ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КАР'ЄРНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ**А. М. Артеменко, О. П. Чорний**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: aleksei.chornyi@gmail.com

В роботі наведено результати експериментальних досліджень з визначення параметрів тягового електроприводу постійного струму кар'єрного електровозу. Дослідження проведені на базі Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського із застосуванням лабораторного дослідного стенду з електромеханічним обладнанням, яке дозволяє імітувати роботу тягового електроприводу, а саме просковзування колісних пар тягового електропривода при зміні умов зчеплення та відмінностях електричних параметрів тягових двигунів. Визначення параметрів здійснювалось на основі комплексу методів, що ґрунтуються на вимірюваних миттєвих значеннях змінних стану електропривода. Доведена ефективність застосування методу простору стану та методу, який використовує миттєві значення струму і напруги двигуна в квазісталому режимі при живленні від вентильного перетворювача енергії. Результати, отримані у процесі досліджень, свідчать про можливість розрахунку параметрів з точністю, що знаходиться в межах 10 %. Верифікація отриманих результатів перевірена вираховуванням коефіцієнта детермінації і суми квадратів відхилень для експериментальних даних, розрахованих на основі визначених параметрів. Точність визначення параметрів забезпечується використанням миттєвих значень струму і напруги на суміжних інтервалах часу, причому напруга на якорі формується системою керування і змінюється у часі, забезпечуючи пуск двигуна з обмеженням пускового струму.

Розроблений комп'ютеризований лабораторний стенд дозволяє вимірювати миттєві значення змінних стану та проводити розрахунки електричних параметрів тягових двигунів, а також досліджувати статичні, енергетичні та динамічні режими роботи електромеханічних трансмісій транспортних засобів, як у штатних режимах роботи, так і імітувати різні аварійні режими роботи, зокрема боксування.

Ключові слова: експериментальні дослідження, визначення параметрів, тяговий електропривод, тяговий електричний двигун, кар'єрний електровоз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРЬЕРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА**А. Н. Артеменко, А. П. Черный**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: aleksei.chornyi@gmail.com

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению параметров тягового электропривода постоянного тока карьерного электровоза. Исследования проведены на базе Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского с применением лабораторного исследовательского стенда с электромеханическим оборудованием, которое позволяет имитировать работу тягового электропривода, а именно проскальзывания колесных пар при изменении условий сцепления и различиях в электрических параметрах тяговых двигателей. Определение параметров осуществлялось на основе комплекса методов, основанных на измеряемых мгновенных значениях переменных состояния электропривода. Доказана эффективность применения метода пространства состояния и метода, который использует мгновенные значения тока и напряжения двигателя в квазиустановившемся режиме при питании от вентильного преобразователя энергии. Результаты, полученные в процессе исследований, свидетельствуют о возможности расчета параметров с точностью в пределах 10 %. Верификация полученных результатов проверена вычетом коэффициента детерминации и суммы квадратов отклонений для экспериментальных данных, рассчитанных на основе определенных параметров. Точность определения параметров обеспечивается использованием мгновенных значений тока и напряжения на смежных интервалах времени, причем напряжение на якоре формируется системой управления и меняется во времени, обеспечивая пуск двигателя с ограничением пускового тока. Разработанный компьютеризированный лабораторный стенд позволяет измерять мгновенные значения переменных состояния и проводить расчеты электрических параметров тяговых двигателей, а также исследовать статические, энергетические и динамические режимы работы электромеханических трансмиссий транспортных средств, как в штатных режимах работы, так и имитировать различные аварийные режимы работы, в частности боксование.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, определение параметров, тяговий електропривод, тяговий електрический двигатель, карьерный электровоз.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В даний час переважна більшість електроприводів оснащені двигунами змінного струму. Але тиристорні і

транзисторні електроприводи постійного струму, що знаходять застосування в технологічних процесах, вимагають високих показників якості регулювання в

статичних і динамічних режимах і, як і раніше, залишаються об'єктом широких досліджень [1–3]. Розвиток теорії регулювання призвів до створення складних систем регулювання з використанням модальних регуляторів, спостерігачів стану та ін., при синтезі яких потрібні дані про параметри двигуна і електроприводу. Проблема знання параметрів двигуна набуває особливої гостроти для машин, що пройшли ремонт [4]. Для тягових двигунів кар'єрних електровозів їх ремонт здійснюється на спеціалізованих ремонтних підприємствах, що забезпечують, відповідно до стандартів, відхилення у вихідних параметрах до 10 % по якірній обмотці і 2 % по обмотці збудження. Нерівномірність параметрів спричиняє нерівномірну жорсткість механічних характеристик і нерівномірний розподіл навантаження між двигунами. В цьому випадку необхідне перенаштування коефіцієнтів систем регулювання. Необхідно також відзначити, що при розрахунку коефіцієнтів вважають, що форма випрямленої напруги ідеально згладжена і пульсаціями нехтують. Насправді випрямлена напруга має складну форму, що наближається до пилкоподібної при збільшенні кутів управління, що необхідно враховувати для електроприводів з великим діапазоном регулювання.

Удавана простота діагностики машин постійного струму зумовила появу великої кількості технічних рішень [5, 6], що дозволяють в тій чи іншій мірі вирішити згадане завдання, але, як правило, складних для широкого практичного використання. Тому на практиці застосовують прості наближені вирази для розрахунку параметрів двигунів постійного струму (ДПС) за каталожними даними [7]. Все це вказує на те, що питання створення ефективного, що легко реалізується, достовірного способу визначення параметрів машин постійного струму все ще відкрите. Особливо це стосується двигунів постійного струму послідовного збудження моторколіс великовантажних кар'єрних автосамоскидів, електровозів, міського електротранспорту та ін.

Мета роботи полягає у проведенні експериментальних досліджень з визначення параметрів двигунів постійного струму послідовного збудження у динамічних режимах роботи для використання при налагоджуванні системи керування електроприводом.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Найбільш простим є визначення параметрів в режимі рухання ДПС, тобто при загальмованому якорі, що може бути легко отримано при кутах управління перетворювачем близькими до 90° (рис. 1). На рисунку сигнал струму наведено в масштабі 1:2.

В цьому випадку напруга має вигляд лінійної функції:

$$U_d(t) = U_{m1} - kt, \quad (1)$$

де U_{m1} – максимальне значення напруги при включенні тиристора, В; $k = (U_{dm1} - U_{dm2}) / \Delta t N$, U_{dm2} – значення напруги при закриванні тиристора, В; Δt – дискретність, N – кількість дискрет на інтервалі провідності тиристора.

Або у операторній формі:

$$U(p) = U_{dm1} - \frac{k}{p}.$$

Тоді рівняння для струму якоря ДПС отримаємо у вигляді:

$$i_d(p) = \frac{(p + \alpha)}{\left(p^2 + \frac{1}{T}p\right)} \frac{U_{dm1}}{L_{яц}}, \quad (2)$$

$$\text{де } T = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}, \quad \alpha = -\frac{k}{U_{dm1}}.$$

Рисунок 1 – Миттєві значення напруги $U_d(t_i)$ і струму $I_d(t_i)$ якоря

Оригінал рівняння (2):

$$i_d(t) = \frac{U_{dm1}}{L_{яц}} \left[T^2 \left(\alpha - \frac{1}{T} \right) e^{-\frac{t}{T}} + \alpha T t + T^2 \left(\frac{1}{T} - \alpha \right) \right],$$

або

$$i_d(t) = \frac{U_{dm1}}{L_{яц}} \left[\left(\frac{L_{яц}}{R_{яц}} \right)^2 \left(\alpha - \frac{R_{яц}}{L_{яц}} \right) e^{-\frac{t}{\frac{L_{яц}}{R_{яц}}}} + \alpha \frac{L_{яц}}{R_{яц}} t + \left(\frac{L_{яц}}{R_{яц}} \right)^2 \left(\frac{L_{яц}}{R_{яц}} - \alpha \right) \right]. \quad (3)$$

Тепер завдання визначення параметрів можна звести до знаходження коефіцієнтів рівняння (3) за вимірним дискретним значенням струму якоря $I_d(t_i)$ в t_i моменти часу. Чисельне рішення рівняння (3) може бути віднесено до класу математичних задач, рішення яких нестійкі до малих змін вихідних даних. Вони характеризуються

тим, що як завгодно малі зміни вихідних даних можуть призводити до доволі великих змін рішень. Завдання такого типу, по суті є погано поставленими, вони належать до класу некоректно поставлених задач. Якщо вихідні дані відомі наближено, а в нашому випадку похибки вимірювання дають саме наближені дані, то зазначена нестійкість призводить до практично неоднозначного рішення в рамках заданої точності рішення і до великих труднощів в з'ясуванні оцінки одержуваного наближеного рішення.

Одним із шляхів звуження неоднозначності знаходження наближеного рішення є застосування принципу відбору можливих рішень з використанням додаткової інформації, тобто отримання квазірішення.

Така додаткова інформація може бути отримана в результаті знаходження часткових рішень в «особливих» точках кривої зміни струму якоря $i_1(t)$:

1. У момент включення тиристора $t = t_0 = t(0) = 0$, коли $i_d(t_0) = 0$, $\frac{di_d(0_+)}{dt} \neq 0$.

Шляхом диференціювання (3), отримаємо:

$$\frac{di_d(t)}{dt} = \frac{U_{dml}}{L_{яц}} \left[-T \left(\alpha - \frac{1}{T} \right) + \alpha T \right]. \quad (4)$$

Отже, для $t = 0$ отримаємо значення індуктивності якірного кола ДПС як:

$$L_{яц} = \frac{U_{dml}}{\frac{di_d(0_+)}{dt}}. \quad (5)$$

Чисельне диференціювання можна виконати за відомим дискретним значенням струму $i_1(t)$ шляхом зворотнього диференціювання з використанням виразу:

$$\frac{di(0_+)}{dt} = \frac{1}{12\Delta t} [48i(t_1) - 36i(t_2) + 16i(t_3) - 3i(t_4)].$$

2. У момент $t = t_1$, коли $\frac{di_d(t_1)}{dt} = 0$, $i_d(t_1) \neq 0$.

Для $t = t_1$ отримаємо значення активного опору якірного кола ДПС як:

$$R_{яц} = \frac{U_d(t_1)}{i_d(t_1)}. \quad (6)$$

Тепер визначення параметрів можна звести до вирішення завдання їх чисельного знаходження методами прямої мінімізації, беручи для функції (3) її сіткове наближення $I_i = I_d(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, тобто знаходження мінімуму функції n змінних, методи вирішення якої мають досить універсальний характер:

$$\sum_{i=1}^n [I_d(t_i) - i_d(t_i)]^2 = 0. \quad (7)$$

З огляду на те, що при розрахунку параметрів ДПС пропонувані методом необхідні знання як

точних миттєвих значень сигналу струму $I(t_i)$, так

і першої її похідної $\frac{dI(t_i)}{dt}$ в різних точках i , з

огляду на наявність похибки вимірювання миттєвих значень струму, доцільно виконувати апроксимацію експериментального набору вимірюваних значень струму методами регресійного аналізу. Наприклад, поліноміальною залежністю ступеня n :

$$\tilde{i}(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5. \quad (8)$$

Для підвищення точності рішення системи рівнянь (7) доцільно в праві частини підставляти не виміряні значення миттєвих значень струму $I(t_i)$, а саме отримані з (8). Тоді система рівнянь (7) набуде вигляду:

$$\sum_{i=1}^N [\tilde{i}(t_i) - i(t_i)]^2 = 0. \quad (9)$$

На рис. 2 наведено результати розрахунків щодо визначення параметрів ДПС, на підставі яких одержано залежність струму якоря: 1 – експериментальна, 2 – для параметрів розрахованих за цією розрахунковою методикою.

Рисунок 2 – Експериментальна (1) та розрахункова (2) залежності струму якоря ДПС

Ідентифікація параметрів ДПС за цією методикою проводилась для тягового електродвигуна (ТЕД) типу ДК-722-А, результати зведено до табл. 1. Миттєві значення струмів і напруг отримані шляхом моделювання системи ТП-ДПС з використанням методу перемикаючих функцій. Оцінкою адекватності отриманого рішення, на нашу думку є збіг миттєвих розрахованих і експериментальних значень струму якоря (рис. 3). Міру збігу було оцінено за величиною коефіцієнта детермінації:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [\tilde{I}_d(t_i) - I_{dcp}]^2}{\sum_{i=1}^N [I_d(t_i) - I_{dcp}]^2}, \quad (10)$$

де $I_{dcp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_d(t_i)$ – середнє значення струму

якоря на ділянці провідності тиристора, отриманого за експериментальними даними; $\tilde{I}_d(t_i)$ – значення струму якоря отримані рішенням рівняння (3) при підстановці в нього знайдених з (9) параметрів $R_{яц}$ і $L_{яц}$.

Таблиця 1 – Оцінка збігу експериментальних і розрахункових даних

Параметр	Точне значення	За системою рівнянь (5)–(6)	Відносна погрішність, %
$R_{яц}$, Ом	0,04288	0,04056	5,4
$L_{яц}$, Гн	0,0006	0,00058	3,3
R^2		0,990909	

Таким чином, розроблений метод визначення параметрів за перехідними характеристиками напруги і струму якоря в дискретні моменти часу в квазіусталеному режимі показав можливість визначення та уточнення параметрів ДПС. Збіг розрахункової і експериментальної кривої струму дозволяє оцінити точність визначення параметрів, якщо паспортні дані наближені, наприклад, після ремонту ДПС.

Пусковий режим роботи ДПС

Для підтвердження адекватності застосування методу простору станів для ідентифікації параметрів ТЕП в режимі реального часу були проведені відповідні дослідження. В якості двигунів прийняті двигуни послідовного збудження з номінальною потужністю 120 Вт, напругою живлення 110 В, струмом 2 А, номінальною швидкістю 600 об/хв з живленням від нерегульованого однофазного випрямляча. Визначення параметрів здійснювалось в пусковому режимі (рис. 3).

Рисунок 3 – Машинограми пуску дводвигунного ТЕП

З одного боку, відсутність датчика швидкості ускладнює використання виразів (1)–(5), так як не дозволяє сформувати матриці R і Q . З іншого боку – висока зашумленість вимірюваних сигналів не дозволяє використовувати окремі дискретні значення для визначення параметрів силового кола ТЕП (рис. 4, 5). Для отримання рішення використовуємо принцип відбору можливих рішень з використанням додаткової інформації:

– закінчення комутації і відмикання діода $t = t_0$ отримаємо:

$$L_e = \frac{U(t_0)}{\frac{dI_d(t_0)}{dt}}, \quad (11)$$

– в момент часу $t_{\max}$, коли $\frac{dI_d(t_{\max})}{dt} = 0$:

$$U(t_{\max}) - (U_1(t_{\max}) + I_{d,\max} R_1) - (U_2(t_{\max}) + I_{d,\max} R_2) = I_{d,\max} (R_1 + R_2),$$

або

$$R_e = R_1 + R_2 = \frac{[U(t_{\max}) - U_1(t_{\max}) - U_2(t_{\max})]}{2I_{d,\max}}. \quad (12)$$

З огляду на те, що при розрахунку параметрів силового кола пропонувані методом необхідне знання, як точних миттєвих значень сигналів $U(t)$, $U_1(t)$, $U_2(t)$, $I_d(t)$, так і першої похідної струму $\frac{dI(t_i)}{dt}$ в різних точках і, з огляду на наявність похибки вимірювання миттєвих значень струму, доцільно виконувати апроксимацію

експериментального набору вимірюваних значень сигналів методами регресійного аналізу.

Рисунок 4 – Фрагмент машинограми пуску ТЕП для розрахунку індуктивності якорного кола

Рисунок 5 – Фрагмент машинограми пуску ТЕП для розрахунку активного опору якорного кола

При цьому використовуємо підхід, заснований на поліноміальній апроксимації ділянки струму, що досліджується, поліномом ступеня 2:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_d(t_i) &= \text{regress}(t_i, I_d(t_i)); \\ \tilde{I}_d(t_i) &= a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2. \end{aligned} \quad (13)$$

По аналогії з попереднім експериментом, використання отриманих регресійних залежностей дозволяє підставляти в рівняння (5) і (6) не виміряні значення миттєвих значень струму $I_d(t_i)$, а значення $\tilde{I}_d(t_i)$. Використання регресійної моделі (13) дозволяє отримати аналітичні вирази для визначення «особливих» точок для визначення параметрів:

$$\frac{dI_d(t_0)}{dt} = a_1 + 2a_2 t_0;$$

$$t_{\max} = -\frac{a_1}{2a_2}.$$

З використанням виразів (11) і (12) розраховані параметри ТЕП. Результати розрахунку діапазону відносної похибки визначення параметрів наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Діапазон похибки визначення параметрів силового кола ТЕП

Відносна похибка визначення активного опору R_e	Відносна похибка визначення індуктивності L_e
+12,4 –9,21	+8,3 –5,6

ВИСНОВКИ. Виконані експериментальні дослідження з визначення параметрів силового кола дводвигунного ТЕП з двигунами постійного струму послідовного збудження дозволили отримати прості методи розрахунку еквівалентних індуктивності і активного опору. Застосування цих методів можливо як для загальмованого ТЕД, так і в усталеному його режимі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Клепиков В. Б., Кузнецов Б. И., Богаенко И. Н., Гуль А. И., Грабовский Г. Г., Рюмшин Н. А., Самецкий А. А., Шавловский С. Н. Многократноинтегрирующие системы управления. Киев : НВК «КІА», 1998. 244 с.
2. Акимов Л. В. и др. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния. Харьков : ХГТУ, 1998. 117 с.
3. Садовой А. В., Сухинин Б. В., Сохина Ю. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. Киев : ИСИМО, 1996. 298 с.
4. Артеменко А. Н., Сушко Д. Л. Экспериментальные исследования и определение параметров электропривода постоянного тока. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. 2005. Вип. 2/2005 (31). С. 33–36.
5. Башарин А. В., Постников Ю. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ : Учебное пособие для вузов. 3-е изд. Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. 512 с.
6. Бешта А. С. Використання дискретної моделі струму силового кола електропривода з машиною постійного струму незалежного збудження для ідентифікації електромагнітної та електромеханічної постійних часу. Гірничя електромеханіка та автоматика : збірник наукових праць. 2000. № 64. С. 54–56.
7. Справочник по автоматизированному электроприводу. Под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 616 с.

EXPERIMENTAL STUDIES ON DETERMINING THE PARAMETERS OF ELECTRIC MOTORS OF THE QUARRY ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC DRIVE

A. Artemenko, O. Chornyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. Email: alekseii.chornyi@gmail.com

Purpose. The purpose of the work is to conduct experimental studies to determine the parameters of DC motors of sequential excitation in dynamic modes of operation for use in setting up the control system of the electric drive. The paper presents the results of experimental studies to determine the parameters of the traction electric drive of direct current quarry electric locomotive. The research was conducted on the basis of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University with the use of a laboratory research stand with electromechanical equipment that simulates the operation of a traction drive, namely slippage of traction wheels when changing clutch conditions and differences in electrical parameters of traction motors. **Methodology.** The parameters were determined on the basis of a set of methods based on the measured instantaneous values of the state variables of the electric drive. The efficiency of application of the method of state space and the method which uses instantaneous values of current and voltage of the motor in the quasi-constant mode at power supply from the valve energy converter is proved. **Results.** The results obtained in the course of research indicate the possibility of calculating the parameters with an accuracy of 10 %. The verification of the obtained results is checked by subtracting the coefficient of determination and the sum of the squares of the deviations for the experimental data calculated on the basis of certain parameters. **Originality.** The accuracy of parameter determination is ensured by the use of instantaneous values of current and voltage at adjacent time intervals, and the voltage at the armature is formed by the control system and changes over time, ensuring the start of the motor with starting current limitation. **Practical value.** The developed computerized laboratory stand allows to measure instantaneous values of state variables and to carry out calculations of electric parameters of traction engines, and also to investigate static, power and dynamic operating modes of electromechanical transmissions of vehicles, both in regular operating modes, and to simulate various emergency operating modes, in particular. Figures 5, tables 2, references 7.

Key words: experimental research, determination of parameters, traction electric drive, traction electric motor, quarry electric locomotive.

REFERENCES

1. Klepikov, V.B., Kuznetsov, B.I., Bogaenko, I.N., Gul', A.I., Grabovskiy, G.G. et al. (1998). *Mnogokratnointegriruyushchie sistemy upravleniya [Multiple-integrating control systems]*. Kiev : NVK «KIA» [in Russian]
2. Akimov, L.V. et al. (1998). *Sistemy upravleniya elektropriivodami postoyannogo toka s nablyudatelyami sostoyaniya [Control systems for direct current electric drives with state observers]*. Kharkiv : KHGTU [in Russian]
3. Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V. & Sokhina, Yu.V. (1996). *Sistemy optimal'nogo upravleniya pretsizionnymi elektropriivodami [Optimal control systems for precision electric drives]*. Kyiv : ISIMO. [in Russian]
4. Artemenko, A.N., & Sushko, D.L. (2005). Eksperimental'nye issledovaniya i opredelenie parametrov elektropriivoda postoyannogo toka. *Visnik Kremenchuts'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu*. 2 (31). 33–36. [in Russian]
5. Basharin, A.V., & Postnikov, Yu.V. (1990). *Primery rascheta avtomatizirovannogo elektropriivoda na EVM [Examples of calculating an automated electric drive on a computer]*. Leningrad : Energoatomizdat. [in Russian]
6. Beshta, A.S. (2000). Viktoristannya diskretnoi modeli strumu silovogo kola elektropriivoda z mashinoyu postiynogo strumu nezalezhnogo zbudzhennya dlya identifikatsii elektromagnitnoi ta elektromekhanichnoi postiynikh chasu. *Girnichna elektromekhanika ta avtomatika*. 64. C.54–56. [in Ukrainian]
7. Eliseev, V.A. & Shinyanskogo, A.V. (1983). *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektropriivodu [Handbook on the automated electric drive]*. Moscow : Energoatomizdat. [in Russian]

Стаття надійшла 16.11.2020.