ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-744-752

METHOD FOR IDENTIFICATION OF TRACKING ELECTRIC DRIVES MECHANICAL PARAMETERS

A. S. Lakhmenev, A. V. Saushev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of identifying the parameters of electromechanical systems has long been relevant and in demand for practice. For the most part, the well-known approaches to identifying the parameters of electromechanical systems under study are based on the use of linear models that are not suitable for most systems with nonlinearities. In the case of a servo drive, non-linearity and some uncertainty occur in the mechanical part of the drive, due to the presence of friction, elasticity and backlash. In this regard, many different methods and algorithms for identifying mechanical parameters have been developed for servo drives, which include nonlinear least squares estimation, the finite element method, and methods based on spectral analysis. A method for determining the moment of inertia and the coefficient of viscous friction for servo drives, based on the use of the dynamic equation of the mechanical drive system, is discussed in the paper. The torque and the actual rotational speed of the machine are used as input information. Accurate identification of the mechanical parameters of an electric drive is essential for the synthesis of its control system. The developed method is resistant to external influences, such as measurement error, mechanical resonance of the drive system. The revealed parameters can be used for autotuning the gains in the speed controller, which will provide high performance control of the drive speed. The effectiveness of the proposed method is confirmed by computer simulation and experimental data.

Keywords: inertia, mechanical system, identification, electric servo drive, viscous friction coefficient, mechanical parameters.

For citation:
Lakhmenev, Alexey S., and Alexander V. Saushev. "Method for identification of tracking electric drives mechanical parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 744–752. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-744-752.

УДК 621.3.05

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

А. С. Лахменев, А. В. Саушев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена исследованию проблемы идентификации параметров электромеханических систем, которая в течение длительного периода времени остается актуальной и востребованной на практике. Отмечается, что в большинстве известные подходы к идентификации исследуемых параметров электромеханических систем основаны на использовании линейных моделей, которые не подходят для большинства систем с нелинейностями. В случае следящего электропривода нелинейность и некоторая неопределенность имеют место в механической части привода вследствие наличия трения, упругости и люфтов. В связи с этим для следящих электроприводов существует достаточно много различных методов и алгоритмов идентификации механических параметров, к которым можно отнести нелинейное оценивание наименьших квадратов, метод конечных элементов, а также методы, основанные на спектральном анализе. В статье рассмотрен метод определения момента инерции и коэффициента вязкого трения для следящих электроприводов, основанный на использовании динамического уравнения механической системы привода. В качестве исходной информации используется крутящий момент и фактической скорость вращения машины. Отмечается, что точная идентификация механических параметров электропривода имеет важное значение для синтеза его системы управления. Разработанный метод устойчив к внешним воздействиям, таким как погрешность измерения и механический резонанс приводной системы. Выявленные параметры могут

использоваться для автонастройки коэффициентов усиления в регуляторе скорости, что обеспечит высокие показателя контроля скорости электропривода. Эффективность предложенного метода подтверждена компьютерным моделированием и экспериментальными данными.

Ключевые слова: момент инерции, механическая система электропривода, идентификация параметров, следящий электропривод, коэффициент вязкого трения.

Для цитирования:
Лахменев А. С. Метод идентификации механических параметров следящих электроприводов / А. С. Лахменев, А. В. Саушев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.— 2021.— Т. 13.— № 5.— С. 744–752. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-744-752.

Введение (Introduction)

С 2018 г. наметилась устойчивая тенденция к повышению требований к показателям точности и надежности работы электроприводов различного назначения. Данное обстоятельство определяет важность разработки эффективных способов управления электроприводом. Необходимым условием для этого является точная идентификация значений параметров электропривода. Наиболее важным в данном случае является определение таких параметров, как момент инерции и коэффициент вязкого трения механической системы [1], [15]. Для достижения высоких динамических характеристик электропривода при управлении частотой вращения приводного электродвигателя коэффициенты усиления регулятора скорости должны иметь максимальное значение. Система управления таким электроприводом не должна иметь обратной связи. Такую систему управления используют, например, в контроллерах управления следящим электроприводом, при разработке которых необходимо учитывать и получать от датчиков такие механические переменные и параметры, как механическая угловая скорость ротора, момент инерции и коэффициент вязкого трения. Допустимо также использование датчика скорости.

По данной тематике было проведено большое количество исследований, большинство из которых основано на теории адаптации параметров управления [2]. Недостатком данного подхода является сложность его практической реализации. Кроме того, ошибка управления по скорости в большой степени зависит от точности исходных значений параметров. Для получения более эффективных решений были опробованы и другие подходы [2], [3], основанные на динамических уравнениях механической модели, не требующие сложных расчетов. Вместе с тем для их практической реализации требуется построение специальной траектории управления скоростью и возможность двунаправленного вращения электродвигателя.

Целью данного исследования является разработка нового метода идентификации параметров механической системы электропривода — момента инерции и коэффициента вязкого трения для высокодинамичных следящих электроприводов. Данный метод основан на динамическом уравнении механической системы электропривода, связывающем между собой крутящий момент и фактическую скорость вращения электрической машины. В результате несложного расчета предлагаемый метод позволяет определить момент инерции и коэффициент вязкого трения в реальном времени. Таким образом, коэффициенты усиления контроллера и наблюдателя могут быть автоматически настроены на получение требуемых динамических характеристик управления по скорости. Предлагаемый метод может быть применен в следящем электроприводе, выполняющим скоростные высокоточные операции по перемещению исполнительного механизма [4]–[6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 1 представлена структурная модель механической системы электропривода, в котором действуют два вращающих (крутящих) момента. Эту модель в аналитическом виде можно представить следующим образом:

$$M_e = \left(J_m + J_L\right)\frac{d\omega}{dt} + B_{\text{т}}\omega + \text{sign}\left(\omega\right)C_{\text{т}} - M_d, \qquad (1)$$

где ω — угловая скорость ротора (рад/с);

J_m, J_L — моменты инерции двигателя и нагрузки соответственно (кг·м^2);

$B_т$ — коэффициент вязкого трения (Н·м·с/рад);

$C_т$ — кулоновское трение (Н·м);

M_e, M_d — крутящие моменты двигателя (Н·м).

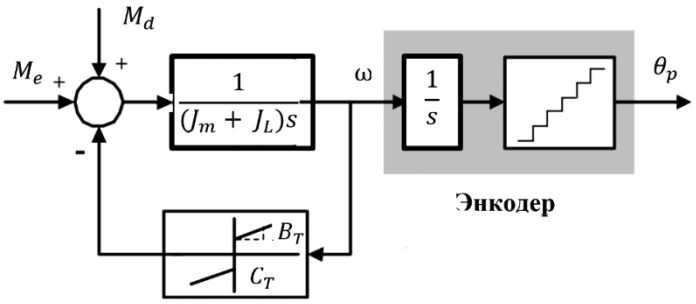

Рис. 1. Модель механической системы электропривода

Для измерения скорости вращения двигателя используется энкодер. Таким образом, он является выходным звеном механической системы с координатой θ_p. Частота вращения может быть получена простым дифференцированием положения ротора или путем оценки с помощью датчика скорости [7], [8].

На рис. 2 показана типовая блок-схема системы управления электродвигателя по скорости, где ω^* — заданная скорость; M_e^* — заданный крутящий момент; $\hat{\omega}$ — фактическая скорость; а $\hat{M}_d$ — возмущающий момент. Датчик возмущающих воздействий используется в схеме для уменьшения влияния возмущающего момента и регулирования скорости. Блок «параметры датчиков» определяет общую эквивалентную инерцию двигателя и механической нагрузки по отношению двигателя и коэффициента вязкого трения.

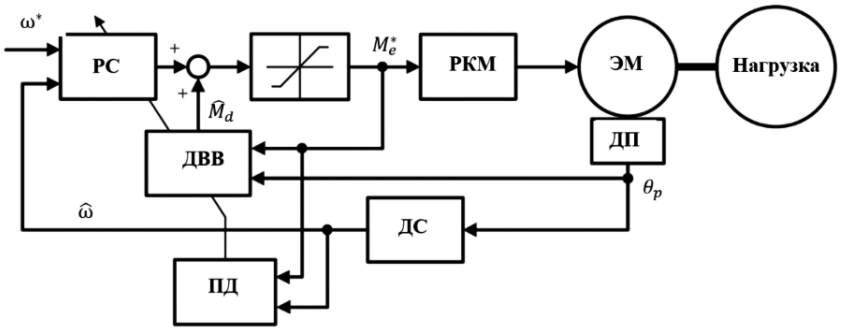

Рис. 2. Типовая блок-схема системы управления электродвигателя по скорости:
РС — регулятор скорости; *РКМ* — регулятор крутящего момента; *ЭМ* — электрическая машина;
ДП — датчик позиционирования; *ДВВ* — датчик возмущающих воздействий;
ДС — датчик скорости; *ПД* — параметры датчиков

Момент кулоновского трения можно рассматривать как внешний момент возмущения, поэтому учитываются только два параметра для идентификации: коэффициент вязкого трения и момент инерции [16]. Умножив обе части уравнения (1) на производную фактической скорости, получим

$$M_e \frac{d\omega}{dt} = \left(J_m + J_L\right)\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 + B_т \omega \frac{d\omega}{dt} + M_d' \frac{d\omega}{dt}, \qquad (2)$$

где $M_d' = \text{sign}(\omega) C_т - M_d$.

В связи с тем, что возмущающий момент изменяется медленно, проинтегрируем левую и правую части уравнения (2). В результате получим следующее равенство:

$$\int_{t_1}^{t_2} M_e \frac{d\omega}{dt} dt = \left(J_m + J_L\right) \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt + B_T \int_{t_1}^{t_2} \omega \frac{d\omega}{dt} dt + M_d' \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\omega}{dt} dt, \tag{3}$$

где t_1 — время начала идентификации параметров механической части электропривода;

t_2 — время окончания идентификации.

Второй член правой части уравнения (3) можно представить следующим образом:

$$B_{\text{т}} \int_{t_1}^{t_2} \omega \frac{d\omega}{dt} dt = \frac{B_{\text{т}}}{2} \left(\omega_{at\ t=t_2}^2 - \omega_{at\ t=t_1}^2\right). \tag{4}$$

Таким образом, из формул (3) и (4) полный момент инерции может быть представлен в виде следующей формулы, исходя из предположения, что $M_e^* = M_e$:

$$J_{\text{т}} = J_m + J_L = \frac{\int_{t_1}^{t_2} M_e^* \frac{d\omega}{dt} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt} - \frac{B_{\text{т}}}{2} \frac{\left(\omega_{at\ t=t_2}^2 - \omega_{at\ t=t_1}^2\right)}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt} - M_d' \frac{\left(\omega_{at\ t=t_2} - \omega_{at\ t=t_1}\right)}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt}. \tag{5}$$

Из уравнения (5) следует, что если время идентификации имеет большое значение и производная от фактической скорости не равна нулю, то вторым и третьим членами можно пренебречь ввиду того, что при данных условиях знаменатель будет существенно больше числителя. В случае, если интервал времени идентификации имеет малое значение и фактические скорости электродвигателя в моменты времени t_1 и t_2 будут равны или близки друг к другу, то числитель второго и третьего члена равенства (5) можно принять равным нулю. Таким образом, значение момента инерции можно достаточно просто получить независимо от вязкости трения и возмущения [9] на основании следующей формулы:

$$J_{\text{т}} = \int_{t_1}^{t_2} M_e^* \frac{d\omega}{dt} dt \Big/ \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt. \tag{6}$$

Аналогичным образом можно получить коэффициент вязкого трения. Для этого продифференцируем обе части равенства (1) путем умножения их на производную от фактической скорости электрической машины и предположив, что возмущающий момент будет медленно изменяться. В результате получим следующее выражение:

$$\frac{dT_e^*}{dt} \frac{d\omega}{dt} = \left(J_m + J_L\right) \frac{d^2\omega}{dt^2} \frac{d\omega}{dt} + B_{\text{т}} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2. \tag{7}$$

Проинтегрировав левую и правую части равенства (7), получим

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{dM_e^*}{dt} \frac{d\omega}{dt} dt = J_{\text{т}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2\omega}{dt^2} \frac{d\omega}{dt} dt + B_{\text{т}} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt. \tag{8}$$

Второй член правой части уравнения (8) можно выразить следующим образом:

$$J_{\text{т}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2\omega}{dt^2} \frac{d\omega}{dt} dt = \frac{J_{\text{т}}}{2} \left(\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{at\ t=t_2}^2 - \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{at\ t=t_1}^2\right). \tag{9}$$

Таким образом, из формул (8) и (9) можно получить выражение для определения коэффициента вязкого трения:

$$B_{\text{т}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{dM_e^*}{dt} \frac{d\omega}{dt} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt} - \frac{J_{\text{т}}}{2} \frac{\left(\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{at\ t=t_2}^2 - \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{at\ t=t_1}^2\right)}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 dt}. \tag{10}$$

Следует отметить, что если время идентификации имеет достаточно большое значение и в этом интервале производная от фактической скорости электродвигателя не равна нулю, то вторым членом уравнения можно пренебречь, поскольку знаменатель в формуле будет стремиться к бесконечности. В случае, если интервал времени идентификации имеет малое значение и фактические скорости электродвигателя в моменты времени t_1 и t_2 равны или близки друг другу, то числитель второго члена равенства (10) можно принять равным нулю [12]. Таким образом, коэффициент вязкого трения в этом случае можно представить в виде

$$B_{\text{т}} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dM_e^*}{dt} \frac{d\omega}{dt} dt \Big/ \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt. \tag{11}$$

После идентификации момента инерции и коэффициента вязкого трения их можно использовать для регулировки скорости вращения электродвигателя. Передаточная функция регулятора скорости будет иметь вид

$$T_{PI} = k_V \left(1 + 1/T_i s\right)\left(\omega^* - \omega\right), \tag{12}$$

где k_V — коэффициент пропорционального усиления; $1/T_i s$ — интегральное усиление.

Полученные в результате идентификации параметры могут быть использованы также и для синтеза других датчиков [10]. На рис. 3 показана блок-схема датчика возмущающего воздействия.

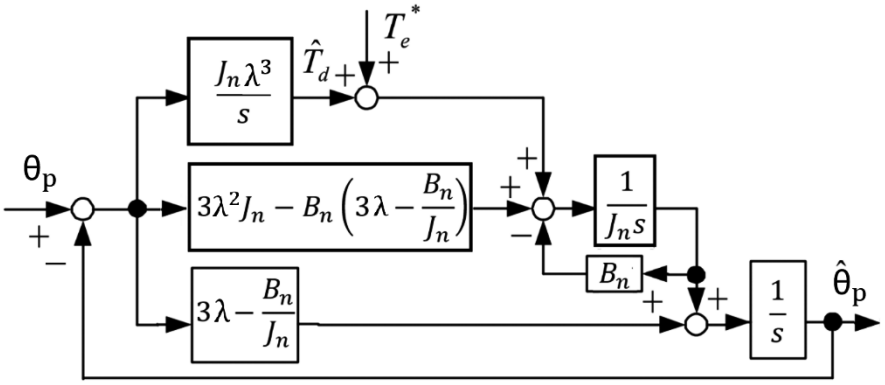

Рис. 3. Блок-схема датчика возмущающего воздействия

Номинальный момент инерции J_n и номинального коэффициента вязкого трения B_n могут быть настроены на значения, определенные в теоретических расчетах. Контрольный элемент управления прямой связью с моделью параметров и идентифицированный момент инерции, и коэффициент вязкого трения можно использовать для настройки параметров модели следящего электропривода [11].

Результаты (Results)

На основе выполненных исследований выполнено моделирование предложенного метода идентификации с использованием математического пакета Mathcad. Также был произведен эксперимент на реальной модели. Предложенный метод был применен к электроприводу Siemens GDB331.1E. Разрешение энкодера составляет $3{,}835 \cdot 10^{-4}$ (рад). Энкодер, в свою очередь, подключен к плате счетчика в персональный компьютер (ПК). Моделирование и эксперименты были выполнены для проверки работоспособности и эффективности предложенного метода идентификации. Значения момента инерции и коэффициента вязкого трения вводятся в ПК. Полный момент инерции $J_{\text{т}}$ составляет $0{,}422 \cdot 10^{-4}$ кг·м^2, а коэффициент вязкого трения равен $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ (Н·м·с/рад). В моделировании кулоновское трение равно 0,02 Н·м. На рис. 4 и 5 показаны результаты моделирования и экспериментальные результаты идентификации параметров с помощью предлагаемого метода.

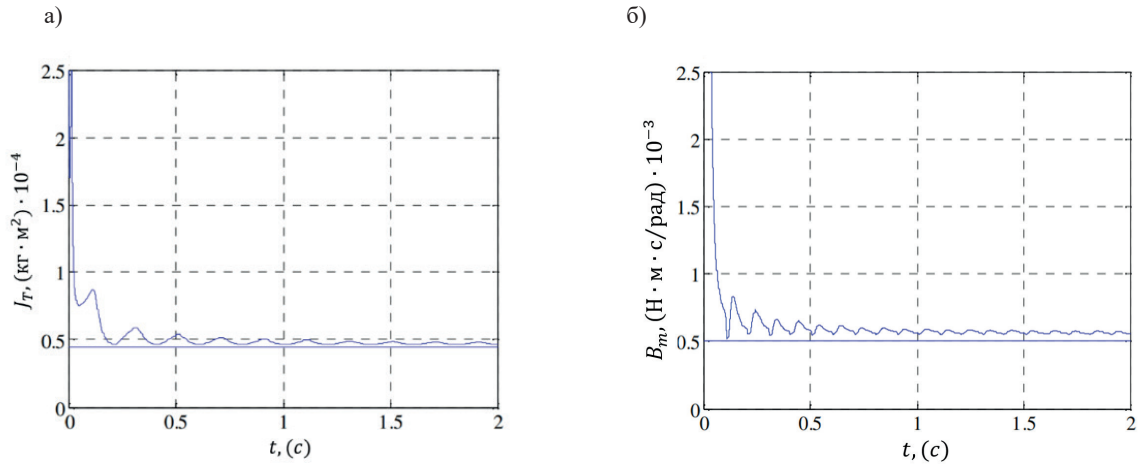

Рис. 4. Результаты моделирования метода идентификации механических параметров:
а — момент инерции; *б* — коэффициент вязкого трения

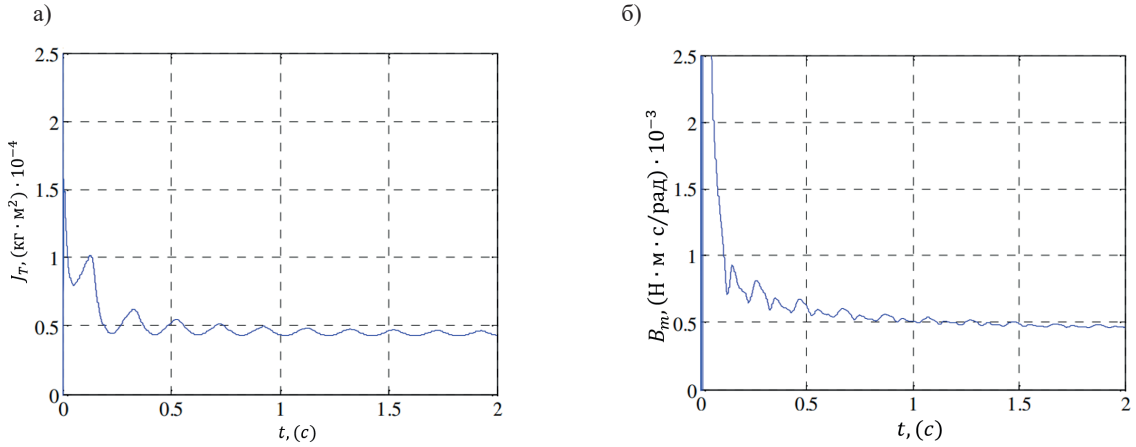

Рис. 5. Результаты экспериментальной модели метода идентификации механических параметров:
а — момент инерции; *б* — коэффициент вязкого трения

Обсуждение (Discussion)

С использованием предложенного метода идентификации параметров механической системы электропривода были получены уравнения для общего момента инерции и коэффициента вязкого трения. Знание численных значений этих параметров в произвольный момент времени позволяет эффективно управлять электроприводом [12]. При использовании персонального компьютера и программного обеспечения было выполнено компьютерное моделирование процесса идентификации. На основе реальной модели электропривода были проведены натурные эксперименты. Электродвигатель вращался равноускорено в одном направлении. Даже для такого однонаправленного вращения идентифицируемые значения параметров практически совпали с экспериментальными значениями. Ошибка идентификации момента инерции находится в пределах 10 %, а погрешность коэффициента вязкого трения не превышает 20 %.

Рассмотренный метод реализован при идентификации механических параметров системы управления следящими электроприводами. При реализации метода достигается требуемая точность идентификации параметров, что определяет возможность его практического использования для решения задачи статистической идентификации специальных технических устройств [13], [14].

Заключение (Conclusion)

В статье предложен новый метод идентификации параметров следящего электропривода: момента инерции и коэффициента вязкого трения, основанный на динамической модели механической

системы электропривода. Для его реализации требуется знание номинального значения крутящего момента и фактической скорости вращения электродвигателя. Таким образом, предлагаемый метод позволяет определить момент инерции и коэффициент вязкого трения в реальном масштабе времени путем выполнения несколько простых расчетов без влияния внешнего возмущения.

Полученное значение момента инерции можно использовать для автонастройки коэффициентов усиления в регуляторе скорости, датчике скорости и датчике возмущающих воздействий. Эффективность и целесообразность предлагаемого метода доказана методом компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водовозов А. М.* Интерфейсный подход к задаче оптимизации электропривода / А. М. Водовозов, Д. А. Оботуров, А. А. Пискунов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: тр. VII Междунар. электрон. науч. конф.— Воронеж: ЦЧКИ, 2002.— С. 7–8.

2. *Абуфанас А. С.* Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга / А. С. Абуфанас, А. А. Лобатый, А. Г. Шведко // Системный анализ и прикладная информатика.— 2017.— № 2.— С. 39–45.

3. *Баратова К. В.* Исследование влияния импульсных помех на нейросетевую параметрическую идентификацию асинхронных электроприводов / К. В. Баратова, В. И. Полищук // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.— Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2019.— С. 148–152.

4. *Лебедев С. К.* Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода / С. К. Лебедев, А. А. Коротков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета.— 2009.— № 3.— С. 5–8.

5. *Пискунов А. А.* Определение параметров асинхронного электропривода методом статистической идентификации / А. А. Пискунов // Информационные технологии моделирования и управления.— 2005.— № 7 (25).— С. 965–969.

6. *Нестеров А. А.* Параметрическая идентификация электропривода постоянного тока на основе регрессионного анализа его кривой тока якоря, полученной экспериментально при реверсировании, в системе Mathcad / А. А. Нестеров, С. В. Нестеров, А. В. Нестеров // Прогрессивные технологии и процессы: сб. науч. ст. 4-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф.— Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017.— С. 142–144.

7. *Водовозов А. М.* Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение.— 2009. — Т. 52.— № 12.— С. 40–43.

8. *Елюков А. С.* К вопросу об идентификации линейных динамических систем по результатам экспериментальных исследований / А. С. Елюков, А. М. Водовозов // Системы управления и информационные технологи.— 2008.— № 2–2(32).— С. 253–256.

9. *Тютиков В. В.* Система управления манипуляционным роботом с компенсацией динамических моментов / В. В. Тютиков, Е. В. Красильникъянц, А. А. Варков // Автоматизация в промышленности.— 2015.— № 6. — С. 58–63.

10. *Полющенков И. С.* Идентификация электромеханической системы методом вещественной интерполяции / И. С. Полющенков, С. И. Мелентьев // Энергетика, информатика, инновации-2017: сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.— Смоленск: Универсум, 2017.— С. 170–173.

11. *Солодкии Е. М.* Параметрическая идентификация асинхронного двигателя на основе алгоритма фазовой автоподстройки частоты / Е. М. Солодкии, Д. А. Даденков, А. М. Костыгов // Электротехника.— 2018. — № 11.— С. 53–57.

12. *Каширских В. Г.* Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей / В. Г. Каширских, А. В. Нестеровский // Вестник Кузбасского государственного технического университета.— 2005.— № 1 (45). — С. 73–74.

13. *Саушев А. В.* Метод параметрической идентификации электротехнических систем в реальном масштабе времени / А. В. Саушев [и др.] // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.— CreateSpace, 2017.— С. 86–88.

14. *Саушев А. В.* Идентификация электроприводов портовых перегрузочных машин / А. В. Саушев, Д. И. Троян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015.— № 5 (33).— С. 169–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-169-183.

15. *Kim N. J.* Inertia identification for the speed observer of the low speed control of induction machines / N. J. Kim, H. S. Moon, D. S. Hyun // IEEE Transactions on Industry Applications.— 1996.— Vol. 32.— Is. 6.— Pp. 1371–1379. DOI: 10.1109/28.556641.

16. *Hong S. J.* A novel inertia identification method for speed control of electric machine / S. J. Hong, H. W. Kim, S. K. Sul // Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation.— IEEE, 1996.— Vol. 2.— Pp. 1234–1239. DOI: 10.1109/IECON.1996.566056.

17. *Szczepanski R.* Auto-tuning process of state feedback speed controller applied for two-mass system / R. Szczepanski, M. Kaminski, T. Tarczewski // Energies.— 2020.— Vol. 13.— № 12 — Pp. 3067. DOI: 10.3390/en13123067.

REFERENCES

1. Vodovozov, A. M., D. A. Oboturov, and A. A. Piskunov. “Interfeisnyi podkhod k zadache optimizatsii elektroprivoda.” *Sovremennye problemy informatizatsii v tekhnike i tekhnologiyakh: Trudy VII Mezhdunarodnoi elektronnoi nauchnoi konferentsii*. Voronezh: TsChKI, 2002. 7–8.

3. Abufanas, A. S., A. A. Lobaty, and A. G. Shvedko. “Search algorithm for the parametric identification of the electric drive of the monitoring system.” *System analysis and applied information science* 2 (2017): 39–45. DOI: 10.21122/2309-4923-2017-2-39-46.

4. Baratova, K. V., and V. I. Polishchuk. “Issledovanie vliyaniya impul’snykh pomekh na neirosetevuyu parametricheskuyu identifikatsiyu asinkhronnykh elektroprivodov.” *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: Sbornik nauchnykh trudov*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2019. 148–152.

5. Lebedev, C. K. and A. A. Korotkov. “Drive load observers sinthesis algorithms.” *Vestnik IGEU* 3 (2009): 5–8.

6. Piskunov, A. A. “Opredelenie parametrov asinkhronnogo elektroprivoda metodom statisticheskoi identifikatsii.” *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya* 7(25) (2005): 965–969.

7. Nesterov, A. A., S. V. Nesterov, and A. V. Nesterov. “Parametricheskaya identifikatsiya elektroprivoda postoyannogo toka na osnove regressionnogo analiza ego krivoi toka yakorya, poluchennoi eksperimental’no pri reversirovanii, v sisteme Mathcad.” *Progressivnye tekhnologii i protsessy: Sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kursk: Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo “Universitetskaya kniga”, 2017. 142–144.

8. Vodovozov, Alexander M., and Alexander S. Elyukov. “Algorithms of parametrical identification of electromechanical systems protected against hindrance.” *Journal of Instrument Engineering* 52.12 (2009): 40–43.

9. Elyukov, A. S., and A. M. Vodovozov. “K voprosu ob identifikatsii lineinykh dinamicheskikh sistem po rezul’tatam eksperimental’nykh issledovanii.” S*istemy upravleniya i informatsionnye tekhnologi* 2–2(32) (2008): 253–256.

11. Tyutikov, V. V., E. V. Krasil’nik”yants, and A. A. Varkov. “Sistema upravleniya manipulyatsionnym robotom s kompensatsiei dinamicheskikh momentov.” *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 6 (2015): 58–63.

13. Polyushchenkov, I. S., and S. I. Melent’ev. “Identifikatsiya elektromekhanicheskoi sistemy metodom veshchestvennoi interpolyatsii.” *Energetika, informatika, innovatsii — 2017: Sbornik trudov VII-oi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Smolensk: Universum, 2017. 170–173.

14. Solodkii, E. M., D. A. Dadenkov, and A. M. Kostygov. “Parametric identification of an induction motor based on a phase-locked-loop frequency control algorithm.” *Russian Electrical Engineering* 89.11 (2018): 670–674. DOI: 10.3103/S106837121811010X.

15. Kashirskikh, V. G., and A. V. Nesterovskii. “Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigatelei.” *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 1(45) (2005): 73–74.

16. Saushev, A. V., N. V. Shirokov, D. I. Troyan, D. S. Ivanova, and M. V. Kovalev. “Metod parametricheskoi identifikatsii elektrotekhnicheskikh sistem v real’nom masshtabe vremeni.” *Aktual’nye napravleniya fundamental’nykh i prikladnykh issledovanii: Materialy XII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. CreateSpace, 2017. 86–88.

17. Saushev, Alexander Vasilyevich, and Dmitry Igorevich Trojan. “Identification of electric drives of port reloading cars.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 169–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-169-183.

18. Kim, Nam-Joon, Hee-Sung Moon, and Dong-Seok Hyun. “Inertia identification for the speed observer of the low speed control of induction machines.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 32.6 (1996): 1371–1379. DOI: 10.1109/28.556641.

19. Hong, Seok-Joon, Heui-Wook Kim, and Seung-Ki Sul. "A novel inertia identification method for speed control of electric machine." *Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*. Vol. 2. IEEE, 1996. 1234–1239. DOI: 10.1109/IECON.1996.566056.

20. Szczepanski, Rafal, Marcin Kaminski, and Tomasz Tarczewski. "Auto-tuning process of state feedback speed controller applied for two-mass system." *Energies* 13.12 (2020): 3067. DOI: 10.3390/en13123067.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лахменев Алексей Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Саушев Александр Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *alakhmenev@gmail.com*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*

Саушев Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *Saushev@bk.ru*, *SaushevAV@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lakhmenev, Alexey S.— Postgraduate
Supervisor:
Saushev, Alexander V.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *alakhmenev@gmail.com*, *kaf_electroprivod@gumrf.ru*

Saushev, Alexander V.—
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *Saushev@bk.ru*, *SaushevAV@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2021 г.
Received: September 6, 2021.