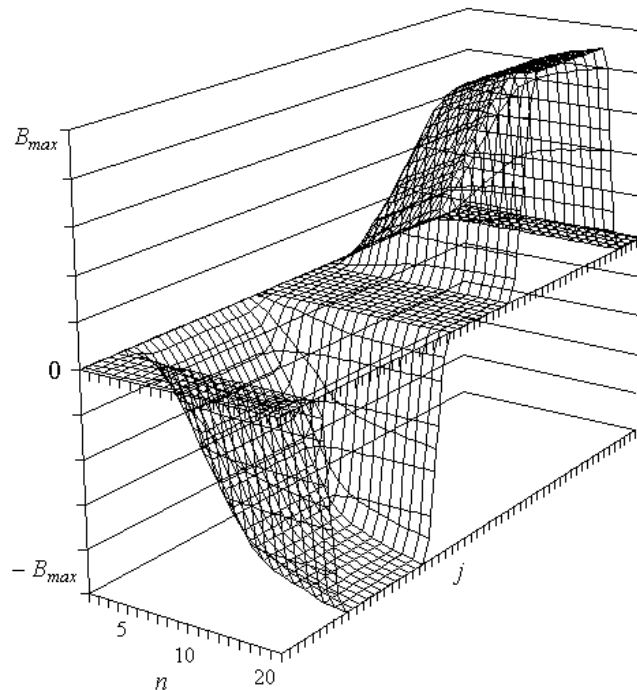


Рис. 1. - Моделювання зміни індукції в повітряному зазорі для двадцяти перших обертань ротору при поступовому нарощуванні струму збудження

Вигляд кривої значень індукції на діаграмі повністю визначається вектором \bar{B}_δ , який встановлюється апріорно за типом двигуна. В наведеному на рис. 1 прикладі $m = 360$, тобто точність моделювання складає 1° .

Далі, миттєве значення ЕРС самоіндукції $E_a(t_i)$, яка виникає в обмотках якоря, визначається у відповідності до виразу (4), і залежить від $B_\delta(t_i)$ та швидкості обертання $v(t_i)$. З урахуванням викладеного в роботах [3-5], найбільш доцільним способом визначення $E_a(t_i)$ є

моделювання за половинами обмоток, які знаходяться в окремому пазу якоря.

Введемо дискретну функціональну матрицю $E_{\Pi}(t_i)$, яка формалізує процес виникнення ЕРС в провідниках напівобмоток, розташованих в пазу k

$$\bar{E}_{\Pi}(t_i) = \begin{bmatrix} E_{\Pi 1}(t_i) \\ E_{\Pi 2}(t_i) \\ \dots \\ E_{\Pi k}(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \cdot v(t_i) \cdot b_{\delta \cdot j}^{\Pi 1} \\ \omega \cdot v(t_i) \cdot b_{\delta \cdot j}^{\Pi 2} \\ \dots \\ \omega \cdot v(t_i) \cdot b_{\delta \cdot j}^{\Pi k} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де $k = 1, 2, \dots, K$ - порядковий но-

мер паза за колом обертання якоря, починаючи з розташованого напроти визначеної як першої щітки (умовний нуль); ω - постійний для встановленого двигуна коефіцієнт, який враховує вплив конструктивних особливостей якоря; $b_{\delta \cdot j}^{Pk}$ - елемент вектору \bar{B}_{δ} , індекс j якого відпо-

відає кутовій мірі паза відносно умовного нуля.

Як приклад на рис. 2, в безперервному вигляді, наведені розраховані дискретні значення $E_{\Pi 1}(t_i)$, $E_{\Pi 2}(t_i)$ та $E_{\Pi 3}(t_i)$ для двигуна, який має 13 пазів.

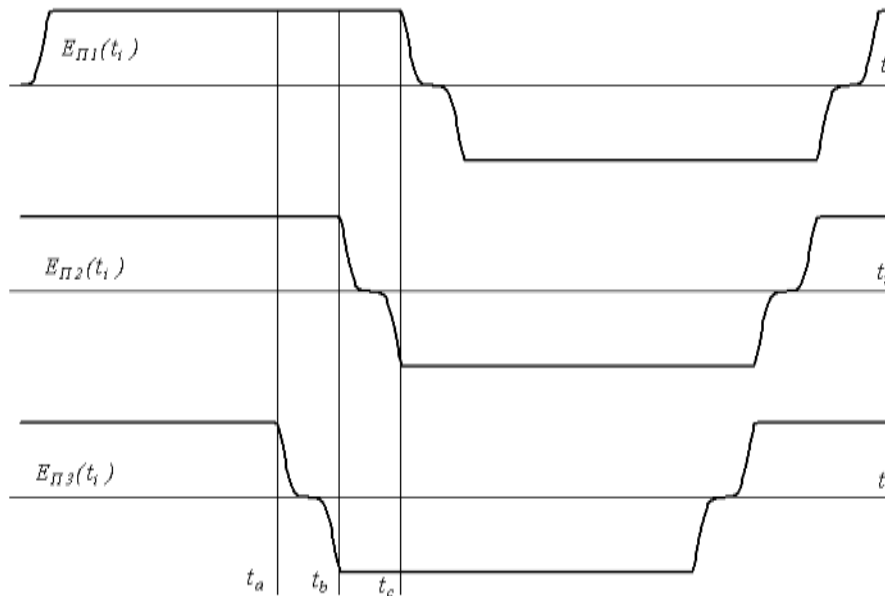


Рис. 2. - Розраховані ЕРС в провідниках напівобмоток

Кожна з наведених ЕРС (див. рис. 2) відрізняється за фазою наступним чином

$$t_c - t_b = t_b - t_a = \frac{360}{K} \cdot \frac{m}{360} = \frac{m}{K}, \quad \text{де}$$

m - розмір вектору \bar{B}_{δ} (6); K - кількість пазів якоря. В наведеному прикладі, при $m = 360$, $t_c - t_b = t_b - t_a \approx 28$.

З урахуванням того, що кожна з напівобмоток якоря підключена до однієї колекторної пластини, для конкретної машини визначена матриця з'єднань, яку доцільно формалізувати наступним чином

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{14} \\ z_{21}, z_{22}, z_{23}, z_{24} \\ \dots \\ z_{s1}, z_{s2}, z_{s3}, z_{s4} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де z_{s1} - номер колекторної пластини початку обмотки; z_{s2} - номер паза, де міститься початкова напівобмотка; z_{s3} - номер колекторної пластини кінця обмотки; z_{s4} - номер паза, де міститься кінцева напівобмотка; $s = [0, 1, 2, \dots, S - 1]$ - порядковий номер (від умовного нуля) колекторної пластини, S - загальна кількість пластин.

У якості прикладу, матриця \bar{Z} для двигуна, який має 39 колекторних пластин та 13 пазів, набуває наступного вигляду (нумерація пластин та пазів починається з нуля)

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} 0,0,1,6 \\ 1,0,2,6 \\ 2,0,3,6 \\ 3,1,4,7 \\ \dots \\ 38,12,0,5 \end{bmatrix}.$$

В свою чергу процес замикання та розмикання відповідних колекторних пла-

стин при обертанні якоря доцільно формалізувати із застосуванням кутових мір. Тоді для кожної колекторної пластини визначена кутова міра її початку та кінця за колом обертання, яка відрізняється на

$$\rho_k = \frac{360}{S}. \text{ Кутова міра щітки } \rho_{щ}, \text{ з}$$

урахуванням її встановлення відносно колектора, визначається парою – кутова міра початку та кінця за колом обертання, тобто $\rho_{щ} = [\angle_{П}, \angle_{К}]$ (рис. 3).

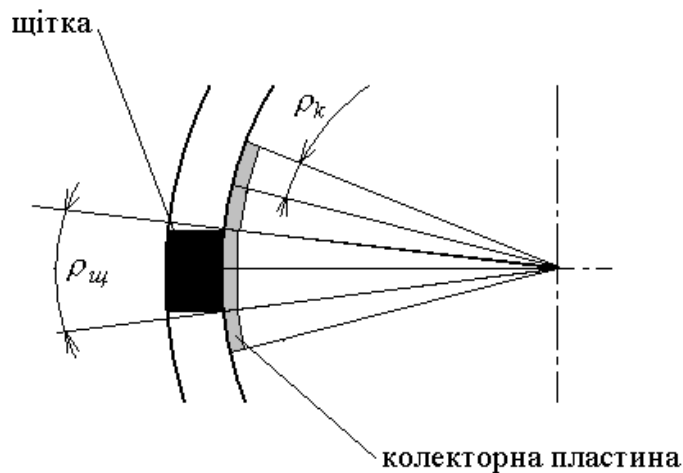


Рис. 3. - Кутові міри щітки та колекторної пластини

В процесі обертання якоря, коли кутова міра колекторної пластини співпадає з кутовою мірою щітки, фіксується індекс s (стрічка) матриці \bar{Z} (12). В свою чергу елементом z_{s2} визначається ЕРС напівобмотки, розташованої в пазу $k = z_{s2}$, тобто миттєве значення $E_{Пk}(t_i)$ відповідно виразу (11). Далі, з урахуванням полярності щіток, до миттєвої вихідної напруги на щітках $U(t_i)$ додається або віднімається кожне значення $E_{Пk}(t_i)$ за колом обертання з урахуванням відповід-

ної зміни поточного значення кутової міри \angle_{t_i} . Зміна знаку з додавання на віднімання відбувається, коли \angle_{t_i} належить до $\rho_{щ}$ плюсової або мінусової щітки.

В ідеальному випадку, коли миттєві значення $E_{Пk}(t_i)$ протилежних напівобмоток співпадають, виконується зміна знаку, і результуюча ЕРС подвоюється у відповідності до виразу (4). Їх різниця приводить до появи змінної складової у вихідній напрузі, тоді

$$U(t_i) = U^{\pm}(t_i) + U^{\sim}(t_i), \quad (13)$$

де $U^{\pm}(t_i)$ - постійна, $U^{\sim}(t_i)$ - змінна складова вихідної напруги $U(t_i)$.

Для перевірки адекватності моделі (6) – (13) виконаємо розрахунки для конкретного типу двигуна та порівняємо їх з результатами натурних випробувань при його роботі в генераторному режимі з априорно встановленою швидкістю обертання без навантаження.

Обираємо двигун постійного струму ВЕВ 1146.9 потужністю 600 Вт, який має одну пару полюсів, 13 пазів, 39 колекторних пластин, одну пару щіток, одна з яких встановлена на геометричній нейтралі, друга здвигнута на кутову міру однієї колекторної пластини. Вал двигуна з'єднано з валом асинхронного двигуна. Встановлена швидкість обертання - 2690 об/хв.

Результати дискретного моделювання за виразами (6) – (13) у вигляді безперервних функцій $U(t_i)$ для різних струмів збудження, наведені на рис. 4.

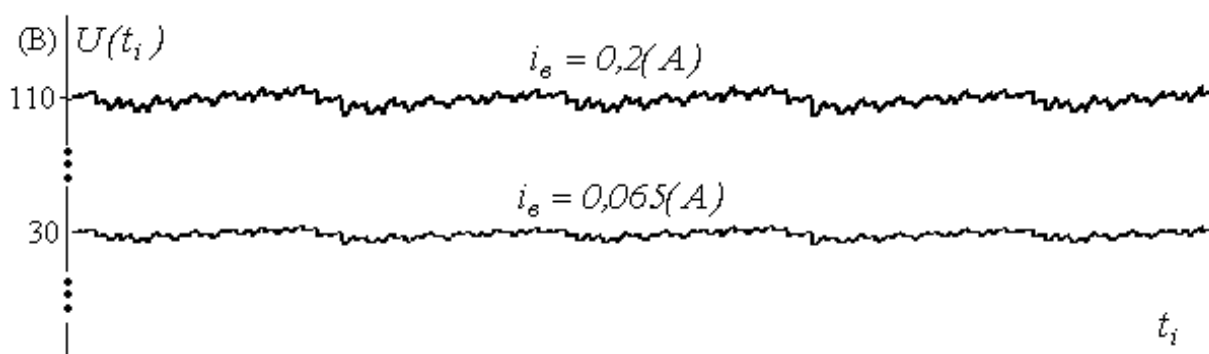


Рис. 4. - Графіки зміни $U(t_i)$ при різних струмах збудження

При моделюванні передбачався сталий режим роботи з константними значеннями струмів збудження та швидкості обертання. При цьому коефіцієнт пропорційності між струмом полюсів двигуна та напруженістю магнітного поля двигуна $\sigma = 0,036$. Коефіцієнт, який враховує вплив конструктивних особливостей якоря, $\omega = 6,5$. Значення розраховані при порівнянні результатів моделювання та експериментальних вимірів.

Слід зазначити, що середнє значення змінної складової вихідної напруги як в експерименті, так і в результаті моделювання, не перевищувало 0,5% від постійної. З іншого боку, схожість форм змінних

складових може свідчити про адекватність моделювання процесу комутації.

На рис. 5, а) наведена осцилограма вихідної напруги $U^{\sim}(t)$, яка отримана в результаті натурних випробувань, на рис 5, б) $U^{\sim}(t_i)$ – за результатами моделювання.

В обох випадках частота основного коливання відповідає частоті обертання якоря. Форма кривої дещо відрізняється, але число локальних максимумів та мінімумів за один період співпадає з кількістю пар колекторних пластин.

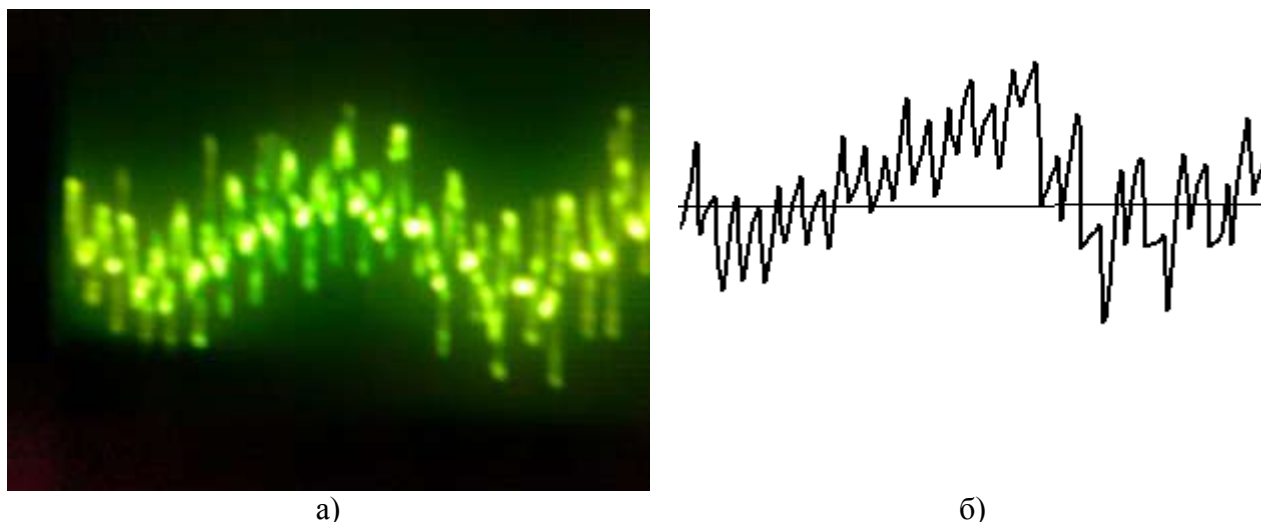


Рис. 5. - Вигляд змінних складових вихідної напруги $U^{\sim}(t)$ та $U^{\sim}(t_i)$

Висновок

В роботі знайшли подальший розвиток теоретичні методи функціонування виконавчих приладів електроприводів постійного струму в частині динамічного моделювання розподілення індукції в повітряному зазорі та ЕРС самоіндукції обмоток якоря.

Розроблені моделі є універсальними, їх адекватність відтворюваним процесам перевірена результатами натурального експерименту при функціонуванні двигуна постійного струму в генераторному режимі.

Література

1. Бабаев М.М., Блиндюк В.С., Давиденко М.Г., Соболев Ю.В. Математическая модель процесса коммутации электрических машин постоянного тока // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. - № 5. – С.80-83.
2. Блиндюк В.С. Анализ методов и средств диагностики технического состояния локомотивов // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. - №2. – С.110-112.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, Ленинградское от-

деление, 1978. – 832 с.

4. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. Учебник для электротехнических специальностей вузов. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., – 1990г. – 528 с.

5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, – 1976. – 616 с.

6. Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. – М.: Наука. – Главная редакция физико-математической литературы. – 1983. – 272 с.

7. Лукичев А.А. Простая математическая модель петли гистерезиса для нелинейных материалов // А.А. Лукичев, В.В. Ильина / Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, №4, – 2011. – С. 39-44

8. Rostislav V. Lapshin Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope // Rostislav V. Lapshin / American Institute of Physics, – Rev. Sci. Instrum. 66 (9), September, – 1995, - vol. 4718-4730

Анотації:

В работе представлены результаты дискретного динамического моделирования распределения индукции в воздушном зазоре и э.д.с. взаимной индукции обмоток якоря электрической машины постоянного тока.

В роботі представлені результати дискретного динамічного моделювання розподілення ін-

дукції в повітряному зазорі та ЕРС самоіндукції обмоток якорю електричної машини постійного струму.

In work presented results of discrete dynamic modeling of induction in air gap and voltage of inductions windings of anchor of electrical machine of direct current.