

В. П. ШАЙДА, О. Ю. ЮР'ЄВА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ЯКОРЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Знання величини моменту інерції якоря двигуна необхідно для ефективного управління електроприводом. Зазвичай цю величину споживач отримує з заводського каталогу або габаритного креслення. Зазвичай використовують спрощені способи визначення моменту інерції, які дають значну похибку. Тому застосовують експериментальні методи, що дають більш наближені до дійсності результати. Виконано експериментальну оцінку точності визначення (ідентифікації) моменту інерції якоря двигуна постійного струму типу 4ПНЖ200М методами спадного вантажу і вільного вибігу. Дослідження виконувалося на випробувальній станції підприємства виробника вказаного двигуна. Встановлено відмінність результатів експериментального розрахунку від каталожних даних двигуна постійного струму, що вказує на некоректність довідкової інформації. Отримані результати не дають остаточно визначити, який з методів найкраще, виходячи з критерію точності. Це спонукає до подальшого проведення досліджень проблеми ідентифікації параметрів двигуна постійного струму. Незважаючи на те, що експериментальні методи вільного вибігу і спадного вантажу широко відомі, тонкощі їх використання будуть цікаві як дослідникам так і виробникам двигунів постійного струму. Величина моменту інерції якоря двигуна постійного струму може також використовуватися для оцінки динамічності двигунів однакової потужності, але різних виробників.

Ключові слова: ідентифікація моменту інерції двигуна постійного струму, управління електроприводом, метод спадного вантажу, метод вільного вибігу, динамічність електродвигуна, ідентифікація параметрів електродвигуна.

Для ефективного управління електроприводом необхідно знати величину моменту інерції якоря двигателя. Обычно эту величину потребитель узнает из заводского каталога или габаритного чертежа. Для его определения используют упрощенные способы определения момента инерции, которые дают значительную погрешность. Поэтому применяют экспериментальные методы, которые дают более точные, приближенные к действительности результаты. Выполнена экспериментальная оценка точности определения (идентификации) момента инерции якоря двигателя постоянного тока типа 4ПНЖ200М методами падающего груза и свободного выбега. Исследование выполнялось на испытательной станции предприятия производителя указанного двигателя. Установлено отличие результатов экспериментального расчета от каталожных данных двигателя постоянного тока, что указывает на некорректность справочной информации. Полученные результаты не дают окончательно определить, какой из методов лучше, исходя из критерия точности. Это побуждает к дальнейшему проведению исследований проблемы идентификации параметров двигателя постоянного тока. Несмотря на то что экспериментальные методы свободного выбега и падающего груза широко известны, тонкости их использования будут интересны как исследователям, так и производителям двигателей постоянного тока. Величина момента инерции якоря двигателя постоянного тока также может использоваться для оценки динамичности двигателей одинаковой мощности, но разных производителей синхронных генераторов.

Ключевые слова: идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока, управление электроприводом, метод падающего груза, метод свободного выбега, динамичность электродвигателя, идентификация параметров электродвигателя.

Knowledge of the moment of inertia of an armature of an engine is necessary for effective control of the electric drive. Typically, this value is obtained from the factory catalog or the overall drawing. Usually, simplified methods of determining the moment of inertia are used, which give a significant error. Therefore, experimental methods are used to give results that are closer to reality. The experimental estimation of the accuracy of determination (identification) of the moment of inertia of an armature of a direct current motor of type 4PNZh200M by the methods of falling load and free run is made. The study was performed at the test station of the manufacturer of the engine. The difference between the results of the experimental calculation and the catalog data of the DC motor was found, which indicates the incorrect information. The results obtained do not conclusively determine which of the methods is best, based on the criterion of accuracy. This leads to further research into the problem of identifying the DC motor parameters. Despite the fact that experimental methods of free run and falling load are widely known, the intricacies of their use will be of interest to both researchers and manufacturers of DC motors. The moment of inertia of an armature of a DC motor can also be used to estimate the dynamics of engines of the same power, but different manufacturers.

Keywords: identification of the moment of inertia of the DC motor, electric drive control, falling load method, free run-out method, motor dynamics, motor parameter identification.

Постановка проблеми. Більшість авторів як класичних підручників з електропривода, так і наукових робіт з теорії керування електроприводом постійного струму мають однакову думку – для підвищення якості керування та реалізації оптимальних схем управління необхідно достатньо точно ідентифікувати параметри електропривода [1–6].

Одним з таких параметрів є момент інерції ротора (або маховий момент) електродвигуна. Він потрібен для визначення електромеханічної сталої часу, яка визначає характер перехідних процесів в механічній частині електропривода [1, 2].

Значення моментів інерції якорів (роторів) електродвигунів наводяться у відповідних каталогах і довідниках по електричним машинам [2]. Зазвичай він розраховується при проектуванні електричної машини та вимагає знання геометрії, матеріалу та параметрів всіх елементів конструкції. Розрахунок

моменту інерції є досить трудомістким процесом. Але виробники електричних машин часто полегшують собі роботу та використовують наближені формули, що мають значну похибку. В результаті споживач не знає наскільки відповідають дійсності дані, надані виробником.

При відсутності цих даних момент інерції якоря електродвигуна або момент інерції електропривода в цілому може визначатися експериментально. Для визначення або ідентифікації моменту інерції дослідним шляхом зазвичай використовують методи: крутильних коливань, маятникових коливань, спадного вантажу та вільного вибігу [2, 4]. Термін «ідентифікація» з'явився з англійських наукових статей з електромеханіки та використовується при визначенні параметрів електричних машин непрямыми методами. Натепер цей термін застосовується в україномовній науковій літературі та є ключовим словом.

Вибір методу ідентифікації моменту інерції залежить від умов проведення експерименту, наявності обладнання, приладів, можливості розбирання двигуна і т. ін. На нашу думку, яка збігається з думкою більшості фахівців, найбільш зручними є методи спадного вантажу та метод вільного вибігу через те, що інші методи потребують розбирання електродвигуна. Але з точки зору простоти виконання та мінімальності часу проведення, то тут найбільші переваги має метод спадного вантажу.

Зручність застосування конкретного методу експериментального визначення моменту інерції електродвигуна не є визначальним критерієм вибору методу. Більшу вагу мають такі критерії, як точність визначення та габарит двигуна. Методи крутильних та маятникових коливань мають обмеження по потужності двигуна, а метод вільного вибігу рекомендовано використовувати для двигунів потужністю більше 100 кВт [7].

Загалом похибка визначення моменту інерції ротора вказаними методами не перевищує 10 %, але метод вільного вибігу вважається більш точним.

Натепер широко застосовуються методи непрямого визначення моменту інерції ротора через розрахунки рівнянь, параметри яких є вхідними сигналами з датчиків струму, частоти обертання та ін. Це також додає похибку, яка може складати до 35 % [6]. Тому знання моменту інерції ротора двигуна окремо, без привода, дозволить підвищити ефективність управління електроприводом.

Аналіз теперішнього стану досліджень та їх актуальність. Наукові роботи по ідентифікації моменту інерції електродвигуна умовно можна розбити на дві групи. До першої групи входять роботи по створенню комплексних засобів ідентифікації та керування електроприводом, до другої – роботи, пов'язані з модифікацією та покращенням існуючих експериментальних методів визначення моменту інерції роторів електродвигунів.

Найбільша частина дослідників та науковців вважають, що ідентифікація параметрів повинна виконуватися в динамічному режимі. Тобто безперервно або дискретно в процесі роботи електропривода. Для цього вони розробляють спеціальні методи, комплекси та обладнання, які надалі проходять тестування. Це виключає можливість використання вказаних експериментальних методів для визначення моменту інерції ротора електродвигуна [4]. Але деякі з них, незважаючи на це, використовують результати, отримані експериментальними методами, для розробки математичних моделей та алгоритмів керування електроприводом.

В роботі [3] визначалася залежність моменту інерції та моменту опора механізму від кута повороту валу двигуна. Але для цього потрібно мати показання датчиків: струму, частоти обертання та кута повороту ротора. Зрозуміло, що наявність таких датчиків ускладнює електропривод. В роботі [5] розроблено математичну модель, яка використовує як вхідний сигнал струм якоря, отриманий з датчику Холла. Запропоновану математичну модель перевірено

на лабораторній установці. В роботі [6] момент інерції електропривода безколекторного двигуна постійного струму визначається за часовими характеристиками з використанням інтерполяційного методу. Як бачимо, в роботах розробляється математична модель та використовуються поточні дані, що вимірюються в процесі роботи двигуна.

В роботі [8] розроблено спеціальну установку та відповідне програмне забезпечення для визначення моменту інерції тіл, що обертаються, та мають складну форму. В основу принципу дії установки покладено метод вільного вибігу. І хоча робота не має прямого зв'язку з визначенням моменту інерції двигунів постійного струму, вона дає уявлення про розвиток систем ідентифікації моменту інерції обертових тіл та важливість цього напрямку досліджень.

Існуючі експериментальні методи визначення моменту інерції якоря двигуна постійного струму не завжди задовольняють вимогам дослідників, тому вони їх модифікують. Так в роботі [9] запропоновано безконтактний спосіб ідентифікації моменту інерції ротору електричних машин. А саме, використання акустичного способу реєстрації параметрів при використанні методу вільного вибігу. І хоча автори дослідження наводять переваги цього методу – безконтактність, автоматизація вимірювань та обробки даних, він має і явні недоліки.

Експериментальна ідентифікація моменту інерції обертових електричних машин розглядається в роботі [10]. І хоча дослідження виконується на прикладі асинхронного двигуна, важливість та актуальність експериментальних методів доводиться тим, що вони дозволяють визначити не тільки момент інерції, але і момент механічних втрат та уточнити ККД електродвигуна.

Вчені багатьох країн досліджують системи ідентифікації електричних і механічних параметрів електродвигунів. В роботі [11] розглядається створення такої системи на прикладі двигуна постійного струму. А в роботі [12] розглядається параметрична оцінка двигуна постійного струму, одним із параметрів є момент інерції двигуна.

Використання значення моменту інерції якоря двигуна постійного струму як складової параметру динамічності електродвигуна при порівнянні двигунів постійного струму різних виробників показано в роботі [13]. В ній запропоновано використовувати показник динамічних властивостей двигуна

$$a = \frac{M}{J}, \quad (1)$$

де M – номінальне значення обертального моменту; J – момент інерції якоря.

В роботі [13] за допомогою цього показника було проаналізовано низку серій двигунів постійного струму вітчизняного та зарубіжного виробництва та надано рекомендації щодо вибору двигунів.

Отже, момент інерції якоря двигуна постійного струму потрібен не тільки для керування електроприводом, а також як показник оцінки динамічності двигуна. Тобто його визначення – важливе та актуальне завдання, хоча і складається враження що воно вже вирішено.

Постановка задачі. Зважаючи на актуальність вказаної проблеми, завданням цієї роботи є проведення експериментальних досліджень з визначення моменту інерції якоря двигуна постійного струму методами спадного вантажу та вільного вибігу.

Мета дослідження полягає в оцінці точності визначення (ідентифікації) моменту інерції якоря двигуна постійного струму методами спадного вантажу та вільного вибігу і порівняння результатів розрахунку з каталожними даними. Отримання експериментальних даних дозволяє проводити подальше дослідження питання ідентифікації параметрів двигуна постійного струму.

Ідентифікація моменту інерції якоря двигуна постійного струму методом спадного вантажу. Сутність методу спадного вантажу описано в багатьох підручниках та наукових роботах, тому наведено лише короткий опис, що представлено в роботі [14]. Тим паче, що в ній розглядаються обидва обраними методи.

На кінець валу двигуна або шків, який надіто на вал, навивають кілька витків шнура. До іншого кінця шнура прикріплюють вантаж з відомою масою m і опускають на деяку висоту h . При опусканні вантаж повертає ротор, долаючи тертя в підшипниках двигуна. При цьому вимірюють час t , за який вантаж опуститься на висоту h . Схему дослідження показано на рис. 1.

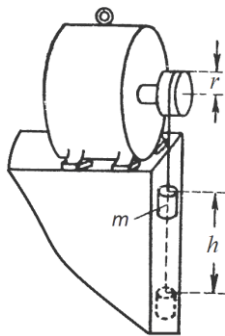


Рис. 1 – Схема дослідження методом спадного вантажу [2]

Згідно з методикою момент інерції якоря двигуна розраховується за формулою:

$$J_m = m \cdot r^2 \cdot \left(\frac{g \cdot t^2}{2h} - 1 \right), \quad (2)$$

де m – маса вантажу в кілограмах; r – радіус шківів, на який навивається шнур в метрах; g – прискорення вільного падіння, яке становить $9,81 \text{ м/с}^2$; t – час, за який вантаж опускається на відповідну висоту в секундах; висота опускання вантажу h виражена в метрах.

Для досліджень було обрано двигун постійного струму послідовного збудження типу 4ПНЖ200М виробництва АТ «Електромашина» (м. Харків) [15] потужністю 60 кВт, номінальною напругою 340 В, номінальним струмом обмотки якоря 197 А та частотою обертання 3000 об/хв в номінальному режимі. Двигун призначено для приводу вентилятора охолодження гальмівних резисторів на тепловозі. На рис. 2 наведено табличку з номінальними даними двигуна.



Рис. 2 – Табличка з номінальними параметрами двигуна 4ПНЖ200М даними

Дослідження експериментальними методами проводилися на випробувальній станції АТ «Електромашина» (м. Харків). При виконанні дослідів використовувалося повірене обладнання випробувальної станції підприємства.

На рис. 3 показано двигун, що підготовлено до проведення дослідів. Замість шківів на вільний кінець валу двигуна встановлено напівмуфту, на неї намотувався шнур, до якого було прикріплено вантаж. Зовнішній діаметр поверхні, на яку навивався шнур, становив 135 мм (рис. 4). Тоді радіус шківів з (1) становитиме $r = 0,0675 \text{ м}$.

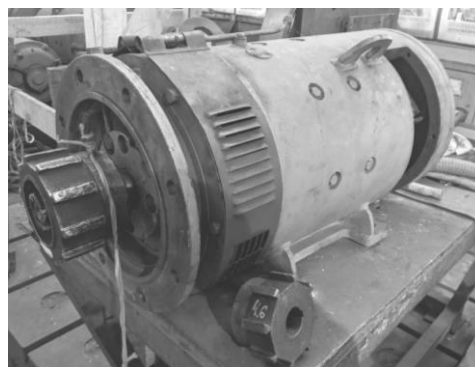


Рис. 3 – Двигун 4ПНЖ200М, що підготовано для проведення дослідів

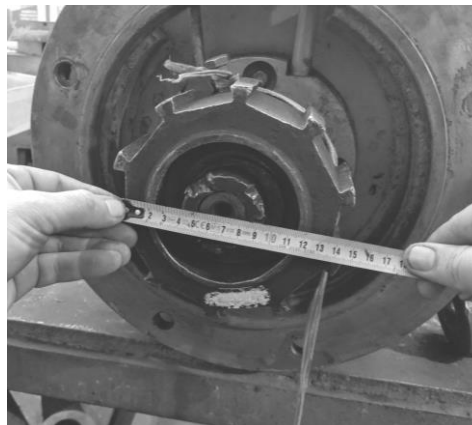


Рис. 4 – Вимірювання зовнішнього діаметру «шківів»

Поруч з двигуном на рис. 3 можна побачити тарований вантаж, маса якого становить 4,6 кг. Висота опускання вантажу h дорівнювала 0,4 м. Дослідження проводилися п'ять разів. Вимірний середній час, за який вантаж опускається на висоту 0,4 м, становив 1,9 с.

Підставляємо отримані значення до формули (1):

$$J_m = 4,6 \cdot 0,0675^2 \cdot \left(\frac{9,81 \cdot 1,9^2}{2 \cdot 0,4} - 1 \right) = 0,907 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Згідно з каталожними даними підприємства (на габаритному кресленнику) момент інерції двигуна 4ПНЖ200М становить $0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, а за результатами дослідів – $0,907 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Як бачимо, результат дослідів відрізняється в три рази, це свідчить про те, що метод спадного вантажу не підходить для досліджуваного двигуна або при проведенні дослідження не були враховані якісь властивості. Результати цього етапу досліджень було оприлюднено в [16].

На нашу думку, ця похибка виникла через те, що двигун був холодний і мастило в підшипниках загусло. Вважаємо за необхідне попередньо розігрівати двигун до температури нормального режиму.

При наступному досліді, щоб виключити вплив загуслого мастила, перед вимірюванням величин двигун проробив дві години для нагрівання.

Але, як зазвичай це буває, шнур що використовувався в минулий раз не знайшли, тому взяли новий, але при цьому змінилася висота, на яку опускався вантаж. Загальна довжина шнуру від шківу до вантажа становила 740 мм. Початкова відстань становила 150 мм, а висота опускання вантажу – це різниця між ними в $0,059 \text{ м}$.

Проведення серії вимірів та подальших розрахунків дали значення моменту інерції якоря $0,85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, тобто нагрів підшипників (стан мастила) впливає, але не значно. Далі ми вирішили подивитися, як зміниться величина моменту інерції якоря, якщо підняти щітки.

Результати розрахунків показали, що при цьому момент інерції якоря вала зменшився на $0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ та став $0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Тоді ми зрозуміли, що величина моменту інерції якоря наведена в заводському каталозі, це тільки розрахункова величина і не враховує тертя підшипників, щіток та вентилятора. До того ж при розрахунках не враховувався момент інерції шківів, тобто напівмуфти, а це також додає відхилення до значення моменту інерції якоря.

Не маючи змоги виконати розрахунки моменту інерції при тримірному моделюванні (кресленники двигуна є комерційною таємницею підприємства), вирішили перевірити момент інерції двигуна через формулу визначення динамічного моменту інерції двигуна постійного струму [17]:

$$J_{\text{dyn}} = 0,65 \cdot d_a^4 \cdot (l_a + 0,3d_a + 0,75P_N) \cdot 10^{-12}, \quad (2)$$

де d_a – зовнішній діаметр якоря, становить 202 мм; l_a – довжина осердя якоря, становить 170 мм; P_N – номінальна потужність двигуна, дорівнює 60 кВт.

При підстановці отриманих значень до (2) отримується:

$$J_{\text{dyn}} = 0,65 \cdot 202^4 \cdot (170 + 0,3 \cdot 202 + 0,75 \cdot 60) \cdot 10^{-12} = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Отримане значення динамічного моменту інерції двигуна збігається з наданим каталожним.

Ідентифікація моменту інерції якоря двигуна постійного струму методом вільного вибігу. Цей метод використовується як для визначення моменту інерції ротора електродвигуна, так і для визначення потужності втрат. Метод має другу назву – метод «самогальмування», та доволі докладно освітлюється в ГОСТ 25941. Для опису фізичної сутності метода, як і в попередньому випадку використаємо роботу [14], а сам процес дослідів та розрахунки виконано згідно [7].

Електродвигун, що досліджується, в режимі неробочого ходу (без навантаження) розганяється до частоти обертання, яка відповідає усталеному режиму роботи. Заздалегідь зазначимо, що для цієї частоти обертання має бути визначена потужність втрат. Надалі двигун вимикається від мережі живлення.

Коли двигун вимикається від мережі при усталеній частоті обертання, то через накопичену кінетичну енергію двигун вповільнює своє обертання, доки не зупиниться. Чим більше гальмівне зусилля сил тертя і чим менший запас кінетичної енергії, тим швидше буде сповільнитися двигун. Під час гальмування потрібно знімати показання частоти обертання залежно від часу, починаючи з моменту вимикання від мережі живлення і до моменту повної зупинки двигуна.

Отримана залежність частоти обертання від часу $n(t)$ є кривою самогальмування (рис. 5).

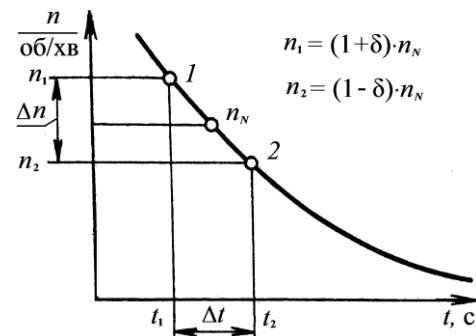


Рис. 5 – Залежність $n(t)$, крива самогальмування

При номінальному струмі збудження розрахунок виконується по формулі [7]:

$$J_m = \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \cdot P_o \cdot \frac{\Delta t}{(n_N \cdot \Delta n)}, \quad (3)$$

де P_o – втрати в режимі неробочого ходу, визначаються в ватах; Δt – проміжок часу, за який частота обертання змінюється на величину Δn , вимірюється в секундах,

$\Delta t = t_2 - t_1$; n_N – номінальна частота обертання, в нашому випадку дорівнює 3065 об/хв; Δn – різниця між верхнім та нижнім значенням частоти обертання, $\Delta n = n_2 - n_1$.

Для дослідження використовувався той самий двигун 4ПНЖ200М (див. рис. 3). Верхня межа частоти обертання двигуна, яку вдалося досягнути, становила 3327 об/хв. На жаль для вимірювання частоти обертання використовувався стробоскопічний тахометр, який давав певну дискретність та деяку затримку. Після проведення дослідів було побудовано залежність $n(t)$ (рис. 6, крива 1).

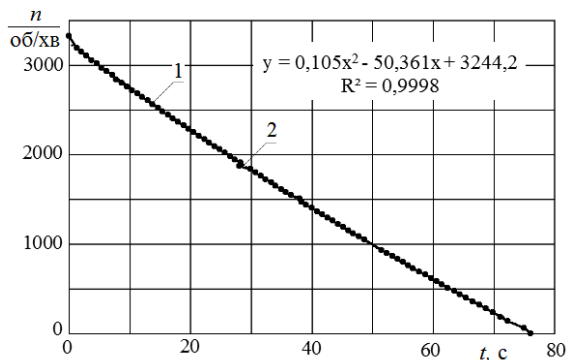


Рис. 6 – Залежність $n(t)$ 1 для двигуна 4ПНЖ200М та її поліноміальна апроксимація 2

Інтервали часу при досліді не були однаковими, тому для їх вирівнювання використовувалась поліноміальна апроксимація побудованої залежності $n(t)$ (рис. 6 крива, 2). Там же (див. рис. 6) наведено її рівняння, яке отримано за допомогою програмного комплексу MS Excel. Надалі використовується рівняння поліноміальної апроксимації, що дозволяє брати однакові інтервали частоти обертання.

Величину втрат в режимі неробочого ходу було взято з протоколу заводських випробувань вказаного двигуна. Для нашого випадку при частоті обертання 3065 об/хв втрати становили 2126 Вт.

Для розрахунків було обрано відносний інтервал змінювання частоти обертання $\delta = 0,01$ (див. рис. 5), тоді інтервал зміни частоти обертання $\Delta n = 100$ об/хв за проміжок часу $\Delta t = 2,17$ с. Отримані значення підставляються у (3):

$$J_m = \left(\frac{30}{\pi}\right)^2 \cdot 2126 \cdot \frac{2,17}{(3065 \cdot 100)} = 1,37 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Аналіз результатів розрахунку свідчить, що дані, наведені в заводському каталозі, значно відрізняються від розрахункових, отриманих експериментальними методами. Для наочності результати зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку моменту інерції якоря

Параметр	Методи розрахунку		Каталожні дані
	спадного вантажу	вільного вибігу	
Момент інерції J , кг·м ²	0,85	1,37	0,3

Різниця між результатами, отриманими експериментально, становить трохи більше 30 %, а від даних заводського каталогу експериментальні результати відрізняються в рази. Тобто мають рацію автори більшості робіт, що створюють свої аналітичні системи та визначають момент інерції якоря двигуна самостійно. Автори статті більш схильні довіряти точності методу вільного вибігу.

Висновки.

1. Результати розрахунків засвідчили, що в заводському каталозі наводиться значення так званого динамічного моменту інерції якоря двигуна постійного струму. Воно суттєво відрізняється від значень моменту інерції, отриманих експериментальними методами. Необ-

хідно провести перевірку – наскільки експериментально отриманий момент інерції двигуна відповідає чистому моменту інерції двигуна, без врахування моменту тертя.

2. З двох методів, які оцінювалися, найбільш простим та зручним є метод спадного вантажу. Найбільш складним у виконанні та зі значним обсягом розрахунків є метод вільного вибігу. Фактично ще потрібно виконати дослід неробочого ходу та визначити втрати, що потребує значного часу. Вважаємо, що метод спадного вантажу не зовсім пасує для двигуна, що досліджувався. До того ж не було обладнання для чіткої фіксації моменту опускання вантажу (людський фактор). Вважаємо більш точним метод вільного вибігу.

3. Визначення моменту інерції якоря двигуна стосується класу спеціальних випробувань електричних машин і не всі підприємства мають відповідне обладнання. Не зважаючи на ці ускладнення дослідження будуть подовжені.

Список літератури

1. Зеленев А. Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів : підручник / А. Б. Зеленев; Донбас. держ. техн. ун-т. – Луганськ : Ноулідж, 2010. – 670 с.
2. Колб Ант. А. Теорія електроприводу: навчальний посібник / Колб Ант.А., Колб А.А. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
3. Орловский И. А. Идентификация момента инерции и момента сопротивления в электроприводе постоянного тока // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2005. – № 1. – С. 140–144.
4. Стельмашук С. В. Определение момента инерции электропривода по кривой разгона методом Симоу / С. В. Стельмашук // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 103–113.
5. Рубанов В. Г. Идентификация момента инерции якоря двигателя постоянного тока и нагрузки в экспериментальной вибрационной установке для исследования хаотической динамики / В. Г. Рубанов, Д. А. Бушуев, Е. М. Паращук, А. К. Трикула // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – № 23(2). – С. 97–108. doi: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.
6. Алексеев А. С. Определение момента инерции электропривода по временным характеристикам / А. С. Алексеев, С. В. Замятин, Д. А. Плотноков // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 65–69.
7. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг. – 2-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2000. – 255 с.
8. Сеферян А. Е. Анализ и разработка измерительной установки для определения момента инерции тел вращения сложной формы / А. Е. Сеферян, А. В. Нестеров // Технические науки: теория и практика: материалы Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2012 г.). – Чита : Издательство Молодой ученый, – 2012. – С. 70–74.
9. Сеферян А. Е. Бесконтактная параметрическая идентификация вращающихся машин / А. Е. Сеферян, А. Ю. Топчий, А. В. Нестеров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – №6 (76). – С. 142–143.
10. Egorov A. V. Experimental identification of the electric motor moment of inertia and its efficiency using the additional inertia / A. V. Egorov, K. E. Kozlov, B. N. Belogusev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – No.11. – pp. 10582–10588.
11. Adewusi Surajudeen. Modeling and Parameter Identification of a DC Motor Using Constraint Optimization Technique / Surajudeen Adewusi // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). – 2016. – No.13. – pp. 46–56. doi: 10.9790/1684-1306024656.
12. Bature Amir, Abdullahi Auwalu. Identification and Real Time Control of a DC Motor / Amir Bature, Auwalu Abdullahi // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2013. – No. 7. – pp. 54–58. doi:10.9790/1676-0745458.
13. Лимонов Л. Г. Показатели динамичности электродвигателей постоянного тока / Л. Г. Лимонов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – №11(87). – С. 17–21.
14. Пахомов А Н. Электрический привод: учеб. пособие по лабораторному практикуму / А. Н. Пахомов, Н. Ф. Лазовский. – Красноярск : ИПЦ ПИ СФУ. – 2008. – 83 с.

15. Продукція: Електродвигуни постійного струму типів 4ПНЖ200S, 4ПНЖ200М / Офіційний сайт АТ «Електромашина» // <http://www.electromashina.com.ua/>. – Дата звертання : 15.09.2019.
16. Першин О. А. Застосування методу спадного вантажу для визначення моменту інерції двигуна постійного струму / О. А. Першин, В. П. Шайда // XIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців» (19–22 листопада 2019 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є. І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – С. 254–255.
17. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин : учебник / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко ; под ред. О. Д. Гольдберга. – 2-е изд., перераб. – М. : Высшая школа, 2001. – 430 с.
7. Gol'dberg O. D. *Ispytaniya elektricheskikh mashin: uchebnik* [Testing Electric Machines]. Moskva, Vysshaya shkola Publ, 2000, 255 p.
8. Seferyan A. E., Nesterov A. V. Analiz i razrabotka izmeritel'noy ustanovki dlya opredeleniya momenta inertsii tel vrashcheniya slozhnoy formy [Analysis and development of a measuring installation for determining the moment of inertia of bodies of revolution of complex shape]. *Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy Mezhdunar. nauch. konf. – Engineering: theory and practice: materials of the Intern. scientific conf.* (Chita, aprel' 2012). Chita. Molodoy uchenyy Publ, 2012, pp. 70–74.
9. Seferyan A. E., Topchiy A. Yu., Nesterov A. V. Beskontaktnaya parametricheskaya identifikatsiya vrashchayushchikhsya mashin [Non-contact parametric identification of rotating machines]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2011, no. (76), pp. 142–143.

References (transliterated)

1. Zelenov A. B. *Teoriya elektropriyvoda. Metodyka proektuvannya elektropriyvodiv : pidruchnyk* [Electric drive theory. Methods of designing electric drives]. Donbas. derzh. tekhn. un-t. Luhans'k, Noulidzh Publ, 2010, 670 p.
2. Kolb Ant. A., Kolb A. A. *Teoriya elektropriyvodu: navchal'nyy posibnyk* [Electric drive theory]. Dnieper, Natsional'nyy hirnychyy universytet Publ, 2006, 511 p.
3. Orlovskiy I. A. Identifikatsiya momenta inertsii i momenta soprotivleniya v elektropriyvode postoyannogo toka [Identification of the moment of inertia and the moment of resistance in a DC drive]. *Radioelektronika. Informatsiya. Upravlinnya.* 2005, no. 1, pp. 140–144.
4. Stel'mashchuk S. V. Opredelenie momenta inertsii elektropriyvoda po krivoy razgona metodom Simoyu [Determination of the moment of inertia of the electric drive by the acceleration curve by the Simoy method]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Tomsk Polytechnic University.* 2015, Vol. 326, no. 6, pp. 103–113.
5. Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikula A. K. Identifikatsiya momenta inertsii yakorya dvigatelya postoyannogo toka i nagruzki v eksperimental'noy vibratsionnoy ustanovke dlya issledovaniya khaoticheskoy dinamiki [Identification of the moment of inertia of the armature of a DC motor and load in an experimental vibrating installation for studying chaotic dynamics]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta – Proceedings of Southwestern State University.* 2019, no. 23(2), pp. 97–108. doi: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.
6. Alekseev A. S., Zamyatin S. V., Plotnikov D. A. Opredelenie momenta inertsii elektropriyvoda po vremennym kharakteristikam [Determination of the moment of inertia of the electric drive by time characteristics]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Tomsk Polytechnic University.* 2009, Vol. 314, no. 5, pp. 65–69.
10. Egorov, A. V. & Kozlov, K. E. & Belogusev, B. N. (2016). Experimental identification of the electric motor moment of inertia and its efficiency using the additional inertia. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* No.11. pp. 10582–10588.
11. Adewusi, Surajudeen. (2016). Modeling and Parameter Identification of a DC Motor Using Constraint Optimization Technique. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE).* No. 13. pp. 46–56. doi: 10.9790/1684-1306024656.
12. Bature, Amir & Abdullahi, Auwalu. (2013). Identification and Real Time Control of a DC Motor. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering.* No. 7. pp. 54–58. doi: 10.9790/1676-0745458.
13. Limonov L. G. Pokazately dinamicnosti elektrodvigateley postoyannogo toka [Dynamic performance of DC motors] *Elektrotekhnicheskiiy i komp'yuternyye sistemy.* 2013, no. 11(87). pp. 17–21.
14. Pakhomov A. N., Lazovskiy N. F. *Elektricheskiiy privod: ucheb. posobie po laboratornomu praktikumu* [Electric drive]. Krasnoyarsk, IPTs PI SFU Publ, 2008, 83 p.
15. Produktsiya: Elektrodyvuhnyu postiyonohu strumu ty piv 4PNZh200S, 4PNZh200M (Ofitsiyyny sayt AT «Elektromashyna»). Available at: <http://www.electromashina.com.ua/>. (accessed 15.09.2019).
16. Pershin O. A., Shayda V. P. Zastosuvannya metody spadnoho vantzhu dlya vyznachennya momentu inertsiiy dvyhuna postiyonohu strumu [Application of the method of falling load to determine the moment of inertia of the motor of a constant village] *XIII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiya mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennya molodykh naukovtsiv» (19–22 lystopada 2019): materialy konferentsiyi / za red. prof. Ye. I. Sokola.* Kharkiv, NTU «KhPI» Publ, 2019, pp. 254–255.
17. Gol'dberg O. D., Gurin Ya. S., Sviridenko I. S. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin : uchebnik* [Electrical Machine Design]. pod red. O. D. Gol'dberga. Moskva, Vysshaya shkola Publ, 2001, 420 p.

Надійшло (received) 15.02.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Шайда В. П. Експериментальне порівняння методів ідентифікації моменту інерції якоря двигуна постійного струму / В. П. Шайда, О. Ю. Юр'єва // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 106-111. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.18.

Шайда В. П. Экспериментальное сравнение методов определения момента инерции якоря двигателя постоянного тока / В. П. Шайда, Е. Ю. Юрьева // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 106-111. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.18.

Shayda V. P. Experimental comparison of methods for determining the moment of inertia of the armature of a DC motor / V. P. Shayda, O. Yu. Yur'eva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 106-111. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.18.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шайда Віктор Петрович (Шайда Виктор Петрович, Shaida Viktor Petrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: 0000-0002-4281-5545, тел. (057)707-68-44, e-mail: viktor-shayda@ukr.net.

Юр'єва Олена Юр'ївна (Юрьева Елена Юрьевна, Yur'eva Olena Yuriyivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, ORCID: 0000-0002-4156-8087, тел. (057)707-68-44, e-mail: ele6780@gmail.com.