

УДК 681.5.015

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108

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. Парашук, А. К. Трикула

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Резюме

Цель исследования. Статья посвящена разработке и апробации методики оценки параметров моментов инерции якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) и его нагрузки, используемых в лабораторной вибрационной установке для исследования хаотической динамики.

Методы. Представлена математическая модель ДПТ НВ и описание методики для оценки величины момента инерции его якоря с нагрузкой в результате параметрической идентификации на основе аппроксимации проинтегрированной кривой разгона силы тока и выполнения спектрального анализа. Проведено совместное моделирование динамики электродвигателя Махон RE25 с электрической частью, реализованной в системе Matlab Simulink и механической, построенной в среде MSC Adams, и на основе результатов машинного эксперимента проверена работоспособность методики параметрической идентификации.

Результаты. Представлена структура и общий вид информационно-измерительной системы лабораторной вибрационной установки для исследования хаотической динамики на основе модуля ввода/вывода NI USB-6009. Приведены и проанализированы кривые разгона и амплитудные спектры силы тока, полученные в ходе проведения натурного эксперимента по определению моментов инерции якоря двигателя Махон RE25 и дебалансов. Произведен расчет значений моментов инерции якоря и дебаланса по предлагаемой методике, а также относительных погрешностей по сравнению с паспортным значением.

Заключение. В результате проведения серии параллельных экспериментов установлено, что опыты являются воспроизводимыми согласно критерию Кохрена, а погрешность определения момента инерции якоря ДПТ не превышает 5 %, поэтому ее можно также использовать для расчетов с достаточной точностью величин моментов инерции дебалансов.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; параметрическая идентификация; момент инерции; вибрационная система; метод Пасека; Matlab.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадания №2.1396.2017/4.6.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: 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. Парашук, А. К. Трикула // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 97-108. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.

UDC 681.5.015

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108

Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study

Vasiliy G. Rubanov ✉, Dmitriy A. Bushuev, Elena M. Parashchuk, Andrei K. Trikola

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46, Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russian Federation

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Abstract

Purpose of research. The article is devoted to development and approbation of parameters' assessment technique of anchor inertia moments of direct current motor with an independent excitation (DCM IE) and its loadings used in laboratory vibration installation for chaotic dynamics research.

Methods. The DCM IE mathematical model and technique description for assessment of anchor inertia moment with loading as a result of parametrical identification on the basis of approximation integrated curve of current runaway and implementation of spectral analysis is described in the article. Joint dynamics modeling of Maxon RE25 electric motor with electric and mechanical part was done in Matlab Simulink system. Mechanical part was constructed in MSC Adams. Technique operability of parametrical identification was checked on the basis of machine experiment results.

Results. Structure and general view of information and measuring system of laboratory vibration installation for chaotic dynamics research on the basis of input-output NI USB-6009 module is presented. Dispersal curves and an amplitude range of current received during experiment for definition of anchor inertia moments of Maxon RE25 engine and debalances are analysed. Calculation of anchor inertia moments and debalances are made according to an offered technique. Calculation of relative errors in comparison with passport value is also made.

Conclusion. According to the results of carried out parallel experiments it is found out that experiments can be made according to Kokhren's criterion. And the error of DCM anchor inertia moments definition is no larger than 5%. Therefore it can also be used for calculations with sufficient accuracy of debalances inertia moments.

Keywords: direct current motor with an independent excitation; parametrical identification; inertia moment; vibration system; Paseck's method; Matlab.

Acknowledgements: Researches are made with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the Goszadaniya No. 2.1396.2017/4.6 project.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Rubanov V. G., Bushuev D. A., Parashchuk E. M., Trikola A. K. Identification of Anchor Inertia Motor Moment of Direct Current and Loading in Experimental Vibration Installation for Chaotic Dynamics Study *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(1): 97-108 (In Russ.). **DOI:** 10.21869/2223-1560-2019-23-2-97-108.

Введение

Двигатели постоянного тока (ДПТ) нашли широкое применение как в промышленности, так и в лабораторном оборудовании. Их отличает ряд преимуществ, которые оказываются важными при создании сложных электромеханических систем: более высокий КПД, чем в случае с двигателями переменного тока, возможность плавной и точной регулировки частоты вращения в широких пределах, малая инерционность.

При практическом исследовании линейной и нелинейной динамики электромеханических систем, в которых используются двигатели постоянного тока, возникают задачи определения параметров их математических моделей. Поскольку некоторые паспортные значения для ряда двигателей отсутствуют, либо в процессе продолжительного функционирования могут изменяться, то возникает необходимость проведения экспериментальной идентификации.

Одной из таких задач является разработка экспериментальной вибрационной установки с релейным управлением, которая должна соответствовать математической модели, представленной в [1].

Важными параметрами рассматриваемой электромеханической системы, влияющими на динамику, которые требуется уточнить экспериментальным путем в результате идентификации, яв-

ляются моменты инерции якоря и инерционной нагрузки или дебаланса. Для оценки параметров электродвигателей обычно используют офлайн и онлайн методы идентификации [2]. Онлайн методы на основе наблюдателей состояния, фильтров Калмана, нейронных сетей и т.п. обычно применяются при диагностике неисправностей и в системах защиты ДПТ [3] и, как правило, сложны в настройке. При офлайн идентификации регистрируются реакции на подаваемые тестовые сигналы и затем анализируются.

Большинство существующих методик ориентированы на регистрацию изменения скорости вращения якоря при изменении напряжения управления и последующим анализом с использованием рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) [4], метода моментов [5] и др. [6]. При этом, как правило, анализируются кривые разгона [7], либо импульсные характеристики [8]. Однако для этого требуется наличие датчиков скорости вращения, что влечет за собой усложнение конструкции, увеличение габаритов и массы электромеханической системы, а это является критичным для исследуемой лабораторной установки.

В работе [9] описан динамический метод Пасека, используемый для идентификации параметров высокопроизво-

дательных ДПТ по кривой разгона – реакции изменения тока якоря двигателя на подачу ступенчатого напряжения питания. При его реализации измеряются значения времени возникновения и величины тока якоря в момент подачи воздействия, при максимальном значении тока, в момент, соответствующий удвоенному времени появления максимума, а также ток и скорость вращения в установившемся режиме и далее по соответствующим формулам определяются параметры аппроксимирующей математической модели ДПТ. Модифицированный метод Пасека, учитывающий вязкое трение, описан в работе [10]. Недостатком метода Пасека является высокая чувствительность к шумам, возникающим в процессе коммутации [2].

Целью данной работы является разработка и апробация методики оценки основных параметров ДПТ с независимым возбуждением и нагрузки на основе информации, получаемой только с датчика тока, в лабораторной установке для исследования хаотической динамики, поскольку от них зависит степень соответствия теоретических и экспериментальных результатов при анализе бифуркационных явлений.

Материалы и методы решения задачи

Математическую модель, описывающую линейную динамику двигателя постоянного тока независимого возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов при управлении скоростью вращения изменением напряжения якорной цепи, можно пред-

ставить в виде следующей структурной схемы (рис.1), на которой U_y – напряжение управления, В; I_y – ток в якорной цепи двигателя; R_y – сопротивление якорной цепи, равное сумме сопротивлений якорных обмоток двигателя и выходного сопротивления усилителя, Ом; L_y – сумма индуктивностей якорной цепи двигателя и выходной цепи усилителя, Гн; E_d – обратная ЭДС двигателя; M_c , M_d , M – момент сопротивления, движущий момент и результирующий момент, приложенный к якорю, Н·м, соответственно; C_e – коэффициент момента, Н·м/А; C_w – коэффициент скорости (противо ЭДС), В·с/рад; ω – частота вращения двигателя, рад/с; J – момент инерции якоря, Н·м²; B – коэффициент вязкого трения; s – оператор Лапласа.

Выходным сигналом модели, который можно непосредственно измерить в лабораторной установке при помощи датчиков Холла является ток якорной цепи. В этом случае при отсутствии момента сопротивления M_c и вязкого трения B передаточная функция по управляющему воздействию с учетом преобразований запишется следующим образом:

$$W_y(s) = \frac{I_y(s)}{U_y(s)} = \frac{k_I s}{(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)}, \quad (1)$$

где $T_m = \frac{J R_y}{C_w C_e}$ – механическая постоянная времени двигателя; $T_e = \frac{L_y}{R_y}$ – электрическая постоянная времени двигателя; $k_I = \frac{J}{C_w C_e}$ – коэффициент передачи по току.

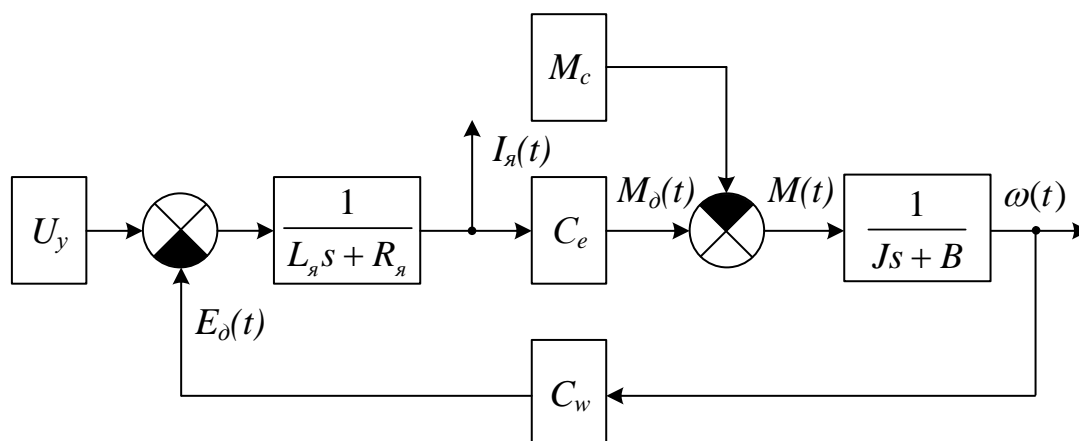


Рис. 1. Структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В широко распространённых методах идентификации, например в методе Симоу, используется структура объекта управления, представленная в следующем виде

$$W_O(s) = \frac{b_m \cdot s^m + \dots + b_1 \cdot s + 1}{a_n \cdot s^n + \dots + a_1 \cdot s + 1} = \frac{B(s)}{A(s)}. \quad (2)$$

Для перехода к данной структуре в передаточную функцию (1), описывающую динамику ДПТ НВ, и для фильтрации шумов с датчика необходимо добавить интегрирующее звено. Таким образом, выходным параметром двигателя будет являться проинтегрированное значение измеренного тока в обмотке якоря.

В таком случае в соответствии с выражением (1) выберем колебательное динамическое звено в качестве аппроксимирующей передаточной функции:

$$W_O(s) = \frac{k_o}{T_o^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_o \cdot s + 1}, \quad (3)$$

где k_o – коэффициент передачи; T_o – постоянная времени; ξ – степень затухания.

Поскольку в любой электромеханической системе в той или иной степени присутствуют силы сопротивления, то

пренебрежение моментом сопротивления и коэффициентом трения согласно приведенной структуре (см. рис. 1) будет искажать искомые значения моментов инерции. С другой стороны, учет момента сопротивления в математической модели (1) приведет к несоответствию объекта управления структуре (3), используемой при идентификации.

Поэтому предлагается для определения механической постоянной времени $T_m = 2 \cdot \xi \cdot T_o$ воспользоваться моделью (1), не учитывающей момент сопротивления, но, при этом, для перехода к модели вида (3) интегрировать значение тока за вычетом усредненного значения тока в установившемся режиме, поскольку он обусловлен наличием сил сопротивления и нагрузки и при интегрировании вызывает постоянный рост выходного сигнала интегратора.

Определив значение механической постоянной времени T_m , момент инерции определяется следующим образом:

$$J = \frac{T_m C_w C_e}{R_\gamma}. \quad (4)$$

Анализируя паспортные данные различных производителей видно, что для ряда двигателей приводятся сведения только о номинальных значениях напряжения U_n , тока якоря I_n и частоты вращения ω_n , а, в случае, если даны величины коэффициентов C_e и C_w , то они приблизительно равны единому электромагнитному коэффициенту $k_{ЭМ}$ [11] определяемому как

$$k_{ЭМ} = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}. \quad (5)$$

При отсутствии указанных номинальных значений в формулу (5) можно подставлять соответствующие величины напряжения питания U_y , усредненного установившегося значения тока I_y , и измеренного соответствующими приборами сопротивления якорной цепи $R_{я}$. Величину установившегося значения скорости вращения якоря ДПТ можно определить по спектральной характеристике токового сигнала при использовании быстрого преобразования Фурье, поскольку всплеск тока вследствие процесса коммутации происходит каждый раз, когда сегмент коллектора разрывает контакт со щеткой [12]. Таким образом, число текущих пиков тока на оборот равно удвоенному числу проводников коллектора N . При помощи быстрого преобразования Фурье определяется частота f_{\max} , соответствующая максимальной мощности в спектральной плотности токового сигнала, по которой скорость вращения якоря в установившемся режиме определяется следующим образом:

$$\omega_y = \frac{2\pi f_{\max}}{2N} = \frac{\pi f_{\max}}{N}. \quad (6)$$

Учитывая выражения (4)–(6), момент инерции якоря ДПТ может быть рассчитан по формуле

$$J = \frac{T_m N^2 (U_y - I_y R_{я})^2}{R_{я} (\pi f_{\max})^2}. \quad (7)$$

Располагая значением величины момента инерции J , можно по этой же методике определить момент инерции якоря с нагрузкой J_c , и затем при необходимости момент инерции дебаланса $J_L = J_c - J$.

Результаты и их обсуждение

Для проверки работоспособности метода проводился машинный эксперимент путем совместного моделирования динамики с использованием модели ДПТ НВ [13], в которой электрическая часть модели (см. рис. 1) рассчитывалась средствами Matlab Simulink, а механическая – в MSC Adams (рис. 2,а). Исследования производились с электродвигателем Махон RE 25, имеющим следующие паспортные параметры: $R_{я} = 2,18 \text{ Ом}$; $C_w = 0,02353 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$; $C_e = 23,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/А}$; $J_0 = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $L_{я} = 0,238 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

Кривая разгона двигателя, построенная по паспортным данным, при подаче скачком напряжения $U_y = 4 \text{ В}$ показана на рис. 2,б (кривая 1).

В результате интегрирования реакции тока на ступенчатое воздействие за вычетом тока холостого хода I_y и последующей идентификации при помощи метода площадей были опре-

делены следующие параметры аппроксимированного объекта управления, заданного выражением (2) $k_o = 1,94 \cdot 10^{-3}$; $T_o = 7,6 \cdot 10^{-4}$ с; $\xi = 2,79$. Как видно (рис. 2, б кривая 2) кривая разгона аппроксимированного объекта

совпадает с кривой разгона исследуемого ДПТ, при этом в соответствии с вычисленной постоянной времени $T_m = 4,251$ мс и, используя паспортные значения C_w , C_e , R_a , по формуле (4) был определен момент инерции $J = 1,08 \cdot 10^{-6}$ Н·м².

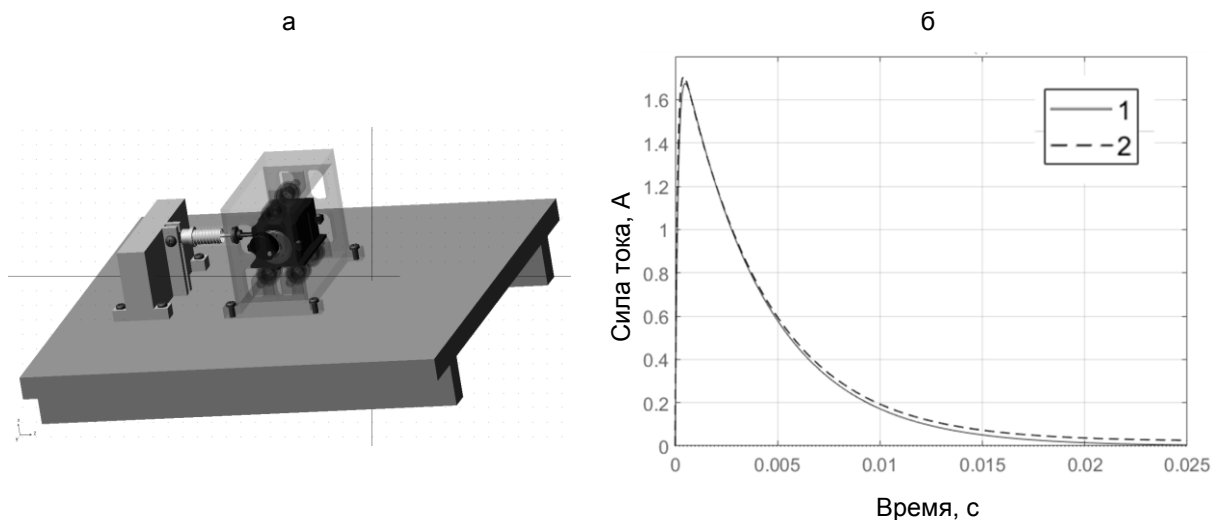


Рис. 2. Механическая часть модели лабораторной установки (а) и кривые разгона электродвигателя Махон RE25 (б): 1 – построенная по паспортным данным; 2 – полученная в результате идентификации

Представленная цифровая модель электродвигателя является упрощенной, поскольку в ней не учитываются нелинейные явления, имеющие место в реальных электромеханических системах, процесс коммутации и т.п. В лабораторной установке для исследования хаотической динамики с целью определения моментов инерции якоря двигателя и нагрузки реализована информационно-измерительная система, структура и внешний вид которой представлены на рис. 3.

В установке применяется ДПТ Махон RE 25, на вал которого монтируются различные дебалансы, момент инерции которых требуется определить по описанной выше мето-

дике. Для измерения сопротивления цепи якоря использовался измерительный прибор SANWA PC5000 с точностью измерения 0,01 Ом. Регистрация аналоговых сигналов осуществляется при помощи программного обеспечения NI DAQ и модуля NI USB 6009. С целью синхронизации регистрации поданного ступенчатого воздействия и реакции тока, а также для устранения дребезга, в качестве запускающего элемента выступает оптический концевой выключатель D, коммутирующий электромагнитное реле K1 с контактом K1.1. В качестве датчика тока ДТ использован преобразователь Холла LTS 6-NP. В среде Matlab осуществлялась обработка ре-

зультатов и идентификация. Для определения среднего значения тока и частоты вращения в установившемся режиме использован фильтр скользящего

среднего и быстрое преобразование Фурье соответственно. Проведено пять серий параллельных экспериментов для двигателя с нагрузкой и без.

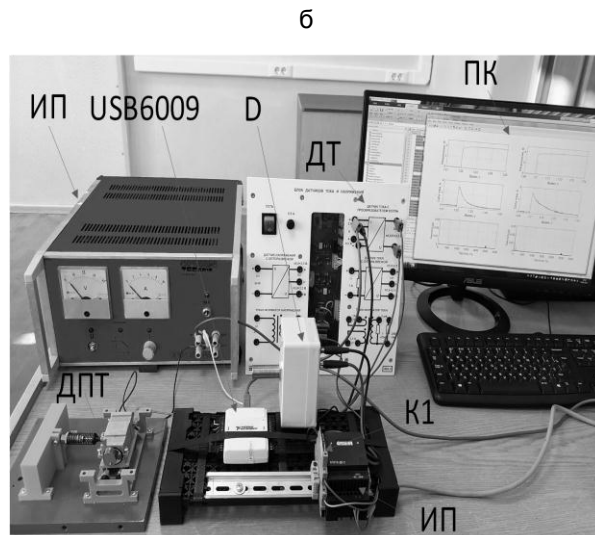
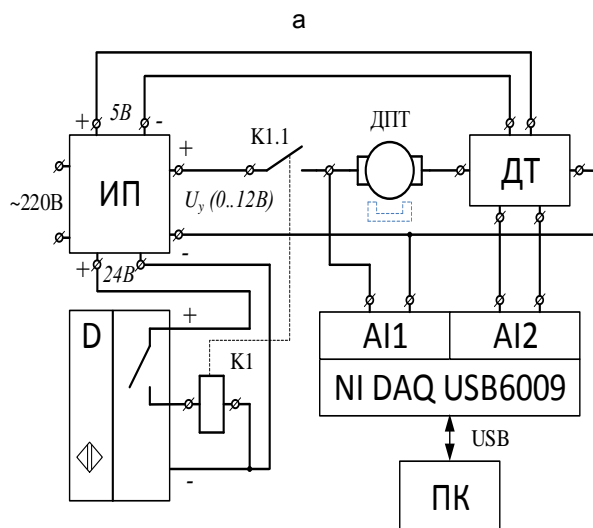


Рис. 3. Структура (а) и внешний вид (б) лабораторной установки для исследования хаотической динамики

Результаты одной из серий проведенных испытаний для ненагруженного электродвигателя и с дебалансом с массой $m_1=15$ грамм представлены на рис. 4.

Как видно по спектру (см. рис. 4) в токовом сигнале присутствуют наводки из сети питания с $f=50$ Гц, гармоника на частоте f_{\max} , соответствующая частоте коммутации, и высокочастотный шум, формируемый за счет модуля ввода/вывода USB-6009. Общий вид временных характеристик для ненагруженного ДПТ соответствует модельному эксперименту (см. рис. 3).

В процессе идентификации параметров ДПТ без механической нагрузки

определена постоянная времени $T_m=4,255$ мс и частота $f_{\max}=581,8$ Гц, а сопротивления якорной цепи $R_{\text{я}} = 2,2$ Ом. Момент инерции, рассчитанный по паспортным значениям C_w , C_e , по формуле (4), равен $J=1,061 \cdot 10^{-6}$, кг·м² (относительная ошибка $\delta = |J - J_o| / J \cdot 100\%$ по сравнению с паспортным значением момента инерции J_o равна $\delta = 1,76\%$), а по формуле (7) – $J=1,072 \cdot 10^{-6}$, кг·м² ($\delta = 0,74\%$).

При наличии дебаланса с массой $m_1=15$ грамм $T_m=9,316$ мс и частота $f_{\max}=568,3$ Гц, откуда момент инерции двигателя с нагрузкой $J_c = 2,44 \cdot 10^{-6}$ кг·м², и соответственно, момент нагрузки $J_L=1,36 \cdot 10^{-6}$ кг·м².

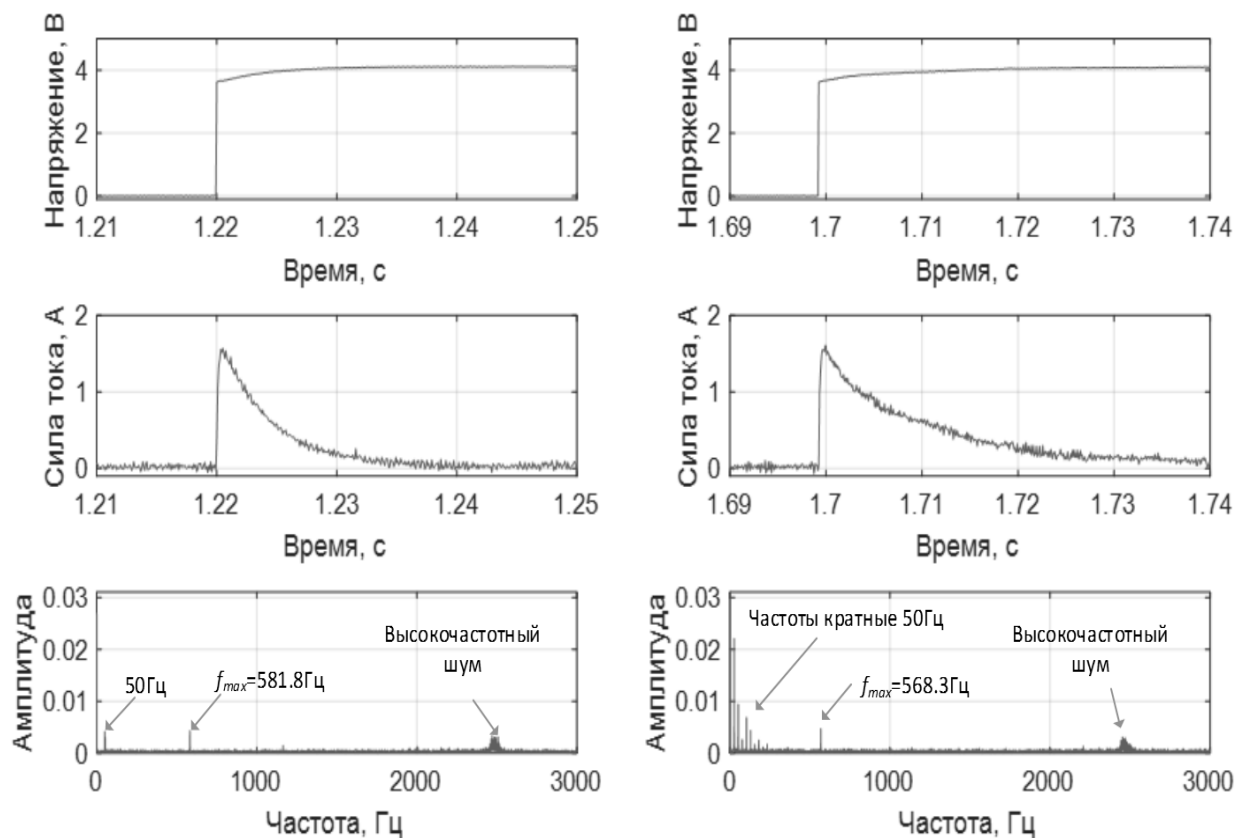


Рис. 4. Входные и выходные тестовые данные при идентификации ДПТ без нагрузки (слева) и с дебалансом $m_1 = 15$ г (справа)

Обработка результатов серии параллельных экспериментов показала, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ опыты являются воспроизводимыми по Кохрену, а погрешность определения момента инерции якоря ДПТ как по формуле (4), так и по формуле (7) не превышает 5%.

Выводы

В ходе проведенного исследования на основе машинного и натурного экспериментов была апробирована предложенная методика для оценки параметров момента инерции двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В связи с чем ее можно применить при

использовании в лабораторной установке ДПТ с неизвестными параметрами. Установлено, что в результате идентификации также можно с точностью до 5 % уточнять моменты инерции дебалансов, тем самым компенсируя в модели погрешности в изготовлении, наличие дополнительных крепежных элементов, разброс в параметрах плотности материалов. Кроме того, описанная методика может быть использована при выполнении статической балансировки. Зная плоскость неуравновешенности, можно минимизировать момент инерции нагрузки, присоединяя корректирующие массы.

Список литературы

1. Zhusubaliyev Z.T., Avrutin V., Rubanov V.G., Bushuev D.A., Titov D. V., Yanochkina O.V. Persistence border collisions in a vibrating system excited by an unbalanced motor with a relay control // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol.1959. №080022.
2. Salah M. S., Abdelati M. Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor Conference // IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2010), Austria (February 2010), 2010.
3. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью поисковых методов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. С. 131-134
4. Krneta R., Antic S., Stojanovic D. Recursive least square method in parameters identification of DC motors models // Facta Universitatis. 2005. 18 (3). P. 467–478.
5. Hadeif M., Bourouina A., Mekideche M. R. Parameter identification of a DC motor via moments method // International Journal of Electrical and Power Engineering. 2008. 1(2). P. 210–214.
6. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Сравнительный анализ методов динамической идентификации параметров электродвигателей // Сб. трудов XI международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (24-25 ноября 2015 г.). Кемерово: КГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2015.
7. Wu W. DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses // Modelling and Simulation in Engineering. 2012. №189757.
8. Tutunji T. A. DC motor identification using impulse response data // Conference on EUROCON, Serbia & Montenegro (22-24 November 2005). 2005. P. 1734-1736
9. Lord W., Hwang J. H. Pasek's Technique for Determining the Parameters of High-Performance DC Motors // Proceedings of the Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices. University of Illinois. May 1974. P. R.1-10,
10. Hadeif M., Mekideche M.R. Moments and Pasek's methods for parameter identification of a DC motor // Journal of Zhejiang University – Science C. 2011. 12(2). P. 124-131.
11. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1986. 335 с.
12. Patent EP0193761B1, 03.04. 1998. Strunk T. L., Westerman G.S. Method for testing DC motors. 29.05.1991.
13. Бушуев Д.А., Рубанов В.Г., Бажанов А.Г. Методы интеграции моделей электродвигателей в среду MSC.Adams для совместного моделирования динамики механи-

ческих объектов с системами управления // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. БГТУ им. В. Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. С. 10-14.

Поступила в редакцию 12.02.2019

Подписана в печать 04.03.2019

Reference

1. Zhusubaliyev Z.T., Avrutin V., Rubanov V.G., Bushuev D.A., Titov D. V., Yanochkina O.V. Persistence border collisions in a vibrating system excited by an unbalanced motor with a relay control. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol.1959, №080022.
2. Salah M. S., Abdelati M. Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor Conference. IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2010), Austria (February 2010), 2010.
3. Gargaev A.N., Kashirskih V.G. Identifikacija parametrov dvigatelej postojannogo toka s pomoshh'ju poiskovyh metodov. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2013, pp. 131-134 (In Russ.).
4. Krneta R., Antic S., Stojanovic D. Recursive least square method in parameters identification of DC motors models. *Facta Universitatis*, 2005, 18 (3), pp. 467–478.
5. Hadeif M., Bourouina A., Mekideche M. R. Parameter identification of a DC motor via moments method. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2008, 1(2), pp. 210–214.
6. Gargaev A.N., Kashirskih V.G., Nesterovskij A.V. Sravnitel'nyj analiz metodov dinamicheskoy identifikacii parametrov jelektrodvigatelej. Sb. trudov XI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti predpriyatij v promyshlenno razvityh regionah. Kemerovo, 2015 (In Russ.).
7. Wu W. DC Motor Parameter Identification Using Speed Step Responses. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2012, №189757.
8. Tutunji T. A. DC motor identification using impulse response data. Conference on EUROCON, Serbia & Montenegro (22-24 November 2005), 2005, pp. 1734-1736
9. Lord W., Hwang J. H. Pasek's Technique for Determining the Parameters of High-Performance DC Motors. *Proceedings of the Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices*. University of Illinois, May 1974. pp. R.1-10.
10. Hadeif M., Mekideche M.R. Moments and Pasek's methods for parameter identification of a DC motor. *Journal of Zhejiang University – Science C*, 2011, 12(2), pp. 124-131.
11. Volkov N.I., Milovzorov V.P. Jeletromashinnye ustrojstva avtomatiki. Moscow, 1986, 335 p. (In Russ.).

12. Patent EP0193761B1, 03.04. 1998. Strunk T. L., Westerman G.S. Method for testing DC motors. 29.05.1991.

13. Bushuev D.A., Rubanov V.G., Bazhanov A.G. Metody integracii modelej jelektrorodvigatelyj v sredu MSC.Adams dlja sovmestnogo modelirovanija dinamiki mehanicheskikh ob#ektov s sistemami upravlenija. Sb. dokl. mezhdunar. nauch.-tehn. konf. BGTU im. V. G. Shuhova. Naukoemkie tehnologii i innovacii. Belgorod, 2016, pp. 10-14 (In Russ.).

Received 12.02.2019

Accepted 04.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Василий Григорьевич Рубанов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация
e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Vasiliy G. Rubanov, Doctor of Engineering Sciences, Profesor, Head of Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Дмитрий Александрович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация
e-mail: bushuev.da@bstu.ru

Dmitriy A. Bushuev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: bushuev.da@bstu.ru

Елена Михайловна Парашук, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: kara1205@mail.ru

Elena M. Parashchuk, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Technical Cybernetics Department Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: kara1205@mail.ru

Андрей Константинович Трикула, студент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: trikula_andrew@mail.ru

Andrei K. Trikula, Student, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
e-mail: trikula_andrew@mail.ru