

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.03

УДК 519.71

**Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, А.Н. Хуснутдинов**

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

## **БЕСПОИСКОВАЯ ГРАДИЕНТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Качество автоматизации технологических процессов различных промышленных агрегатов в существенной степени определяется характеристиками соответствующих систем управления электроприводов (СУЭП). К данным характеристикам относятся устойчивость, точность, быстродействие и другие динамические показатели, которые должны, по возможности, оставаться в пределах требуемых значений при изменении параметров СУЭП. Коэффициент передачи СУЭП оказывает максимальное влияние на указанные характеристики. Информация о текущем значении коэффициента передачи позволит осуществить анализ работы электропривода, а также сформировать корректирующие воздействия на алгоритм управления в условиях параметрических возмущений и обеспечить требуемое качество функционирования. В этой связи идентификация коэффициента передачи СУЭП является актуальной задачей. **Цель исследования:** разработка метода идентификации коэффициента передачи СУЭП на основе беспойскового градиентного алгоритма. **Методы:** метод беспойскового (аналитического) определения идентифицируемого параметра путем вычисления градиента показателя качества и организации его движения к экстремуму с применением программной среды MatLab Simulink. Показателем качества является квадрат невязки между действительным и эталонным значением выходной координаты СУЭП. **Результаты:** идентификация СУЭП постоянного тока разработанным методом без учета внешних возмущений позволила получить оценку коэффициента передачи с погрешностью, не превышающей 0,01%. Изменение нагрузки на валу вносит значительную погрешность в результат идентификации. Разработан способ компенсации момента сопротивления, обеспечивающий высокую робастность метода идентификации к данному возмущению. Результаты моделирования в программной среде MatLab показали малую чувствительность метода как к параметрическим, так и координатным возмущениям, которые не оказывают существенного влияния на установившееся значение оценки коэффициента передачи. **Практическая значимость:** предложенный в работе метод обеспечивает идентификацию коэффициента передачи электропривода в условиях влияния возмущений различной природы, что дает возможность анализа и контроля работы электропривода, а также поддержания требуемого режима функционирования путем формирования соответствующих корректирующих воздействий.

**Ключевые слова:** идентификация, коэффициент передачи, электропривод, градиентный алгоритм, оптимизация, возмущение, невязка.

**N.A. Malev, O.V. Pogoditsky, A.R. Imamiev**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

## **SEARCH-FREE GRADIENT IDENTIFICATION OF THE COEFFICIENT TRANSMISSION OF CONTROL SYSTEM DC ELECTRIC DRIVE**

The quality of automation technological processes various industrial units determined by the characteristics of the control systems for electric drives (EDCS). These characteristics include sustainability, accuracy, quickness, etc., which must remain within the required values when changing the parameters EDCS. The coefficient transmission of the EDCS has the maximum effect on the specified characteristics. Information about the current coefficient transmission value will allow to analyze the operation of the electric drive and to form corrective actions on the control algorithm in conditions of parametric disturbances. In this regard, the identification of the coefficient transmission EDCS is an actual task. **Purpose:** development of a method for identifying the transmission coefficient of the EDCS based on a search-free gradient algorithm. **Methods:** a method of search-free determination of the identified parameter by calculating the gradient of the quality indicator and organizing its movement to the extreme using the MatLab Simulink software environment. The quality indicator is adopted the squared discrepancy between the actual and reference values of the output coordinates of the EDCS. **Results:** identification of DC EDCS by the developed method without taking into account external disturbances made it possible to obtain an estimate of the coefficient transmission with an error not exceeding 0,01 %. Changing the load introduces a significant error in the identification result. A method has been developed to compensate for the static moment of resistance, which ensures high robustness of the identification method for this type of external disturbance. The simulation results in the MatLab Simulink software environment showed a low sensitivity of the method to both parametric and coordinate disturbances, which do not significantly affect the steady-state value of the coefficient transmission estimate. **Practical relevance:** the method proposed in the work provides identification of the coefficient transmission of a direct current electric drive under the influence of disturbances of various physical nature, which makes it possible to analyze and control the operation of an electric drive, as well as maintain the required mode of operation by forming appropriate corrective actions.

**Keywords:** identification, coefficient transmission, electric drive, gradient algorithm, optimization, disturbance, discrepancy.

### **Введение**

Системы управления электроприводов, отвечающие за процедуру автоматизации различных промышленных установок и технологических комплексов, в процессе функционирования подвергаются, как правило, влиянию дестабилизирующих факторов. Воздействие этих факторов носит негативный характер, вызывая изменение параметров системы управления и, как следствие, ухудшение показателей качества процесса управления [1–4]. Данное обстоятельство обуславливает применение аналитических систем идентификации, которые на основе известных математических моделей объектов управления формируют алгоритмы вычисления оценок нестабильных параметров СУЭП в режиме реального

времени [5–7]. Дестабилизирующие факторы могут носить экзогенный (внешний) и эндогенный (внутренний) характер и приводят либо к координатным, либо к параметрическим возмущениям соответственно [8–10]. Перечисленные дестабилизирующие факторы в совокупности оказывают влияние как на вынужденную, так и на свободную составляющую движения электропривода, изменяя таким образом характер переходных процессов и установившиеся значения регулируемых координат, причем определяющую роль в данном случае играют параметрические возмущения [11–13]. В связи с этим идентификация параметров СУЭП в процессе функционирования является актуальной задачей. Коэффициент передачи является одним из наиболее влияющих на показатели качества СУЭП-параметров, поэтому настоящая работа посвящена беспойсковой градиентной идентификации коэффициента передачи системы управления электропривода постоянного тока.

### Формулировка метода

Идентифицируемый параметр изменяется по следующему закону:

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J, \quad (1)$$

где  $\nabla_k$  – оператор градиента по параметру,  $\nabla_k = \frac{\partial}{\partial K}$ ;  $\lambda_k$  – коэффициент, характеризующий скорость идентификации параметра;  $J$  – показатель качества функционирования СУЭП.

Показатель качества  $J$ , обеспечивающий сравнительную простоту реализации метода идентификации [14, 15], определяется по выражению

$$J = \varepsilon^2(t), \quad (2)$$

где невязка

$$\varepsilon(t) = y_o(t) - y_m(t) \quad (3)$$

представляет собой разность между действительным  $y_o(t)$  и эталонным  $y_m(t)$  значениями выходной координаты СУЭП.

Градиент принятого показателя качества функционирования СУЭП определяется согласно выражению (2):

$$\nabla_k J = \frac{\partial [\varepsilon(t)]^2}{\partial K} = 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K}. \quad (4)$$

Передачная функция разомкнутого электропривода в общем случае описывается дробно-рациональным выражением в операторной форме:

$$W(s) = \frac{K \sum_{k=0}^m a_k s^k}{\sum_{k=0}^n b_k s^k} = \frac{K (a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0)}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент передачи электропривода. Выражение (5) описывает статическую систему.

Передачная функция замкнутого электропривода относительно сигнала рассогласования  $\Delta u$  имеет вид:

$$\Phi_{\Delta u}(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{1}{1+W(s)} = \frac{B(s)}{B(s)+KA(s)}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{вх}}(s)$  – изображение по Лапласу входного задающего воздействия.

На основании формулы (6) передачная функция инверсной модели, необходимой для реализации метода идентификации, имеет вид:

$$\Phi_{\Delta u}^{im}(s) = \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B(s)+KA(s)}{B(s)} = 1 + \frac{KA(s)}{B(s)}, \quad (7)$$

где  $U_{im}(s)$  – изображение по Лапласу выходного сигнала инверсной модели.

Вычислим градиент от выражения (7) по коэффициенту передачи СУЭП  $K$  и получим соответствующую функцию чувствительности [16–20] передачной функции инверсной модели:

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta u}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{A(s)}{B(s)}. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что функция чувствительности не зависит от изменений параметра  $K$  и поэтому может быть применена для идентификации коэффициента передачи СУЭП.

На основании выражений (1) и (4) запишем алгоритм беспоисковой градиентной идентификации коэффициента передачи  $K$ :

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J = -\lambda_k 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K(t)}. \quad (9)$$

Запишем выражение (9) для изображений:

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{\text{вх}}(s) - U_{\text{им}}(s)] \left[ -\frac{\partial U_{\text{им}}(s)}{\partial K} \right] =$$

$$= -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{\text{вх}}(s) - U_{\text{им}}(s)] \left[ -\frac{\partial \Phi_{\Delta u}^{\text{им}}(s)}{\partial K} \Delta U(s) \right]. \quad (10)$$

Окончательно, с учётом выражения (8), аналитическое определение оценки коэффициента передачи СУЭП получим из выражения:

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{\text{вх}}(s) - U_{\text{им}}(s)] \left[ -\frac{A(s)}{B(s)} \Delta U(s) \right]. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что в данном случае инверсная модель выступает в качестве эталонной модели, невязка вычисляется на основании соотношения

$$\varepsilon(t) = u_{\text{вх}}(t) - u_{\text{им}}(t), \quad (12)$$

а коэффициенты полиномов числителя и знаменателя (8) определяются номинальными значениями параметров СУЭП за исключением коэффициента передачи  $K$ .

### Синтез контура скорости СУЭП

В качестве объекта исследования рассматриваются замкнутый по скорости электропривод, в состав которого входят общепромышленный коллекторный двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г с установленным на его валу тахогенератором, управляемый выпрямитель и ПИД-регулятор скорости. Технические характеристики двигателя сведены в таблице [21].

Технические характеристики двигателя 4ПБ112М2Г

$U$ , В	$P$ , кВт	$I_a$ , А	$\eta$ , %	$n$ , об/мин	$R_a$ , Ом	$L_a$ , Гн	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
220	3,0	8,1	78,5	3000	1,47	0,011	0,015

На основании приведенных данных коэффициент противо-ЭДС:

$$c = \frac{U - I_a R_a}{\omega} = \frac{220 - 8,1 \cdot 1,47}{314} = 0,663 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}.$$

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,011}{1,47} = 0,0075 \text{ с}.$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_m = \frac{J_{\text{ном}} R_a}{c^2} = \frac{0,015 \cdot 1,47}{0,663^2} = 0,0502 \text{ с.}$$

Передаточная функция двигателя постоянного тока:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{1/c}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1}.$$

Двигатель получает питание от четырехквadrантного компактного тиристорного преобразователя постоянного тока бескорпусного исполнения с функцией рекуперации энергии в сеть типа Sprint Electric 3600XRi с передаточной функцией

$$W_{\text{ТП}}(s) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}} s + 1},$$

где  $K_{\text{ТП}}$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя,  $K_{\text{ТП}} = 27,5$ ;  $T_{\text{ТП}}$  – постоянная времени тиристорного преобразователя,  $T_{\text{ТП}} = 0,005$  с.

На выходе тахогенератора типа ТП80-20-0,2 установлен RC-фильтр для сглаживания пульсаций выходного напряжения с постоянной времени  $T_f = 0,001$  с. Передаточная функция тахогенератора с фильтром определяется как

$$W_{\text{ТГ}}(s) = \frac{K_{\text{ТГ}}}{T_f s + 1},$$

где  $K_{\text{ТГ}}$  – коэффициент передачи тахогенератора, численно равный крутизне выходного напряжения,  $K_{\text{ТГ}} = 0,0255$  В·с/рад.

Передаточную функцию регулятора скорости при настройке контура на технический оптимум представим в виде [22–25]:

$$W_{\text{РС}}(s) = \frac{K_{\text{РС}} (T_{\text{РС1}} s + 1) (T_{\text{РС2}} s + 1)}{T_{\text{РС1}} s (T_{\text{РС3}} s + 1)} = \frac{2,9818 (0,041 s + 1) (0,0092 s + 1)}{0,041 s (0,0005 s + 1)},$$

где постоянные времени:

$$T_{\text{РС1}} = \frac{2T_a}{1 - \sqrt{1 - \frac{4T_a}{T_m}}} = \frac{2 \cdot 0,0075}{1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,0075}{0,0502}}} = 0,041 \text{ с;}$$

$$T_{pc2} = \frac{2T_a}{1 + \sqrt{1 - \frac{4T_a}{T_m}}} = \frac{2 \cdot 0,0075}{1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,0075}{0,0502}}} = 0,0092 \text{ с};$$

$$T_{pc3} = \frac{T_{pc2}}{N} = 0,0005 \text{ с}, N \geq 10;$$

коэффициент передачи:

$$K_{pc} = \frac{T_{pc1}}{2K_{тп}K_{дв}K_{тг}(T_{pc3} + T_{тп} + T_f)} =$$

$$= \frac{0,041}{2 \cdot 27,5 \cdot 1,5083 \cdot 0,0255(0,0005 + 0,005 + 0,001)} = 2,9818,$$

где  $K_{дв}$  – коэффициент передачи двигателя,

$$K_{дв} = 1/c = \frac{1}{0,663} = 1,5083 \text{ рад/В} \cdot \text{с}.$$

### Схема идентификации коэффициента передачи СУЭП

Передаточная функция замкнутого электропривода постоянного тока относительно сигнала рассогласования имеет вид:

$$\Phi_{\Delta u}(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{вх}(s)} = \frac{1}{1 + W_{pc}(s)W_{тп}(s)W_{дв}(s)W_{тг}(s)} =$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{K_{pc}(T_{pc1}s + 1)(T_{pc2}s + 1)}{T_{pc1}s(T_{pc3}s + 1)} \cdot \frac{K_{тп}K_{дв}K_{тг}}{(T_{тп}s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)}(T_f s + 1)} = (13)$$

$$= \frac{T_{pc1}s(T_{pc3}s + 1)(T_{тп}s + 1)(T_f s + 1)}{T_{pc1}s(T_{pc3}s + 1)(T_{тп}s + 1)(T_f s + 1) + K_{pc}K_{тп}K_{дв}K_{тг}}.$$

Коэффициент передачи СУЭП представляет собой произведение коэффициентов передачи всех элементов электропривода:

$$K = K_{pc}K_{тп}K_{дв}K_{тг}. \quad (14)$$

На основании выражения (13) определим передаточную функцию инверсной модели:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta U}^{im}(s) &= \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{T_{pc1}s(T_{pc3}s+1)(T_{тп}s+1)(T_f s+1) + K}{T_{pc1}s(T_{pc3}s+1)(T_{тп}s+1)(T_f s+1)} = \\ &= 1 + \frac{K}{T_{pc1}s(T_{pc3}s+1)(T_{тп}s+1)(T_f s+1)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Частная производная (градиент) от выражения (15) по коэффициенту передачи СУЭП:

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta U}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{1}{T_{pc1}s(T_{pc3}s+1)(T_{тп}s+1)(T_f s+1)}. \quad (16)$$

Полученная функция чувствительности не зависит от идентифицируемого параметра, т.е. инвариантна к изменению коэффициента передачи СУЭП, что соответствует общему выражению (8).

Структурная схема динамической модели, иллюстрирующая процедуру идентификации коэффициента передачи СУЭП постоянного тока, показана на рис. 1.

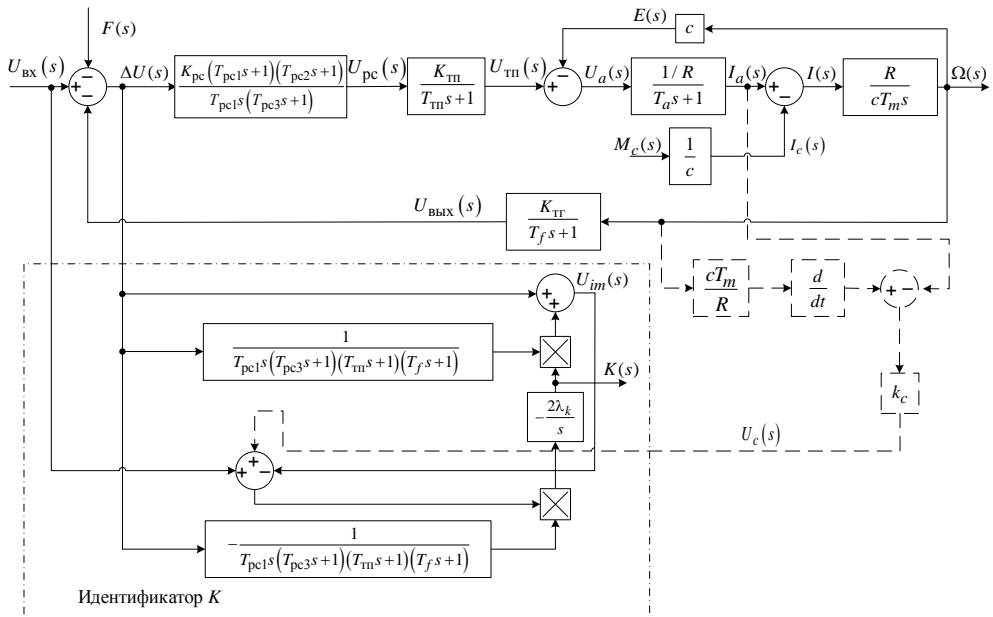


Рис. 1. Структурная схема динамической модели идентификатора коэффициента передачи СУЭП постоянного тока



Штриховыми линиями на рис. 1 изображены блоки, реализующие способ компенсации момента сопротивления  $M_c$ . Особенности формирования корректирующего воздействия  $U_c$  описаны ниже.

### Моделирование процесса идентификации коэффициента передачи СУЭП

Simulink-модель идентификатора коэффициента передачи СУЭП постоянного тока формируется на основании схемы, показанной на рис. 1. Соответствующая схема представлена на рис. 2.

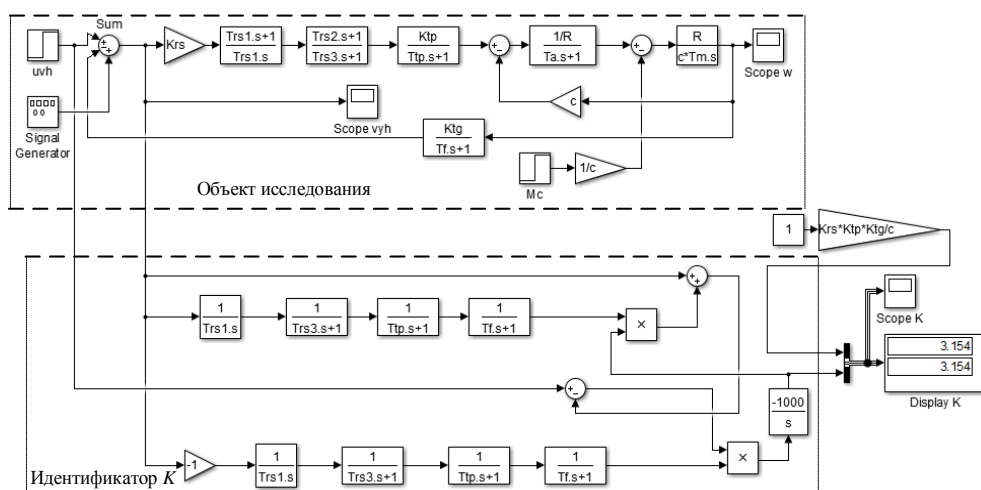


Рис. 2. Simulink-модель идентификатора коэффициента передачи СУЭП постоянного тока

На рис. 2 блоки в верхней части схемы соответствуют исследуемой СУЭП постоянного тока, блоки в нижней части схемы реализуют метод идентификации в соответствии с выражением (11), а блоки Scope K и Display K регистрируют и отображают фактическое значение коэффициента передачи СУЭП  $K$  и его оценку  $K(t)$ .

В командное окно MatLab через точку с запятой вводим значения параметров электропривода, характеризующие номинальный режим работы СУЭП:

$Krs=2,9818$ ;  $Trs1=0,041$ ;  $Trs2=0,0092$ ;  $Trs3=0,0005$ ;  $Ktp=27,5$ ;  $Ttp=0,005$ ;  
 $c=0,663$ ;  $Ta=0,0075$ ;  $Tm=0,0502$ ;  $Ktg=0,0255$ ;  $Tf=0,001$ ;  $R=1,47$ .

Коэффициент, характеризующий скорость идентификации?  $\lambda_k = 500$ .

Результаты моделирования при номинальных значениях параметров представлены на рис. 3.

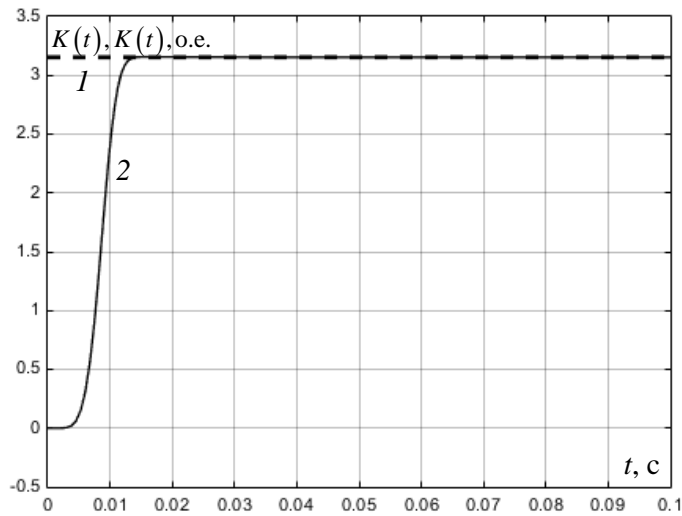


Рис. 3. Результаты моделирования процесса идентификации коэффициента передачи СУЭП  $K$ : 1 – номинальное значение  $K(t)$ ; 2 – оценка  $K(t)$

В соответствии с выражением (14) номинальное значение общего коэффициента передачи электропривода имеет вид:

$$K_{\text{НОМ}} = K_{\text{РС}} K_{\text{ТП}} K_{\text{ДВ}} K_{\text{ТГ}} = 2,9818 \cdot 27,5 \cdot 1,5083 \cdot 0,0255 = 3,154,$$

при этом полученная оценка практически не отличается от номинального значения.

Исследования, проведённые при детерминированном изменении коэффициента  $K$ , показали, что идентификация осуществляется с погрешностью, не превышающей 0,01 %, т.е.  $K \approx K$ . При этом время, затрачиваемое на идентификацию, не превышает 0,02 с.

Изменения постоянных времени элементов СУЭП вызывают изменение показателей качества переходного процесса вычисления оценки  $K$  и могут привести к снижению быстродействия, появлению перерегулирования и другим качественным изменениям зависимости  $K(t)$ , однако установившееся значение оценки коэффициента передачи СУЭП  $K_{\text{уст}}$  при этом соответствует фактическому значению  $K$ . Следовательно, рассматриваемый в работе метод беспойсковой градиентной

идентификации инвариантен к параметрическим возмущениям и обеспечивает малую погрешность определения  $K$  за сравнительно небольшие промежутки времени.

Однако кроме параметрических возмущений функционирование электропривода в реальных условиях сопровождается внешними координатными возмущениями, такими как изменение момента сопротивления нагрузки  $M_c$ , а также шумами и наводками  $f$  в цепях управления (см. рис. 1).

Устанавливаем в блоке задания нагрузки электропривода  $M_c$  значение момента сопротивления  $M_c = 0,8M_{ном} = 0,8 \cdot 9,554 = 7,64 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а сигнал шума задаём с помощью блока Signal Generator в виде сигнала на сумматоре Sum (см. рис. 2), выбирая во вкладке Wave form наименование сигнала Random и устанавливая амплитуду сигнала 0,3 В, частоту – 1 кГц.

Моделирование производим при подключении нагрузки через 0,1 с после пуска. Результаты вычисления оценки  $K$  представлены на рис. 4.

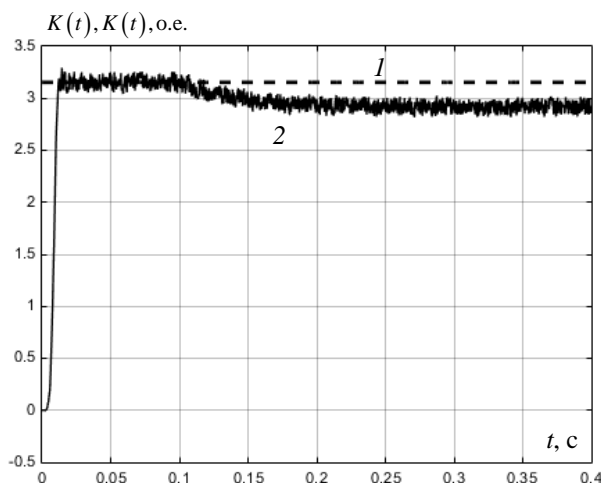


Рис. 4. Результаты моделирования процесса идентификации коэффициента передачи СУЭП: 1 – номинальное значение  $K(t)$ ; 2 – оценка  $K(t)$  при влиянии внешних возмущений  $M_c$  и  $f$

График 2 на рис. 4 отражает существенное влияние координатных возмущений на результат идентификации. Полученная в процессе вычисления оценка  $K(t)$  сопровождается флуктуациями с амплитудой и частотой помехи  $f$ , что затрудняет определение установившегося зна-

чения коэффициента передачи СУЭП. Влияние момента сопротивления проявляется в отклонении установившегося значения оценки  $K_{уст}$  от фактической величины  $K$ , прямо пропорциональном амплитуде приложенного момента. Интегральная составляющая ПИД-регулятора обеспечивает абсолютно жёсткую механическую характеристику электропривода и независимость установившегося значения скорости вращения электропривода  $\Omega_{уст}$  от статического момента сопротивления. Однако влияние  $M_c$  приводит к изменению сигнала рассогласования  $\Delta U(s)$ , а значит и невязки (12), в результате чего возникает погрешность идентификации коэффициента передачи СУЭП в соответствии с выражением (11).

Как видно из рис. 4, определяющую роль в формировании погрешности играет момент сопротивления, поскольку искажения зависимости  $K(t)$  от помехи  $f$  не вносят значительных изменений в величину  $K_{уст}$  и могут быть снижены за счет применения фильтра нижних частот. В целях повышения робастности метода беспоисковой градиентной идентификации коэффициента передачи СУЭП к статическому моменту сопротивления необходимо сформировать корректирующее воздействие, компенсирующее влияние  $M_c$  и сводящее погрешность идентификации к минимуму. Уравнение механического равновесия электропривода, выраженное через токи (см. схему на рис. 1):

$$i_a(t) - i_c(t) = i(t), \quad (17)$$

где  $i_a(t)$  – ток якоря;  $i_c(t)$  – ток, соответствующий моменту сопротивления;  $i(t)$  – ток, соответствующий динамическому моменту,  $i(t) = \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}$ .

Из соотношения (17) найдём ток:

$$i_c(t) = i_a(t) - \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (18)$$

который на основании информации о токе якоря  $i_a(t)$  с использованием датчика тока и об ускорении  $\frac{d\omega(t)}{dt}$  путем дифференцирования сигнала с тахогенератора позволяет получить искомый сигнал, пропорциональный моменту сопротивления  $M_c$ .

Корректирующее воздействие, компенсирующее влияние  $M_c$ , формируется в виде сигнала напряжения:

$$u_c(t) = k_c i_c(t), \quad (19)$$

где  $k_c$  – коэффициент пропорциональности, подобранный путем компьютерного эксперимента,  $k_c = 0,0565$  Ом. Невязка (12) становится функцией трех переменных  $\varepsilon(t) = f(u_{вх}, u_{им}, u_c)$ , т.е. задающее воздействие  $u_{вх}$  и сигнал с выхода инверсной модели  $u_{им}$  суммируются с корректирующим воздействием  $u_c$ , в результате чего происходит компенсация моментной составляющей погрешности.

Компенсацию возмущающего воздействия  $f$  осуществим путем фильтрации сигнала рассогласования  $\Delta U(s)$  с помощью фильтра нижних частот первого порядка с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени, равной 0,0075 с. В Simulink-модель, показанную на рис. 2, вводим блоки, реализующие уравнения (18), (19), а также соответствующий фильтр нижних частот. Результаты моделирования процесса идентификации коэффициента передачи СУЭП с компенсацией координатных возмущений и без компенсации показаны на рис. 5.

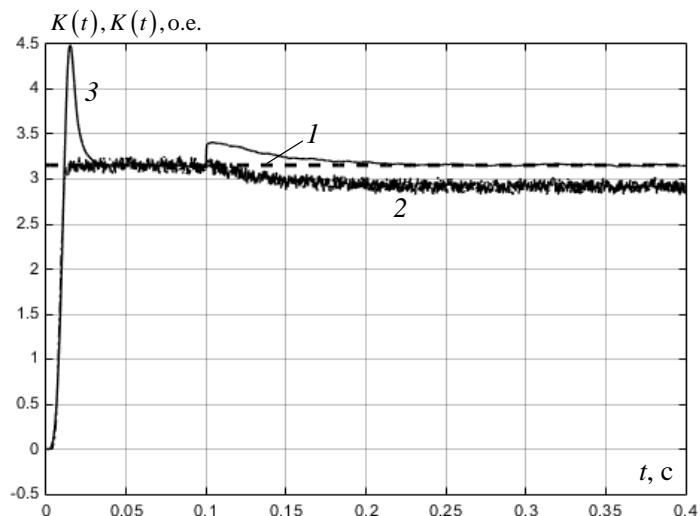


Рис. 5. Результаты моделирования процесса идентификации коэффициента передачи СУЭП  $K$ : 1 – номинальное значение  $K(t)$ ; 2 – оценка  $K(t)$  без компенсации возмущений  $M_c$  и  $f$ ; 3 – оценка  $K(t)$  с компенсацией возмущений  $M_c$  и  $f$

Сигнальная компенсация моментной составляющей погрешности вызывает динамические выбросы в начале процесса идентификации с перерегулированием 43 % на 0,015 с, а также при набросе нагрузки через 0,1 с от начала моделирования с амплитудой  $K_{\max}$  около 3,4 о.е. Процесс идентификации устанавливается примерно через 0,25 с, и установившееся значение оценки  $K_{\text{уст}} = 3,145$ , т.е. при номинальном значении коэффициента передачи СУЭП  $K = K_{\text{ном}} = 3,154$  погрешность идентификации составляет 0,28 %.

Таким образом, исследуемый в работе беспоисковый градиентный метод идентификации, а также разработанные решения по компенсации координатных возмущений обеспечивают высокую робастность по отношению к эндогенным и экзогенным дестабилизирующим факторам в процессе вычисления оценки коэффициента передачи СУЭП постоянного тока.

### **Заключение**

В настоящей статье проведены разработка и исследование метода беспоисковой градиентной идентификации коэффициента передачи СУЭП постоянного тока с применением модели чувствительности, инвариантной к идентифицируемому параметру.

Метод реализован на основе градиентного алгоритма минимизации показателя качества  $J = \varepsilon^2(t)$ , обеспечивающего сравнительную простоту реализации, при которой порядок идентификатора не превышает порядка основной системы. Эталонная модель объекта исследования представлена моделью, инверсной передаточной функции замкнутого электропривода относительно сигнала рассогласования  $\Delta u$ . Моделирование СУЭП постоянного тока в приложении MatLab/Simulink показало, что разработанный метод имеет малую чувствительность к эндогенным дестабилизирующим факторам, и вариации постоянных времени элементов СУЭП не оказывают влияния на установившееся значение оценки коэффициента передачи  $K_{\text{уст}}$ , т.е. изменения коэффициентов передачи элементов электропривода, являющихся сомножителями  $K = K_{\text{рс}}K_{\text{тп}}K_{\text{дв}}K_{\text{тг}}$ , идентифицируются в виде оценки  $K_{\text{уст}}$  с погрешностью, не превышающей 0,01 %. Анализ влияния экзогенных дестабилизирующих факторов показал высокую чувствительность метода

идентификации к данному виду возмущающих воздействий. При этом наибольший вклад в погрешность вычисления оценки  $K(t)$  вносит моментная составляющая ошибки, которая, алгебраически суммируясь с сигналом рассогласования  $\Delta u(t)$ , приводит к неконтролируемому изменению невязки  $\varepsilon(t)$  и в результате идентифицируемого параметра  $K_{уст}(t)$ . Для компенсации влияния статического момента сопротивления  $M_c$  предложен способ формирования корректирующего сигнала  $u_c(t)$ , полученного с применением датчика тока якоря и тахогенератора. В этом случае невязка определяется тремя переменными  $\varepsilon(t) = f(u_{вх}, u_{им}, u_c)$ , и сигнальная компенсация  $M_c$  обеспечивает определение установившегося значения коэффициента передачи электропривода  $K_{уст}(t)$  с погрешностью, составившей при номинальных параметрах СУЭП 0,28 %. Влияние шумов и наводок не оказывает существенного влияния на результат идентификации и при необходимости может быть снижено за счёт фильтрации сигнала рассогласования  $\Delta u(t)$  путём применения фильтра нижних частот.

Таким образом, разработанный метод беспойсковой градиентной идентификации при условии выполнения гипотезы о квазистационарности позволяет с высокой точностью произвести оценку коэффициента передачи СУЭП постоянного тока в режиме реального времени. Метод не требует сложного аппаратного обеспечения и больших вычислительных мощностей и реализуется на основе традиционно применяемых в электроприводе датчиков. Процесс идентификации может быть автоматизирован путём формирования соответствующего цифрового алгоритма и его реализации в виде программного кода. Результаты идентификации могут быть применены для анализа и контроля функционирования СУЭП, а также для построения адаптивных систем управления, обеспечивающих поддержание требуемого режима работы электропривода в условиях влияния дестабилизирующих факторов.

### Библиографический список

1. Rajpurohit T., Haddad W.M. Stochastic Finite-Time Partial Stability, Partial-State Stabilization, and Finite-Time Optimal Feedback Control // Mathematics of Control, Signals, and Systems. – 2017. – Vol. 29, № 2. – Art. 10. DOI: 10.1007/s00498-017-0194-9

2. Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability // *Nonlinear Dynamics*. – 2016. – Vol. 85, № 1. – P. 87–96. DOI: 10.1007/s11071-016-2669-5

3. Lazily adapted constant kinky inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control / J.P. Calliess [et al.] // *Automatica*. – 2020. – Vol. 122. – P. 109216. DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109216

4. Jammazi C., Abichou A. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control // *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. – 2018. – Vol. 35, № 1. – P. 249–277. DOI: 10.1093/imamci/dnw047

5. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models / N.A. Malev, A.I. Mukhametshin, O.V. Pogoditsky, W.M. Mwaku // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019. – Vol. 124. – P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/201912402005

6. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования  $Q$ -таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2020. – № 22 (2). – С. 86–97. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-86-97

7. Park Y. Robust and Optimal Attitude Stabilization of Spacecraft with External Disturbances // *Aerospace Science and Technology*. – 2005. – Vol. 9, № 3. – P. 253–259. DOI: 10.1016/j.ast.2005.01.002

8. Saushev A.V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing. – 2018. – Vol. 327, № 5. – P. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.

9. Deisenroth M.P., Fox D., Rasmussen C.E. Gaussian processes for data – efficient learning in robotics and control // *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 2015. – Vol. 37, № 2. – P. 408–423. DOI: 10.1109/TPAMI.2013.218

10. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. – 2014. – Vol. 24, № 17. – P. 2774–2784. DOI: 10.1002/rnc.3024



11. Ostroverkhov M., Pyzhov V., Korol S. Control of the electric drive under conditions of parametric uncertainty and coordinates' interrelation // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – IEEE, 2017. – P. 64–67.

12. Анисимов А.А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026

13. Кучер Е.С., Комазенко М.А., Ромашенко А.И. Синтез систем векторного управления малочувствительных к изменениям параметров асинхронного электропривода // Доклады Акад. наук высш. школы Рос. Федерации. – 2017. – № 2 (35). – С. 61–72. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-61-72

14. Modeling and control architecture of an autonomous mobile aerial platform for environmental monitoring / S. Jatsun [et al.] // 2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). – IEEE, 2019. – P. 177–182. DOI: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00036

15. Ginsberg K.S. Towards the Foundations of the Structural Identification Methodology of Large-Scale Technical Objects for Designing Automatic Control Systems // 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD). – IEEE, 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911037

16. Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 4. – С. 92–105.

17. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers / A.A. Anisimov, D.G. Kotov, S.V. Tararykin, V.V. Tyutikov // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2011. – Vol. 50, № 5. – P. 698–713. DOI: 10.1134/S1064230711040034

18. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Загирова В.Н. Идентификация параметров и частоты вращения ротора асинхронного двигателя на основе функций чувствительности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2020. – Т. 6. – С. 128–131.

19. Саушев А.В., Бова Е.В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов // Вестник Гос. ун-та морск. и речн. флота

им. адм. С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 2. – С. 380–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395

20. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 6. – С. 101–110. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110

21. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов / Н.А. Малёв, А.И. Мухаметшин, О.В. Погодицкий, А.Г. Городнов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 113–122. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122

22. Methods of Optimizing the Troubleshooting Parameters of Electric Power Facilities / L.S. Sabitov, P.P. Pavlov, V.P. Fandeyev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 915. – P. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012047

23. Comprehensive Test Procedure for Digital Instruments and Devices of Automated Versatile Systems / E.M. Khusnutdinova, P.P. Pavlov, V.P. Fandeyev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 915. – P. 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012032

24. Сольнищев Р.И., Каримов А.И., Каримов Т.И. Синтез цифровых регуляторов гироскопических командных приборов // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 25, № 1 (96). DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.1.108-118

25. Сташинов Ю.П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 // Электротехника. – 2016. – № 1. – С. 2–7.

## References

1. Rajpurohit T., Haddad W.M. Stochastic Finite-Time Partial Stability, Partial-State Stabilization, and Finite-Time Optimal Feedback Control. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, 2017, vol. 29, no. 2, Art. 10. DOI: 10.1007/s00498-017-0194-9

2. Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 85, no. 1, pp. 87-96. DOI: 10.1007/s11071-016-2669-5

3. Calliess J.P. et al. Lazily adapted constant kinky inference for non-parametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020, vol. 122, 109216 p. DOI: 10.1016/j.automatica.2020.109216

4. Jammazi C., Abichou A. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 249-277. DOI: 10.1093/imamci/dnw047

5. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Mwaku W.M. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019, vol. 124, 02005 p. DOI: 10.1051/e3sconf/201912402005

6. Malev N.A., Pogoditskii O.V., Malatsion A.S. Metod formirovaniia Q-tablits dlia avtomatizirovannogo kontroliia parametrov elektromekhanicheskikh preobrazovatelei s primeneniem lineinogo integral'nogo kriteriia [Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2020, no. 22 (2), pp. 86-97. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-86-97

7. Park Y. Robust and Optimal Attitude Stabilization of Spacecraft with External Disturbances. *Aerospace Science and Technology*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 253-259. DOI: 10.1016/j.ast.2005.01.002

8. Saushev A.V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, vol. 327, no. 5, 052029 p. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.

9. Deisenroth M.P., Fox D., Rasmussen C.E. Gaussian processes for data - efficient learning in robotics and control. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 408-423. DOI: 10.1109/TPAMI.2013.218

10. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *International*

*Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, vol. 24, no. 17, pp. 2774-2784. DOI: 10.1002/rnc.3024

11. Ostroverkhov M., Pyzhov V., Korol S. Control of the electric drive under conditions of parametric uncertainty and coordinates' interrelation. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. IEEE, 2017, pp. 64-67.

12. Anisimov A.A. Parametricheskaia optimizatsiia elektromekhanicheskikh sistem s regulatorami i nabliudateliami sostoianiiia [Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 21-26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026

13. Kucher E.S., Komazenko M.A., Romashchenko A.I. Sintez sistem vektornogo upravleniia malochuvstvitel'nykh k izmeneniiam parametrov asinkhronnogo elektroprivoda [Synthesis of systems of vector control of induction motor drive parameters low-sensitive to changes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii*, 2017, no. 2 (35), pp. 61-72. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-2-61-72

14. Jatsun S. et al. Modeling and control architecture of an autonomous mobile aerial platform for environmental monitoring. *2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*. IEEE, 2019, pp. 177-182. DOI: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00036

15. Ginsberg K.S. Towards the Foundations of the Structural Identification Methodology of Large-Scale Technical Objects for Designing Automatic Control Systems. *2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD)*. IEEE, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911037

16. Rutkovskii V.Iu., Glumov V.M. Osobennosti dinamiki adaptivnoi sistemy upravleniia s nelineinoy etalonnoy model'iu [Dynamics peculiarities of an adaptive control system with nonlinear reference model]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 4, pp. 92-105.

17. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analysis of parametric sensitivity and structural optimization of modal control systems with state controllers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 698-713. DOI: 10.1134/S1064230711040034

18. Afanas'ev A.Iu., Makarov V.G., Zagirova V.N. Identifikatsiia parametrov i chastoty vrashcheniia rotora asinkhronnogo dvigatel'ia na

osnove funktsii chuvstvitel'nosti [Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh - MMTT*, 2020, vol. 6, pp. 128-131.

19. Saushev A.V., Bova E.V. Pokazateli kachestva i kriterii optimal'nosti pri strukturno-parametricheskom sinteze avtomatizirovannykh elektroprivodov [The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 380-395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395

20. Malev N.A., Pogoditskii O.V., Tsvetkovich A.M. Osobennosti primeneniia teorii chuvstvitel'nosti dlia analiza vliianiia parametricheskikh vozmushchenii na dinamicheskie svoistva elektromekhanicheskikh preobrazovatelei [Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 101-110. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110

21. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditskii O.V., Gorodnov A.G. Eksperimental'no-analiticheskaiia identifikatsiia matematicheskoi modeli elektromekhanicheskogo preobrazovatel'ia postoiannogo toka s primeneniem metoda naimen'shikh kvadratov [Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 113-122. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-113-122

22. Sabitov L.S. Pavlov, P.P., Fandeyev V.P. et al. Methods of Optimizing the Troubleshooting Parameters of Electric Power Facilities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 915, 012047 p. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012047

23. Khusnutdinova E.M., Pavlov P.P., Fandeyev V.P. et al. Comprehensive Test Procedure for Digital Instruments and Devices of Automated Versatile Systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 915, 012032 p. DOI: 10.1088/1757-899X/915/1/012032

24. Sol'nitsev R.I., Karimov A.I., Karimov T.I. Sintez tsifrovyykh regulatorov giroskopicheskikh komandnykh priborov [Synthesis of digital regulators of gyroscopic command appliance]. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2017, vol. 25, no. 1 (96). DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.1.108-118

25. Stashinov Iu.P. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Част' 1 [On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1]. *Elektrotehnika*, 2016, no. 1, pp. 2-7.

### **Сведения об авторах**

**Малёв Николай Анатольевич** (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: maleev@mail.ru).

**Погодицкий Олег Владиславович** (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: pogoditskiy.ov@mail.ru).

**Хуснутдинов Азат Назипович** (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы» Казанского государственного энергетического университета (420066, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru)

### **About the authors**

**Nikolay A. Malev** (Kazan, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department “Instrument Making and Mechatronics” Kazan State Power Engineering University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: maleev@mail.ru).

**Oleg V. Pogoditskiy** (Kazan, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department “Instrument Making and Mechatronics” Kazan State Power Engineering University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: pogoditskiy.ov@mail.ru).

**Azat N. Khusnutdinov** (Kazan, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department “Electrotechnical complexes and systems” Kazan State Power Engineering University (420066, Kazan, 51, Krasnoselskaya str., e-mail: khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru).

Поступила: 05.04.2022    Одобрена: 20.05.2022    Принята к публикации: 12.09.2022

**Финансирование.** Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифра России в рамках исполнения условий соглашений №075-15-2021-1087 и №075-15-2021-1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Малёв, Н.А. Беспойсковая градиентная идентификация коэффициента передачи системы управления электропривода постоянного тока / Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, А.Н. Хуснутдинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 42–64. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.03

Please cite this article in English as:

Malev N.A., Pogoditsky O.V., Imamiev A.R. Search-free gradient identification of the coefficient transmission of control system dc electric drive. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 42, pp. 42-64. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.03