



АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛИ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, М.Р. Чилиева¹, А.Р. Иمامиев²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов», г. Казань, Россия
maleev@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В современных системах управления различных промышленных агрегатов основой для автоматизации технологических процессов является электрический привод. Высокие требования к качеству процесса управления, надёжности и энергетической эффективности технологических процессов и промышленных агрегатов определяют постановку и решение научно-практических задач по разработке и созданию новых перспективных систем управления электроприводов (СУЭП), позволяющих сохранить требуемое качество функционирования в условиях влияния дестабилизирующих факторов. Данные факторы могут воздействовать на систему управления в виде внешних координатных возмущений и суммироваться с соответствующими сигналами замкнутой СУЭП, а также выражаться в форме параметрических возмущений, приводящих к неустойчивости параметров СУЭП в процессе эксплуатации. Возникает необходимость создания такой системы управления, которая позволит осуществить идентификацию параметров СУЭП за счет введения в структуру системы соответствующих алгоритмов идентификации. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся беспоскоковый градиентный метод адаптивной идентификации, реализованный средствами программной среды MatLab. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе рассматривается задача параметрической идентификации электропривода с двигателем постоянного тока на основе определения функций чувствительности. Показатель качества процесса идентификации выбран из условия обеспечения близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения при вариациях неустойчивых параметров. Для построения алгоритма параметрической идентификации используется инверсная модель исследуемой СУЭП, показателем качества является квадрат невязки, а идентифицируемым параметром – общий коэффициент передачи электропривода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Моделирование в программной среде MatLab показало высокую робастность разработанного алгоритма идентификации к параметрическим возмущениям, которые не оказывают влияния на установившееся значение идентифицируемого параметра. Предложенный в работе способ компенсации статического момента сопротивления электропривода позволил обеспечить также малую чувствительность алгоритма и к внешним возмущениям. Идентификация общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока осуществляется с погрешностью, не превышающей 0,5% в режиме реального времени в условиях влияния возмущений различной физической природы.

Ключевые слова: алгоритм; неустойчивые параметры; электропривод; инверсная модель; модель чувствительности; дополнительное движение; невязка.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Чилиева М.Р., Иمامиев А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 160-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-160-174.

ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE DC ELECTRIC DRIVE USING THE INVERSE MODEL

NA. Malev¹, OV. Pogoditsky¹, MR. Chilyaeva¹, AR. Imamiev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of JSC "Grid Company" - "Directorate of facilities under construction", Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. In modern control systems of various industrial units, the basis for the automation of technological processes is an electric drive. High requirements for the quality of the control process determine the formulation and solution of scientific and practical tasks for the development and creation of new promising control systems for electric drives (EDCS), allowing to maintain the required quality of functioning under the influence of destabilizing factors. These factors can affect the control system in the form of external disturbances and be summed up with the corresponding signals of the closed EDCS, and also be expressed in the form of parametric disturbances. The need arises to create such a control system that will allow for the identification of the parameters of the EDCS by introducing the appropriate identification algorithms into its structure. **METHODS.** When solving the problem, a search-free gradient method of adaptive identification was used, implemented by means of the MatLab software environment. **RESULTS.** The paper considers the problem of parametric identification of an electric drive with a DC motor based on the definition of sensitivity functions. Wherein to construct an algorithm for parametric identification, an inverse model of the studied EDCS is used, the quality indicator is the squared discrepancy, and the identifiable parameter is the overall transmission coefficient of the electric drive. **CONCLUSION.** Modeling in the MatLab software environment showed a high robustness of the developed identification algorithm to parametric disturbances that do not affect the steady-state value of the identified parameter. The proposed method for compensating the moment of resistance electric drive also made it possible to provide a low sensitivity algorithm to external disturbances. The identification of the overall transmission coefficient of a DC electric drive is carried out with an error not exceeding 0.5% in real time under the conditions of the influence of disturbances of various physical nature.

Keywords: algorithm; unstable parameters; electric drive; inverse model; sensitivity model; additional motion; discrepancy.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Chilyaeva MR., Imamiev AR. Algorithm for parametric identification of the DC electric drive using the inverse model. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):160-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-160-174.

Введение

Процесс эксплуатации систем управления электроприводов сопровождается, как правило, влиянием дестабилизирующих факторов, под действием которых изменяются параметры системы и, в свою очередь, показатели качества процесса управления [1, 2, 3, 4]. В этой связи в современных перспективных СУЭП актуальным является применение автоматических систем идентификации, позволяющих вычислять оценки нестабильных параметров на этапе функционирования в режиме реального времени [5, 6, 7]. Способность системы изменять свои свойства при изменении совокупности параметров определяют её параметрическую чувствительность [8, 9].

Условие нормального функционирования СУЭП можно сформулировать следующим образом: множество значений фазовых координат \mathbf{x} , зависящих от вектора параметров СУЭП χ и вектора внешних воздействий \mathbf{f} , которые реально могут иметь место в процессе функционирования СУЭП должно быть строго включено в множество значений \mathbf{x} , при которых состояние СУЭП удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для выполнения данного условия необходимо предъявить к системе требование нулевой параметрической чувствительности или параметрической инвариантности $|\mathbf{x}_{\chi, \mathbf{f}}| = 0$, что практически неосуществимо [10, 11]. Поэтому требование параметрической инвариантности выражается в форме ϵ -чувствительности $|\mathbf{x}_{\chi, \mathbf{f}}| \leq \epsilon$, которое означает, что принятый показатель качества функционирования СУЭП J находится в заданных пределах $J_{\min} \leq J \leq J_{\max}$. Одним из методов обеспечения ограничений на показатель качества является выбор номинальных значений компонент вектора параметров СУЭП χ с учётом технологических отклонений в процессе серийного производства [12]. В настоящей работе определение экстремального значения показателя качества J осуществляется аналитическим путем в сочетании с градиентным способом идентификации.

Материалы и Методы

Показатели качества функционирования СУЭП могут быть различными. В инженерной практике широко применяются показатели, основанные на невязке [13]

$$\varepsilon(t) = y_o(t) - y_m(t), \quad (1)$$

формируемой как разность между действительным $y_o(t)$ и эталонным $y_m(t)$ значениями выходной координаты СУЭП. Относительная простота реализации алгоритма идентификации параметров СУЭП обеспечивается при показателе качества функционирования [14, 15]

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

или в векторно-матричной форме

$$J = (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_m)^T (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_m). \quad (3)$$

Рассмотрим математическую постановку задачи идентификации параметра χ_i на основе выражения (3). Пусть собственное движение электропривода описывается выражением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \chi_i, t). \quad (4)$$

Тогда дополнительное движение от вариаций вектора параметров СУЭП запишется с помощью соотношения

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{F}(\Delta \chi). \quad (5)$$

Для получения оценки вектора $\hat{\chi}$ решается обратная задача, которой соответствует формальное отношение

$$\Delta \chi = \mathbf{F}^{-1}(\Delta \mathbf{x}). \quad (6)$$

Показатель качества (3) формируется следующим образом. Текущее значение вектора состояния СУЭП

$$\mathbf{x}_o(\chi) = \mathbf{x}_m + \mathbf{x}_\chi \Delta \chi, \quad (7)$$

где \mathbf{x}_m – требуемое значение вектора состояния модели СУЭП.

С учётом (7) показатель качества (3) для вектора промежуточных фазовых координат электропривода принимает вид

$$J = (\Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_\chi \Delta \chi)^T (\Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_\chi \Delta \chi), \quad (8)$$

где $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_o - \mathbf{x}_m$.

Показатель качества (8) характеризует степень близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения [16, 17].

Определим оценку вектора $\hat{\chi}$, исходя из условия минимума критерия J . Преобразуем выражение показателя качества (8)

$$J = \Delta \mathbf{x}^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{x}_\chi \Delta \chi + \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi \Delta \chi$$

и продифференцируем полученное выражение по вектору $\Delta \chi$:

$$\frac{\partial J}{\partial (\Delta \chi)} = -\mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{x}_\chi + 2 \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi. \quad (9)$$

Произведем в (9) матричные преобразования и приравняем данное выражение к нулю:

$$\Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi = \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x}. \quad (10)$$

Введём обозначения

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi \text{ и } \mathbf{P}_2 = \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x}. \quad (11)$$

С учётом введённых обозначений, из выражения (10) следует, что

$$\mathbf{P}_1 \Delta \chi = \mathbf{P}_2, \quad (12)$$

откуда вариация вектора параметров χ определяется по формуле

$$\Delta \chi = \mathbf{P}_1^{-1} \mathbf{P}_2. \quad (13)$$

При выполнении условия (13) оценка вектора параметров СУЭП находится из выражения

$$\hat{\chi} = \chi_m + \Delta \chi. \quad (14)$$

Матрицы \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 зависят от матрицы чувствительности \mathbf{x}_χ . Поэтому для реализации выражения (13) в алгоритме идентификации параметров СУЭП необходимо предусмотреть вычислитель функций чувствительности [18, 19].

Объектом настоящего исследования является электропривод постоянного тока, получающий питание от управляемого выпрямителя и охваченный отрицательной обратной

связью по скорости. В качестве идентифицируемого параметра принят общий коэффициент передачи электропривода K .

Закон изменения идентифицируемого параметра

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J, \quad (15)$$

где $\nabla_k = \frac{\partial}{\partial K}$ – символ градиента; λ_k – коэффициент, характеризующий скорость идентификации параметра.

С учетом принятого показателя качества функционирования СУЭП (2) вычислим градиент

$$\nabla_k J = \frac{\partial [\varepsilon(t)]^2}{\partial K} = \frac{\partial [y_o(t) - y_m]^2}{\partial K} = 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K}. \quad (16)$$

Передаточную функцию электропривода в разомкнутой структуре можно представить дробно-рациональным выражением в операторной форме

$$W(s) = \frac{K \sum_{k=0}^m a_k s^k}{\sum_{k=0}^n b_k s^k} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0)}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (17)$$

где K – общий коэффициент передачи электропривода (добротность по скорости).

Передаточная функция замкнутой системы относительно сигнала ошибки

$$\Phi_{\Delta}(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1+W(s)} = \frac{B(s)}{B(s)+KA(s)}. \quad (18)$$

Принимая за основу выражение (18), запишем передаточную функцию инверсной модели

$$\Phi_{\Delta}^{im}(s) = \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B(s)+KA(s)}{B(s)} = 1 + \frac{KA(s)}{B(s)}. \quad (19)$$

Дифференцируя (19) по общему коэффициенту передачи системы K , получим соответствующую функцию чувствительности передаточной функции инверсной модели

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{A(s)}{B(s)}, \quad (20)$$

которая не зависит от настраиваемого параметра, то есть функция чувствительности инвариантна к изменению K .

По выражениям (15) и (16) определим алгоритм беспоисковой градиентной идентификации

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J = -\lambda_k 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K(t)}. \quad (21)$$

Переходя к преобразованию Лапласа, получим

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial U_{im}(s)}{\partial K} \right] = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} \Delta U(s) \right] \quad (22)$$

и тогда, с учётом формулы (20), добротность по скорости найдём из выражения

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{A(s)}{B(s)} \Delta U(s) \right], \quad (23)$$

где $U_{in}(s)$ – входное задающее воздействие; $U_{im}(s)$ – выходной сигнал инверсной модели; $\Delta U(s)$ – сигнал рассогласования.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае роль эталонной модели выполняет инверсная модель, коэффициенты полиномов которой зависят от номинальных значений параметров электропривода за исключением добротности по скорости K , а невязка, соответственно, вычисляется по формуле

$$\varepsilon(t) = u_{in}(t) - u_{im}(t). \quad (24)$$

На основании полученных выражений структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода примет вид, показанный на рисунке 1.

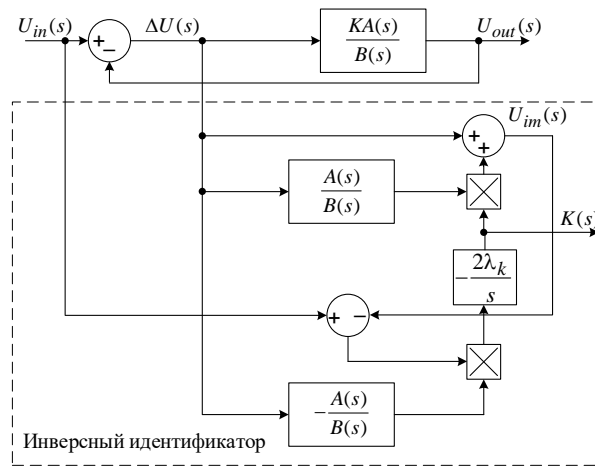


Рис. 1. Структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода

Fig. 1. Diagram of dynamic model inverse common identifier transmission coefficient

Результаты и обсуждение

В качестве электромеханического преобразователя в исследуемом электроприводе применен серводвигатель постоянного тока типа PIVT-6-25/3A с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 0,1 В·мин/об. Технические характеристики машины сведены в таблице 1 [20].

Таблица 1

Технические характеристики двигателя PIVT-6-25/3A.

Номинальное напряжение U_a , В	Коэффициент передачи по моменту K_m , Н·м/А	Электромагнитная постоянная времени T_a , с	Электромеханическая постоянная времени T_m , с	Частота вращения при максимальном моменте n , об/мин	Максимальный момент M_{max} , Н·м
30	0,072	0,002	0,025	3000	0,225

Передаточная функция двигателя постоянного тока

$$W_m(s) = \frac{1/c}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1}, \quad (25)$$

где $c = K_m = 0,072$ В·с/рад – коэффициент противо-ЭДС.

Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа ВСА-5К с передаточной функцией

$$W_r(s) = \frac{K_r}{T_r s + 1}, \quad (26)$$

где $K_r = 15$ – коэффициент усиления выпрямителя; $T_r = 0,005$ с – постоянная времени выпрямителя [20].

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

$$W_\omega(s) = \frac{K_\omega}{T_f s + 1}, \quad (27)$$

где $K_\omega = 0,0104$ В·с/рад – коэффициент передачи тахогенератора, численно равный крутизне выходного напряжения [20].

Передаточная функция замкнутого электропривода относительно сигнала рассогласования

$$\begin{aligned} \Phi_\Delta(s) &= \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1 + W_r(s)W_{em}(s)W_\omega(s)} = \\ &= \frac{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1) + K_r K_{em} K_\omega}, \end{aligned} \quad (28)$$

где $K_{em} = 1/c = 13,89$ рад/В·с – коэффициент передачи двигателя.

Запишем добротность по скорости в виде произведения коэффициентов передачи всех элементов электропривода

$$K = K_r K_{em} K_{\omega} \quad (29)$$

и определим передаточную функцию инверсной модели:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta}^{im}(s) &= \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1) + K}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)} = \\ &= 1 + \frac{K}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)}. \end{aligned} \quad (30)$$

Продифференцируем выражение (30) по общему коэффициенту передачи электропривода

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{1}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)} \quad (31)$$

и убедимся, что результат дифференцирования не зависит от идентифицируемого параметра, т.е. функция чувствительности инвариантна к изменению K (см. выражение (20)).

Структурная схема динамической модели идентификации общего коэффициента передачи исследуемого электропривода постоянного тока показана на рисунке 2.

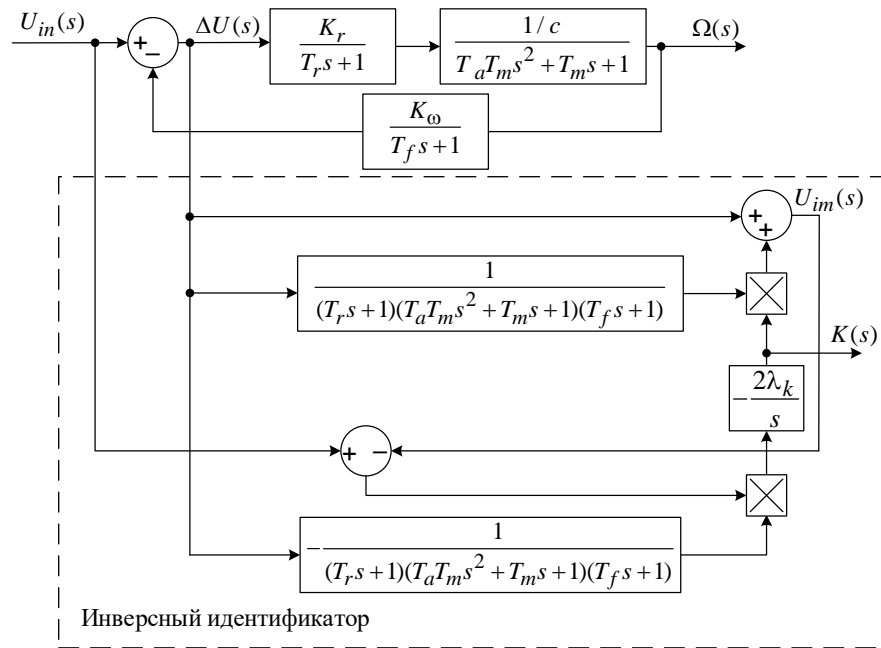


Рис. 2. Структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

Fig. 2. Structural diagram of dynamic model of inverse identifier of total DC transmission ratio

На основании полученных выше выражений и схемы, показанной на рисунке 2, реализуем *Simulink*-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением программной среды *MatLab*. Соответствующая схема представлена на рисунке 3.

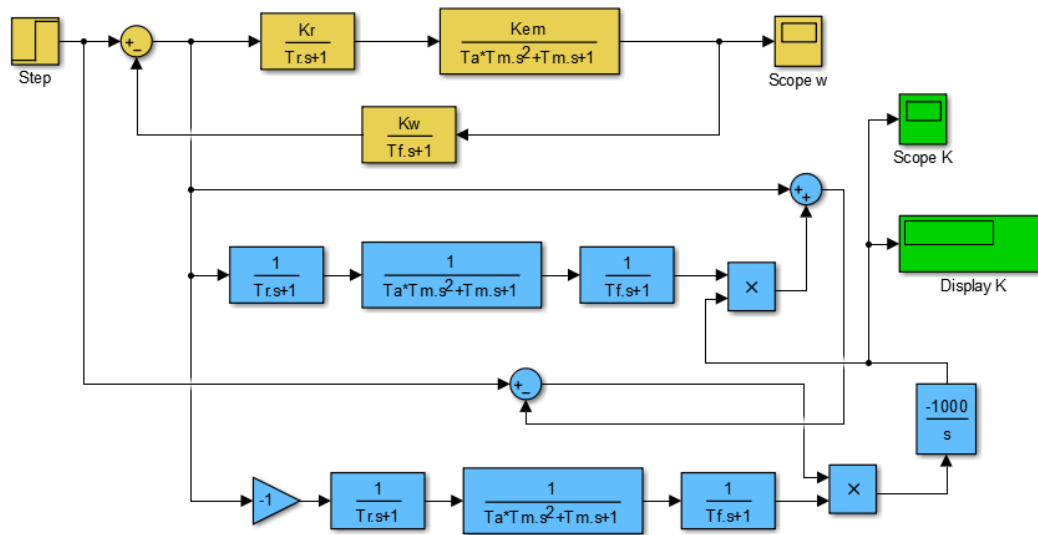


Рис. 3. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

Fig. 3. Simulink model inverse identifier of total DC transmission ratio

На рисунке 3 блоки, выделенные жёлтым цветом, соответствуют исследуемой системе, блоки, выделенные голубым цветом, реализуют алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода согласно выражению (23), а блоки Scope K и Display K регистрируют и отображают идентифицируемый параметр.

В командное окно *MatLab* вводим значения параметров электропривода, соответствующие выражениям (25) – (27), характеризующие номинальный режим работы системы. Коэффициент, характеризующий скорость идентификации, принимаем $\lambda_k = 500$. Результаты моделирования при номинальных значениях параметров представлены на рисунке 4.

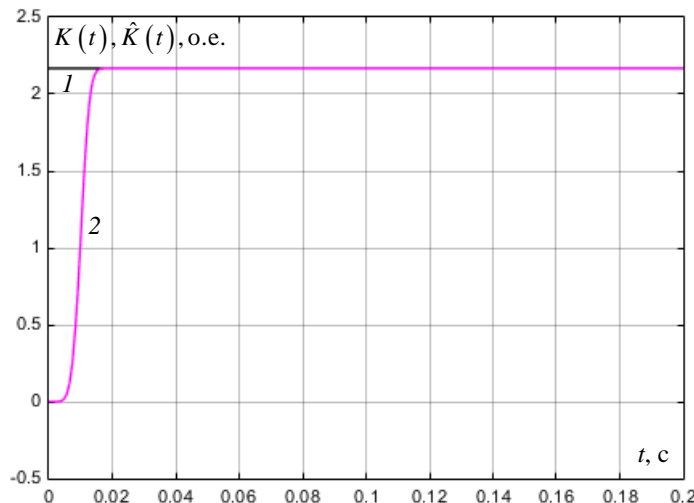


Рис. 4. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K: 1 – номинальное значение K(t); 2 – оценка $\hat{K}(t)$

Fig. 4. Simulation of the process of identification of the total transmission coefficient of electric drive K: 1 - nominal value K(t); 2 - estimation

В соответствии с выражением (29) номинальное значение общего коэффициента передачи электропривода $K_{nom} = K_r K_{em} K_{\omega} = 15 \cdot 13,89 \cdot 0,0104 \approx 2,167$, при этом полученная оценка практически не отличается от номинального значения.

Дальнейшие исследования проведем при детерминированном изменении коэффициента K, а также при вариациях постоянных времени элементов электропривода. Результаты моделирования показаны на рисунках 5, 6.

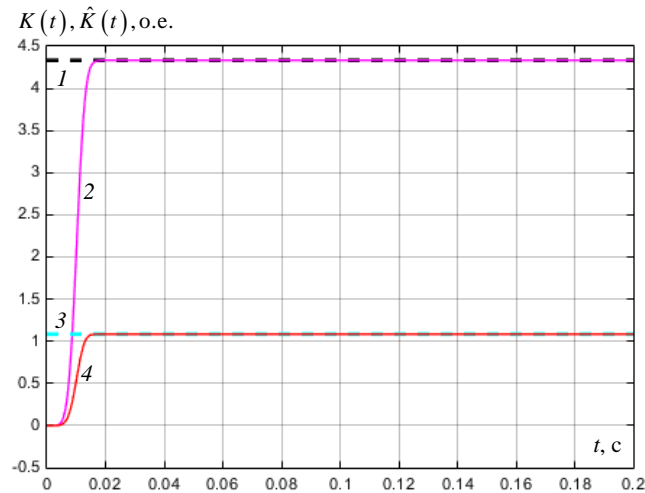


Рис. 5. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – значение $K = 2K_{nom}$; 2 – оценка $\hat{K}(t) = 2K_{nom}$; 3 – значение $K = 0,5K_{nom}$; 4 – оценка $\hat{K}(t) = 0,5K_{nom}$

Fig. 5. Simulation of the process of identification of the overall transmission coefficient of the electric drive K : 1 - the value ; 2 - the estimate ; 3 - the value ; 4 - the estimate

Из анализа графиков, приведенных на рис. 5 следует, что вычисление оценок общего коэффициента передачи электропривода при заданных изменениях K осуществляется с минимальным значением погрешности, т.е. $\hat{K} \approx K$. При этом время, затрачиваемое на идентификацию, не превышает 0,02 с.

Произведем подобное исследование при изменении электромеханической постоянной времени машины постоянного тока T_m и постоянной времени фильтра T_f и $K = K_{nom}$ (см. рис. 6).

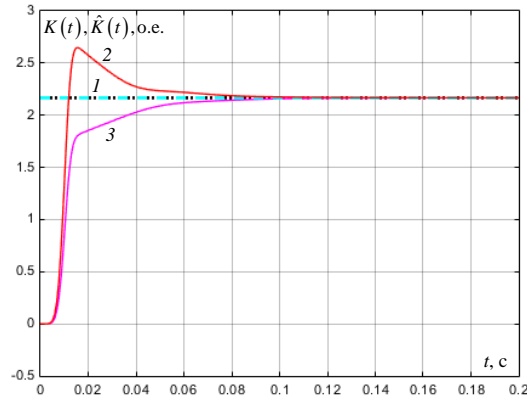


Рис. 6. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при уменьшении T_m и T_f на 20%; 3 – оценка $\hat{K}(t)$ при увеличении T_m и T_f на 20%

Fig. 6. Simulation of the process of identification of the total transmission ratio of the electric drive K : 1 - the nominal value $K(t)$; 2 - the decrease and 20% estimate; 3 - the increase and 20%

Вариации указанных постоянных времени в заданных пределах приводят к изменениям переходных процессов вычисления оценок общего коэффициента передачи электропривода, которые характеризуются снижением быстродействия и временем установления около 0,1 с как для случая с наличием перерегулирования (график 2), так и при монотонном процессе (график 3). При этом установившиеся значения вычисляемых оценок для обоих случаев соответствует номинальному значению коэффициента передачи.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемый в работе алгоритм идентификации является инвариантным к параметрическим возмущениям, обеспечивая высокую точность процесса вычисления оценок общего коэффициента передачи исследуемого электропривода при сравнительно малых временных затратах.

Следует отметить, что функционирование электропривода в реальных условиях сопровождается внешними координатными возмущениями, к которым можно отнести момент сопротивления нагрузки M_c , а также шумы и наводки в цепях управления f . Структурная схема динамической модели исследуемого электропривода с учётом внешних возмущений представлена на рис. 7 [21, 22].

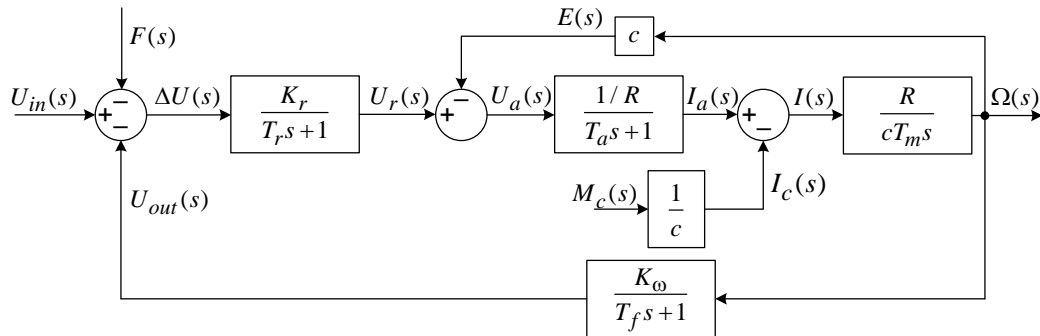


Рис. 7. Структурная схема динамической модели электропривода постоянного тока с учетом возмущающих воздействий Fig. 7. Schematic diagram of dynamic DC electric drive with regard to perturbations

На основании показанной, на рисунке 7 схемы сформируем *Simulink*-модель электропривода. Неизвестное сопротивление якорной цепи R было измерено с помощью измерительного моста постоянного тока типа ММВ с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$ [20Чичков]. Результаты измерения составили $R = 5,15$ Ом. Полученная *Simulink*-модель представлена на рис. 8. Устанавливаем значение момента нагрузки $M_c = 0,8 M_{\max} = 0,8 \cdot 0,225 = 0,18$ Н·м, а сигнал шума зададим с помощью блока Signal Generator, выбирая во вкладке Wave form наименование сигнала Random и устанавливая амплитуду сигнала 0,3 В, частоту – 1 кГц.

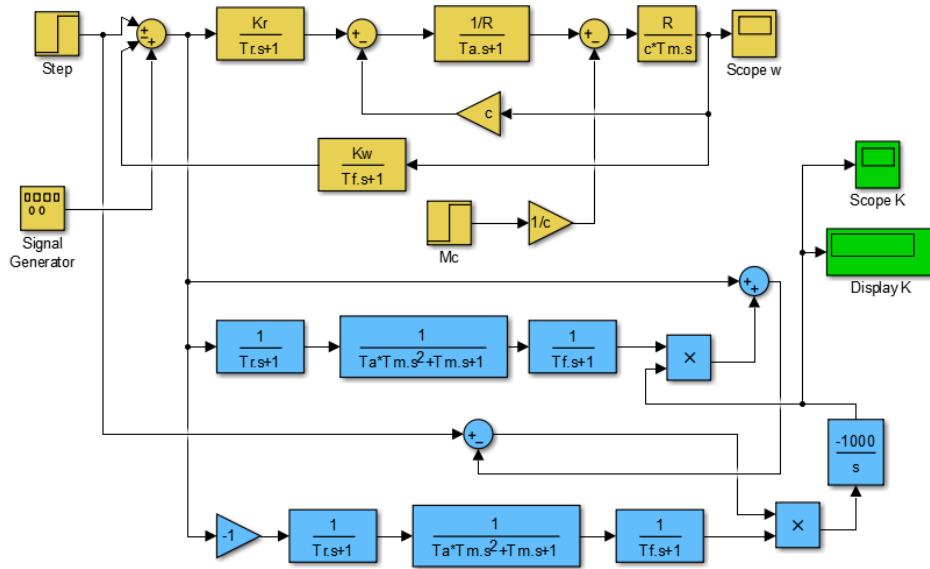


Рис. 8. *Simulink*-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с учётом внешних возмущений Fig. 8. *Simulink* model of inverse identifier of total DC transmission ratio taking into account external disturbances

Моделирование производим при набросе нагрузки через 0,1 с после пуска. Результаты вычисления оценки K представлены на рисунке 9.

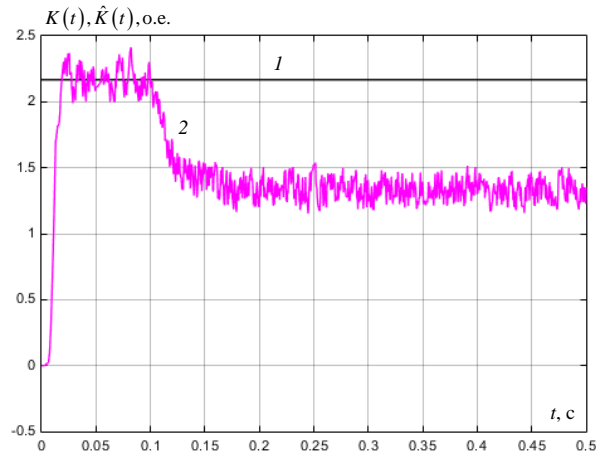


Рис. 9. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_C и f

Fig. 9. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K : 1 – nominal value $K(t)$; 2 – evaluation under the influence of external disturbances and f

Показанные на рисунке 9 зависимости иллюстрируют существенное влияние внешних возмущений на результат идентификации. Полученное в процессе вычисления значение $\hat{K}(t)$ сопровождается флуктуациями с амплитудой и частотой наведенной помехи f , что затрудняет определение установившегося значения K .

Влияние момента сопротивления M_C проявляется в значительном отклонении установившегося значения оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ от заданной величины K , вызванном перепадом скорости вращения электропривода под действием нагрузки. Данное влияние приводит к изменению сигнала рассогласования $\Delta U(s)$ и, в свою очередь, невязки $E(s)$ (24), в результате чего возникает погрешность результата идентификации общего коэффициента передачи K согласно формулы (23). Из рисунка 9 следует, что относительная погрешность вычисления $K = K_{nom} = 2,167$ при полученном значении оценки $\hat{K}_{уст}(t) = 1,352$ составляет около 37%, что говорит о неудовлетворительном решении. Максимальная погрешность идентификации обусловлена именно моментной составляющей ошибки, поскольку возмущающее воздействие f несущественно влияет на $\hat{K}_{уст}(t)$, а к ошибке по управлению рассматриваемая система инвариантна.

В целях снижения чувствительности алгоритма параметрической идентификации с применением инверсной модели к статическому моменту сопротивления нагрузки необходимо разработать способ определения M_C с последующим формированием корректирующего воздействия, компенсирующего влияние M_C и сводящего ошибку идентификации $\hat{K}(t)$ к минимуму. Запишем уравнение механического равновесия электропривода, выразив моменты через токи (см. схему на рис. 7):

$$i_a(t) - i_c(t) = i(t), \quad (32)$$

где $i_a(t)$ – ток якоря; $i_c(t)$ – ток, соответствующий моменту сопротивления;

$i(t) = \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}$ – ток, соответствующий динамическому моменту.

Из выражения (32) найдём

$$i_c(t) = i_a(t) - \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (33)$$

т.е. на основании информации о токе $i_a(t)$ с использованием датчика тока и об ускорении $\frac{d\omega(t)}{dt}$ с использованием датчика скорости получим искомый сигнал, пропорциональный моменту сопротивления M_C .

Корректирующее воздействие, компенсирующее влияние M_C , формируется в виде сигнала напряжения

$$u_c(t) = k_c i_c(t), \quad (34)$$

где $k_c = 0,744$ Ом – коэффициент пропорциональности, подобранный путем компьютерного эксперимента. Невязка (24) становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_c)$. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_c представлена на рисунке 10.

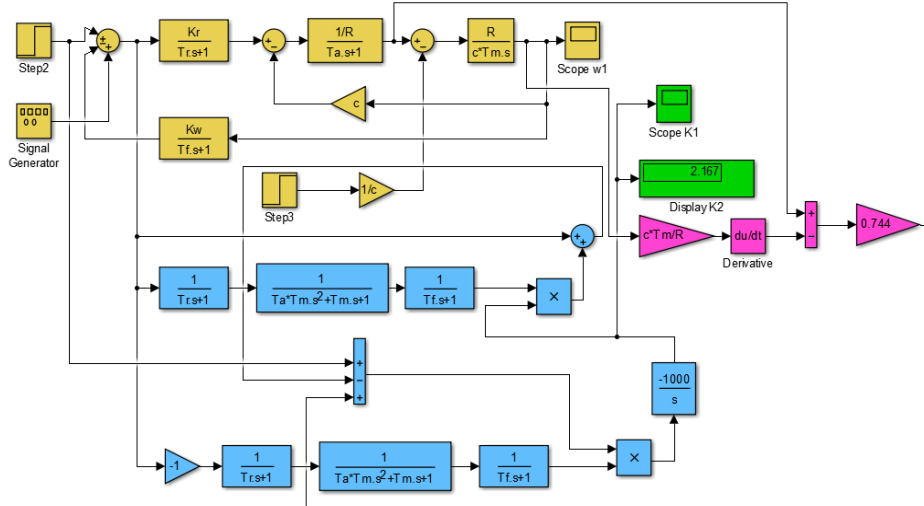


Рис. 10. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_c

Fig. 10. Simulink model of inverse identifier of total DC transmission ratio with compensation

На рисунке 10 блоки, выделенные сиреневым цветом, иллюстрируют процедуру формирования компенсирующего воздействия $u_c(t)$.

Компенсацию возмущающего воздействия f осуществим с помощью фильтра нижних частот первого порядка с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени, равной 0,012 с. Фильтрация осуществляется по отношению к сигналу рассогласования $\Delta U(s)$. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода показаны на рисунке 11.

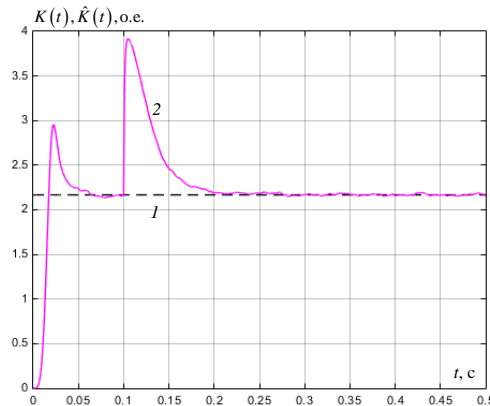


Рис. 11. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K с компенсацией возмущений M_c и f : 1 – номинальное значение

Fig.11. Simulation of the process of identification of the total electric drive transmission coefficient K with perturbation compensation and f : 1 - nominal

$K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_c и f

График 2 на рисунке 11 характеризуют динамические выбросы вначале процесса идентификации с перерегулированием 36% на 0,0225 с, а также при набросе нагрузки через 0,1 с от начала моделирования с амплитудой \hat{K}_{max} около 4 о.е. Процесс идентификации устанавливается примерно через 0,2 с и установившееся значение общего коэффициента

передачи электропривода $\hat{K}_{уст} \approx K_{nom} = 2,167$. Флуктуации от возмущающего воздействия f благодаря фильтрации становятся незначительными и вносят пренебрежимо малую погрешность около 0,5 %. В этой связи можно считать, что предложенные выше решения позволили получить инвариантный как к параметрическим, так и к координатным возмущениям алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока.

Выводы

В настоящей статье проведены разработка и исследование алгоритма идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением инверсной модели, не зависящей от идентифицируемого параметра. Алгоритм реализован с применением градиентного метода вычисления интеграла от квадрата невязки с использованием в качестве эталонной модели объекта исследования инверсной модели, а также модели чувствительности по общему коэффициенту передачи электропривода K . Имитационное моделирование в программной среде *MatLab* показало, что разработанный алгоритм инвариантен к параметрическим возмущениям и изменение параметров исследуемого объекта, выраженных через постоянные времени элементов электропривода, не оказывает влияния на результат идентификации K , тогда как вариации коэффициентов передачи элементов электропривода, являющихся сомножителями K , идентифицируются в виде оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ с высокой точностью. При исследовании влияния координатных возмущений была выявлена высокая чувствительность алгоритма идентификации к данному виду возмущающих воздействий, причем максимальная погрешность вычисления оценки $\hat{K}(t)$ обусловлена моментной составляющей ошибки, которая алгебраически суммируется с сигналом рассогласования $\Delta u(t)$ и, соответственно, приводит к неконтролируемому изменению невязки $\varepsilon(t)$ и, в итоге, вычисляемой оценки $\hat{K}_{уст}(t)$. Для минимизации негативного влияния момента сопротивления M_c предложен способ формирования компенсирующего воздействия $u_c(t)$, полученного с применением датчиков тока якоря $i_a(t)$ и скорости вращения двигателя $\omega(t)$. В результате невязка становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_c)$ и сигнальная компенсация момента сопротивления обеспечивает определение установившегося значения общего коэффициента передачи электропривода $\hat{K}_{уст}(t)$ с погрешностью, не превышающей 0,5%. Влияние шумов и наводок не вносит существенной ошибки в результат идентификации и при необходимости может быть снижено путем фильтрации сигнала рассогласования $\Delta u(t)$ за счет применения фильтра нижних частот. Таким образом, разработанный алгоритм идентификации позволяет с высокой точностью за малые промежутки времени произвести оценку общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока в условиях текущей эксплуатации. Алгоритм не требует сложного измерительного оборудования и больших вычислительных мощностей и реализуется на основе стандартно применяемых в электроприводе датчиков. Процедура идентификации может быть автоматизирована путем получения соответствующего цифрового алгоритма и его реализации в виде рабочей программы микропроцессора. Результаты идентификации могут быть использованы как для анализа и контроля функционирования электропривода, так и для построения адаптивных параметрически инвариантных систем управления электроприводами с применением беспоисковых градиентных алгоритмов.

Литература

1. J. Calliess S.J. Roberts, C.E. Rasmussen, J. Maciejowski. Lazily Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V. and Mwaku W.M. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*, vol. 124. Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes. In *American Control Conference (ACC)*, 2013.

4. 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. 2018. №5. Vol.327.
5. M.P. Deisenroth, D. Fox, and C. E. Rasmussen. Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.
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.
7. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. -2014. - Vol. 24, No. 17. - P. 2774-2784.
8. Ostroverkhov M., Pyzhov V., Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017.
9. Кучер Е.С., Комазенко М.А., Ромащенко А.И. Синтез систем векторного управления малочувствительных к изменениям параметров асинхронного электропривода // Доклады академии наук высшей школы российской федерации. 2017. № 2(35). С.61-72.
10. Kovela I., Ivaniuk O., Vlach-Vyhrnovska G., Stakhiv R. Параметрический синтез комбинированных автоматических систем регулирования с цифровыми пид-регуляторами // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2017. № 2(90). С.37-34.
11. Томчина О.П., Кондратова М.Е., Горохов М.М., Журов К.В. Адаптивный регулятор с нелинейной эталонной моделью – в сборнике: Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации: Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2017. – С. 206-208.
12. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 21–26.
13. Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. Автомат. и телемех. 2017. №4. 92–105.
14. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers // Journal of Computer and System Sciences International. 2011. V. 50. 5. P. 698–719.
15. Сольнищев Р.И., Каримов А.И., Каримов Т.И. Синтез цифровых регуляторов гироскопических командных приборов // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 1 (96).
16. Саушев А.В., Бова Е.В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т.11. №2. С. 380-395.
17. Pshikhov V., Medvedev M., Kupovikh G., Shibanov V. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarasc), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018, 54–59.
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. 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;21(6):101-110.
20. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(5):142-154.
21. Сташинов Ю.П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 // Электротехника. 2016. № 1. С. 2–7.
22. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – ст. преп. кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Чилыева Маргарита Романовна – студент, Казанского государственного энергетического университета.

Имамиев Айрат Рустемович – инженер группы сопровождения проектов КРиС ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов».

References

1. J. Calliess, S.J. Roberts C.E. Rasmussen, J. Maciejowski. Lazily Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV. and Mwaku W.M. *Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models*. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019). V. 124. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. *Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes*. In American Control Conference (ACC), 2013.
4. Saushev AV. *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. 2018;5:327.
5. Deisenroth MP, Fox D, and Rasmussen C.E. *Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.
6. Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):86-97.
7. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.
8. Ostroverkhov M, Pyzhov V, Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017.
9. Kucher ES, Komazenko MA, Romashchenko AI. *Synthesis of systems of vector control of induction motor drive parameters low-sensitive to changes*. Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation. 2017;2(35):61-72.
10. Kovela I, Ivaniuk O, Vlach-Vyhrnovska G, Stakhiv R. Parametric synthesis of combined automatic regulating systems with digital pid-controllers. *Eastern european journal of advanced technologies*. 2017;2(90):37-34.
11. Tomchina OP, Kondratova ME, Gorokhov MM, et al. *An adaptive controller with a nonlinear reference model – in the collection: Scientific achievements of modern science: novation, history, reality, prospects and implementation practice: Collection of scientific articles based on the results of an international scientific and practical conference*. – St. Petersburg: Publishing House «KultInform-Press», 2017. P. 206–208.
12. Anisimov A.A. Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems. *Vestnik IGEU*. 2016;2:21–26.
13. Rutkovskii, VYu. Glumov VM. Dynamics peculiarities of an adaptive control system with nonlinear reference model. *Autom. Remote Control*. 2017;8(4):654–665.
14. Anisimov AA, Kotov DG, Tararykin SV. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2011;50(5):698 – 719.
15. Solnitsev RI, Karimov A.I., Karimov T.I. Synthesis of digital regulators of gyroscopic command appliance. *Gyroscopy and navigation*. 2017;25(1):96.
16. Saushev AV, Bova EV. The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov*. 2019;2:380-395.

17. Pshikhov V, Medvedev M, Kupovikh G, et al. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarsec), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018, 54–59.

18. Afanasiev AY, Makarov VG, Zagirova VN. Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions. *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*. 2020;6:128-131.

19. Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):101-110.

20. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):142-154.

21. Stashinov YP. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1. *Russian Electrical Engineering*. 2016;1:2-7.

22. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov .E. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1(1):88.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – senior lecturer, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Pogoditsky – cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Margarita R. Chilyaeva – student, Department «Automation of technological processes and production», Kazan State Power Engineering University.

Ayrat R. Imamiev – engineer of the projects support group for KRiS branch JSC «Grid Company»– «Directorate of facilities under construction».

Получено 20.03.2022г.

Отредактировано 25.03.2022г.

Принято 30.03.2022г.