

УДК 629.7

А. С. АБУФАНАС, А. А. ЛОБАТЫЙ, А. Г. ШВЕДКО

## ПОИСКОВЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

*Белорусский национальный технический университет*

*Рассматривается задача параметрической идентификации математической модели технического устройства, в качестве которого рассматривается электропривод системы мониторинга, установленной на беспилотном летательном аппарате. Идентификация параметров элементов сложной технической системы является актуальной научной задачей, так как при разработке новой технической системы для ее синтеза и исследования необходимо иметь математические модели элементов системы.*

*Предлагается решать задачу путем применения поискового градиентного алгоритма идентификации при заданной целевой функции невязки в виде квадрата разности выходного сигнала идентифицируемого элемента системы и его модели. При решении задачи учитывается случайный характер процессов, происходящих в системе и на выходе измерителя выходного сигнала. Алгоритм идентификации разработан на основе представления модели параметров объекта в виде обыкновенного дифференциального векторно-матричного уравнения, в правой части которого имеется модель задающего воздействия в виде заданной детерминированной функции времени. Представлена общая структурная схема поисковой системы параметрической идентификации с градиентным алгоритмом.*

*В качестве примера для оценки работоспособности предлагаемого алгоритма рассматривается простейшая модель электропривода, заданная передаточной функцией в виде инерционного звена. Представлены качественные иллюстрации работоспособности предлагаемого алгоритма и количественные характеристики изменения сигналов и параметров идентифицируемого объекта.*

**Ключевые слова:** *идентификация, модель, функция невязки, градиент, поисковый сигнал, настройка параметров.*

### Введение

В системах мониторинга объектов, находящихся на земной поверхности, всё более широкое распространение получили беспилотные летательные аппараты (БЛА), предназначенные для решения различных задач, как в интересах народного хозяйства, так и для других организаций и ведомств. Задачи, стоящие перед системой мониторинга земной поверхности, подробно описаны в [1]. Главной составляющей системы мониторинга является установленная на борту БЛА специальная аппаратура. Для обзора земной поверхности в нужном диапазоне волн устанавливается видеокамера или другая система (тепловизионная, радиотехническая), выходной информацией которой является изображение объектов, находящихся на земле. Для управления угловым по-

ложением видеокамеры (или другой аппаратуры) применяется электропривод, изменяющий угловое положение видеокамеры в двух плоскостях относительно корпуса БЛА.

Электропривод системы мониторинга как системы слежения относится к классу позиционных электроприводов [2]. Такой электропривод перемещает рабочий орган из некоторой исходной позиции в некоторую конечную позицию с требуемой точностью остановки в ней. Следует отметить, что электродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами имеют существенный недостаток – наличие щеточно-коллекторного узла, не обеспечивающего достаточную надежность привода системы мониторинга в сложных условиях эксплуатации БЛА (резкие перепады температуры, тряска, вибрации и т. п.). Решением является

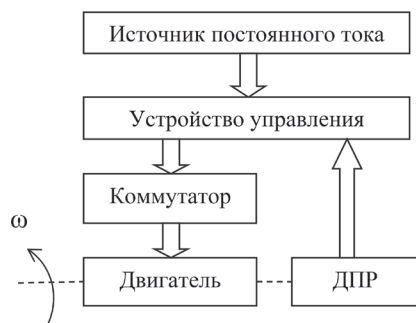


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

применение вентильных двигателей, у которых механический коммутатор заменен электронным (полупроводниковым). Простейшая функциональная схема вентильного двигателя представлена на рис. 1, где обозначено: ДПР – датчик положения ротора.

Система дифференциальных уравнений, описывающих такой электропривод имеет вид [3]

$$\dot{\varphi} = \omega, \quad \varphi(t_0) = \varphi_0, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{T_d} \omega + \frac{K_d}{T_d} U_{cp}, \quad \omega(t_0) = \omega_0. \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол поворота ротора,  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $U_{cp}$  – среднее управляющее напряжение,  $K_d$  и  $T_d$  – соответственно, обобщенный коэффициент усиления и постоянная времени, зависящие от конструктивных особенностей электродвигателя. В соответствии с (1) – (2) передаточная функция вентильного электродвигателя по управляющему воздействию имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{p + a}, \quad (3)$$

где  $K = K_d/T_d$ ,  $a = 1/T_d$ . Принцип работы таких электроприводов подробно рассмотрен в [2, 3, 4].

### Решение задачи идентификации

При создании сложных технических систем разработчики, как правило, стремятся максимально использовать типовые конструктивные элементы, выпускаемые промышленностью серийно, имеющие удовлетворительные технические характеристики и невысокую стоимость. К таким элементам относятся в частности электродвигатели систем мониторинга земной поверхности, установленные на беспилотных летательных аппаратах. изгото-

витель и поставщик электродвигателей, как правило, не приводит математических моделей своей продукции. В то же время наличие адекватных математических моделей элементов сложной системы является необходимым условием для достижения необходимого результата в процессе разработки системы.

Рассмотрим алгоритм параметрической идентификации элемента системы управления для настройки параметров модели, на основе которой производится формирование коэффициентов. Так как практически любой электронный элемент системы и особенно измерители выходных сигналов в общем случае подвержены случайным воздействиям, то при неполной структурной адекватности модели и объекта, при сильном отличии в начальных значениях параметров объекта и модели возможно существование множества экстремумов целевой функции по настраиваемым параметрам. Следовательно, беспойсковые алгоритмы идентификации могут оказаться неработоспособными. В этих условиях целесообразно применять поисковый алгоритм идентификации элемента системы с активным поиском и испытаниями адаптивной модели по параметрическим каналам на основе измерений входных и выходных сигналов объекта идентификации. При этом учитываются границы работоспособности системы.

Задачей алгоритма поисковой настройки является изменение параметров идентифицируемого элемента системы таким образом, чтобы минимизировать заданную целевую функцию невязки  $q(E)$ . Рассмотрим подробнее непрерывный градиентный алгоритм идентификации с синхронным детектированием применительно к нашей постановке задачи [5, 6].

Пусть в общем случае электропривод и его модель в соответствии с рис. 1 описываются уравнениями состояния

$$\dot{Y} = F(Y, X, A, t) + \xi, \quad Z = h(Y, X, t) + \zeta, \quad (4)$$

$$\dot{Y}_M = F_M(Y_M, X, A_M, t), \quad Z_M = h_M(Y_M, X_M, t), \quad (5)$$

где  $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  – вектор параметров,  $X \in R^n$ ,  $Z \in R^l$ ,  $Z_M \in R^l$ ,  $Y \in R^m$ ,  $Y_M \in R^m$ ,  $A \in R^p$ ,  $A_M \in R^p$  – векторы состояний входа ( $X$ ), выхода и параметров объекта ( $Y, A$ ), измерителя ( $Z$ ), модели ( $Y_M, Z_M, A_M$ ) соответственно;  $\xi$  – вектор входных возмущений,  $\zeta$  – вектор помех измерений;  $R^n, R^m, R^l, R^p$  – евклидовы пространства.

Целью идентификации является минимизация целевой функции  $q(E)$  невязки  $E = Z - Z_M$ . Предполагается, что  $q(E)$  – выпуклая, положительно определенная функция и известны текущие значения переменных  $Y_M, Z_M, A_M$ , характеризующих состояние настраиваемой модели.

Для поиска оптимального значения параметров модели используем градиентный подход к оптимизации целевой функции  $q(E)$  [7]. Настройку параметров модели будем осуществлять в направлении антиградиента целевой функции, чтобы выполнялось

$$\dot{A}_M = -\Gamma \nabla_{A_M} q(E), \quad A_M(t_0) = A_0, \quad (6)$$

где  $\Gamma$  матрица коэффициентов усиления, размерности  $p \times p$ ;  $\nabla_{A_M} q(E) = \left[ \frac{\partial q(E)}{\partial A_M} \right]^T$  – градиент целевой функции по параметрам модели.

Для реализации градиентного метода необходимо определить частные производные, которые для сложной функции  $q(E)$  имеют следующий вид

$$\frac{\partial q(Z - Z_M)}{\partial A_M} = -\frac{\partial q(E)}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \frac{\partial Y_M}{\partial A_M}. \quad (7)$$

Основная трудность при нахождении правой части уравнения (7) состоит в вычислении частных производных  $\partial Y_M / \partial A_M$ . Для решения данной задачи представим уравнение модели в вариациях в виде

$$\partial \dot{Y}_M = \frac{\partial F_M}{\partial Y_M} \delta Y_M + \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M + \frac{\partial Y_M}{\partial X} \delta X, \quad (8)$$

где  $\delta A_M(t)$  – малая высокочастотная центрированная составляющая приращений параметров модели.

Считаем, что поисковый сигнал  $\delta A_M$  является быстро изменяющейся векторной функцией по сравнению с собственными движениями модели и движением, порожденным внешним воздействием  $X(t)$ . При этом процесс  $Y(t)$  считается квазистационарным так как он меняется существенно медленнее остальных динамических процессов, протекающих в системе. Так как вариациями  $\delta Y_M$  и  $\delta X$  можно пренебречь ввиду их малости по отношению к  $A_M$ , то будет справедливо приближенное равенство [8]

$$\partial \dot{Y}_M \approx \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M, \quad (9)$$

или в операторной форме

$$\delta Y_M \approx \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M, \quad (10)$$

где  $1/p$  – оператор интегрирования.

Из соотношения (10) при квазистационарном режиме получаем

$$\frac{\partial Y_M}{\partial A_M} \approx \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M}. \quad (11)$$

При достаточно высокой частоте поискового сигнала  $\delta A_M$  приближенное равенство (11) можно заменить строгим. С учетом этого уравнение (7) принимает вид

$$\frac{\partial q(E)}{\partial A_M} = -\frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \right). \quad (12)$$

Для вычисления  $\frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M}$  применим процедуру синхронного детектирования [8, 9]. Умножим выражение (10) справа на  $\delta A_M^T$  и усредним полученное уравнение на некотором скользящем интервале времени  $T_c$ .

$$\left\langle \delta Y_M (\delta A_M)^T \right\rangle = \left\langle \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M (\delta A_M)^T \right\rangle, \quad (13)$$

где  $\langle \dots \rangle$  операция усреднения, а левая часть выражения (13) вычисляется по формуле

$$\left\langle \delta Y_M (\delta A_M)^T \right\rangle = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t \delta Y_M(\tau) (\delta A_M(\tau))^T d\tau. \quad (14)$$

Учитывая, что в соответствии с принятым допущением на интервале  $T_c$  функцию  $F_M$  можно считать постоянной, получаем

$$\left\langle \delta Y_M (\delta A_M)^T \right\rangle = \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \left\langle \delta A_M (\delta A_M)^T \right\rangle. \quad (15)$$

Следовательно,

$$\frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} = \left\langle \delta Y_M (\delta A_M)^T \right\rangle \left\langle \left[ \delta A_M (\delta A_M)^T \right]^{-1} \right\rangle. \quad (16)$$

Так как поисковые сигналы выбираются из условия не вырожденности матрицы  $\left\langle \delta A_M (\delta A_M)^T \right\rangle$ , то алгоритм настройки параметров (6) с учётом (12), (15), (16) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{A}_M &= -\Gamma \nabla_{A_M} q(E) = \Gamma \left[ \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \right) \right]^T = \\ &= \Gamma \left\langle \left[ \delta A_M (\delta A_M)^T \right]^{-1} \right\rangle \left\langle \delta A_M (\delta Y_M)^T \right\rangle \left( \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \right)^T. \end{aligned} \quad (17)$$

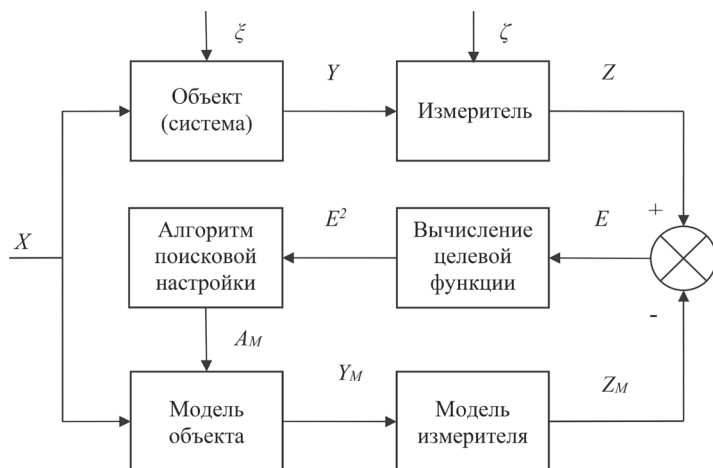
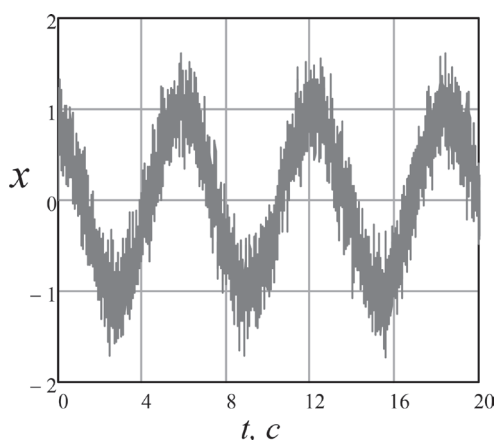
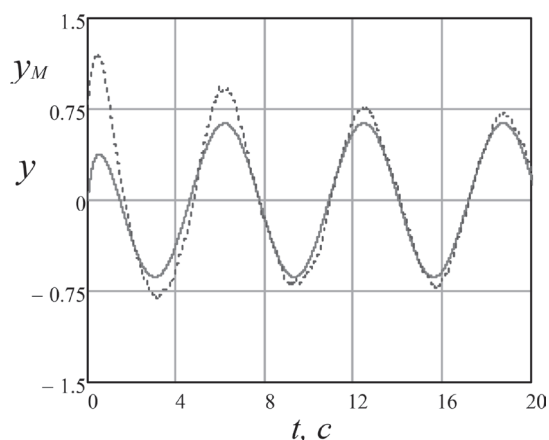


Рис. 2. Структурная схема поисковой системы идентификации с градиентным алгоритмом

Рис. 3. График зашумленного входного сигнала  $x$ Рис. 4. Графики изменения выходных сигналов системы  $y$  и модели  $y_M$ 

Структурная схема системы идентификации представлена на рис. 2.

В качестве примера рассмотрим объект управления, описываемый передаточной функцией вида (3), в которой где  $K$  – известный коэффициент усиления;  $a$  – неизвестный параметр.

Требуется провести идентификацию параметра  $a$  методом синхронного детектирования, считая, что на объект действует задающее воздействие вида  $y = \sin(t)$ ,  $K = 2$ , а выход измеряется с аддитивной помехой в виде центрированного случайного стационарного процесса с нормальным распределением.

Выберем настраиваемую модель в виде звена первого порядка

$$W_M(p) = \frac{K}{p + a_M}, \quad (18)$$

где  $a_M = a_M(t)$  – настраиваемый параметр.

Целью управления будем считать синтез алгоритма настройки параметра  $a_M$ , обеспечи-

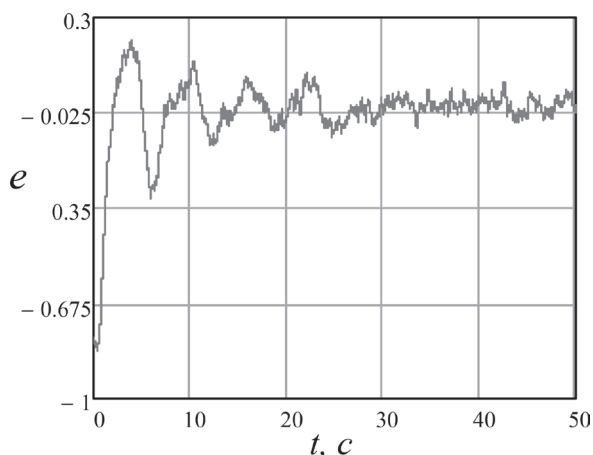
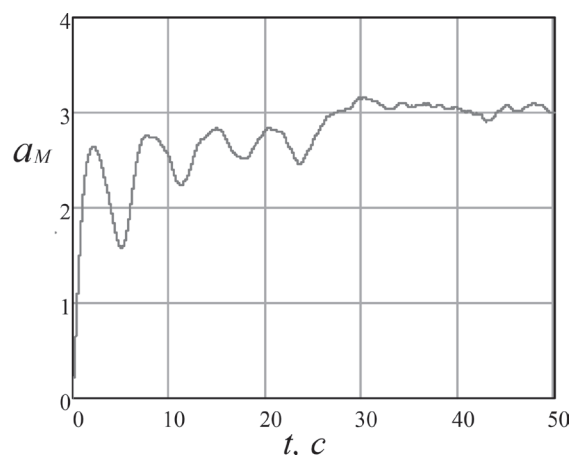
вающего минимизацию целевой функции  $q = e^2$ , где  $e = a - a_M$  – рассогласование между выходами объекта и настраиваемой модели.

Выберем в качестве поискового высокочастотный сигнал вида  $\delta a_M = 0,1 \sin(200t)$ . В соответствии с (17) алгоритм идентификации будет иметь вид

$$\dot{a}_M = \gamma \frac{\langle \delta a_M \delta y_M \rangle}{\langle \delta a_M^2 \rangle} e, \quad \gamma < 0. \quad (19)$$

Здесь учтено, что операция усреднения опущена ввиду наличия в алгоритме идентификации интегратора  $\frac{\partial q}{\partial E} = 2e$ ,  $\frac{\partial h_M}{\partial Y_M} = 1$ . Вариация  $\langle \delta a_M^2 \rangle$  для заданного поискового сигнала вычисляется заранее.

На рис. 3–6 приведены графики изменения во времени зашумленного гипотетического входного сигнала  $x(t)$  (рис. 3), выходных сигналов системы  $y$  и модели  $y_M$  (рис. 4), рассогласования  $e$  (рис. 5), настраиваемого параметра

Рис. 5. График изменения рассогласования  $e$ Рис. 6. График изменения настраиваемого параметра  $a_M$ 

тра  $a_M$  (рис. 6). Интегрирование выполнялось в среде Mathcad при заданном значении параметра  $a = 3$ , дисперсии помехи  $D_\xi = 0.01$ ,  $\gamma = -2.7$ .

В приведенном примере процесс идентификации параметра  $a_M$  составляет около тридцати секунд.

### Заключение

Результаты моделирования показывают, что обеспечивается точность идентификации, определяемая функцией невязки  $E$ , а также

сходимость алгоритма настройки модели с использованием непрерывного градиентного метода идентификации с синхронным детектированием в течение времени, обусловленного инерционностью системы. Заметим, что реализация алгоритма идентификации может быть упрощена за счет вычисления матрицы  $\delta A_M$  на стадии проектирования и замены усреднения на скользящем интервале усреднением в линейном фильтре низких частот. При наличии в алгоритме блока интегрирования операция усреднения может быть опущена.

### Литература

1. **Беспилотные** летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / под ред. И. С. Голубева, И. К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.
2. **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов / В. М. Терехов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
3. **Гульков, Г. И.** Системы автоматического управления электроприводами / Г. И. Гульков, Ю. Н. Петренко, Т. В. Бачило; под общ. ред. Ю. Н. Петренко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2014. – 366 с.
4. **Лобатый, А. А.** Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А. А. Лобатый, Ю. Н. Петренко Ю. Н., А. Эльзейн, А. С. Абуфанас // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 322–328.
5. **Льунг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льунг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
6. **Справочник** по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
7. **Методы оптимизации** / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.
8. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: в 5 тт. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 4 т. – 744 с.
9. **Лобатый, А. А.** Поиск алгоритма настройки модели непрямого адаптивного фазового управления / А. А. Лобатый, М. В. Почебут // Доклады БГУИР. – 2009. – № 6 (44). – С. 62–68.

### References

1. **Unmanned** aerial vehicles. Fundamentals of the device and functioning / ed. I. S. Golubeva, I. K. Turkina. – Moscow: MAI, 2010. – 654 p.
2. **Terekhov, V. M.** Control systems of electric drives / V. M. Terekhov. – M.: Publishing Center «Academy», 2006. – 304 p.
3. **Gulkov, G. I.** Automatic control systems for electric drives / G. I. Gulkov, Yu. N. Petrenko, T. V. Bachilo; Under the Society. Ed. Yu. N. Petrenko. – Minsk: IVC of the Ministry of Finance, 2014. – 366 p.
4. **Lobaty, A. A.** Mathematical modeling of hybrid electrotechnical systems / A. A. Lobaty, Yu. N. Petrenko Yu. N., A. Elzeyn, A. S. Abufanas // Science and Technology. – 2016. – No. 4. – P. 322–328.
5. **Lyung, L.** Identification of systems. Theory for the user / L. Lyung. – Moscow: Nauka, 1991. – 432 p.
6. **Handbook** on the theory of automatic control / ed. A. A. Krasovskiy. – Moscow: Nauka, 1987. – 712 p.

7. **Methods** of optimization / ed. V. S. Zarubina, A. P. Krishchenko. – М.: Publishing house MSTU. N. E. Bauman, 2003. – 440 p.

8. **Methods** of classical and modern theory of automatic control: in 5 vols. / Ed. K. A. Pupkov and N. D. Egupova. – М.: Publishing house MSTU. N. E. Bauman, 2004. – 4 vols – 744 p.

9. **Lobaty, A. A.** Search algorithm for adjusting the model of indirect adaptive phase control. Lobaty, M. V. Pochebut // Reports of BSUIR. – 2009. – No. 6 (44). – P. 62–68.

Поступила  
20.02.2017

После доработки  
16.03.2017

Принята к печати  
10.06.2017

*Abufanas A. S., Lobaty A. A., Shvedko A. G.*

## SEARCH ALGORITHM FOR THE PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE MONITORING SYSTEM

*Belarusian National Technical University*

*The problem of parametric identification of a mathematical model of a technical system or a device is considered, which considers the electric drive of a monitoring system installed on an unmanned aerial vehicle. Identification of the parameters of elements of a complex technical system is an actual scientific task, since when developing a new technical system for its synthesis and research, it is necessary to have mathematical models of the elements of the system.*

*It is proposed to solve the problem by applying the search gradient identification algorithm for a given objective residual function in the form of a difference in the output signal of the identified element of the system and its model. When solving the problem, the random character of the processes occurring in the system and at the output of the output signal meter is taken into account. The identification algorithm is developed on the basis of the representation of the model of parameters in the form of an ordinary vector-matrix equation, on the right side of which there is a model of the driving influence in the form of a given deterministic function of time. A general structural diagram of the parametric identification search system with a gradient algorithm is presented.*

*As an example for evaluating the operability of the proposed algorithm, we consider the simplest model of an electric drive, given by a transfer function in the form of an inertial link. Qualitative illustrations of the operability of the proposed algorithm and quantitative characteristics of the signal and parameter changes of the identified object are presented.*

**Keywords:** *identification, model, residual function, gradient, search signal, parameter adjustment.*



**Абуфанас Альседдык Салем Ахмед (Abufanas Alseddig Salem Ahmed).**

Аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» БНТУ, обучается по специальности «Системный анализ, управление и обработке информации».

Пр. Независимости 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь.

Тел.: + 37517292-15-01/ E-mail: upnkvk@bntu.by.

Post Graduate student, Department of «Information Systems and Technologies» BNTU, field of study «System Analysis, Control and Data Processing».



**Lobaty A. A.** Doctor of science, professor. in 2000 he established chair «information systems and technologies» in belorussian national technical university, department of «international institute of distance education». his research interests include algorithms, concepts, and architecture for digital signal processing systems. he has extensive consulting experience in control of unmanned aerial vehicles. he is author and coauthor of many papers in scientific magazines, conference proceedings, and a number of books. he has number of university and state awards for achievements in teaching and research.

E-mail: lobaty@tut.by.



**Шведко Александр Геннадьевич** кандидат физико-математических наук ведущий научный сотрудник.

Республиканского унитарного предприятия «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси. Область научных интересов: Обработка информации для управления многофункциональными беспилотными комплексами.

E-mail: [uavnasb@mail.ru](mailto:uavnasb@mail.ru)