УДК 629.7

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОИСКОВЫМ АЛГОРИТМОМ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Радкевич А.С., Лобатый А.А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,

radkevichu@bntu.by , lobaty@tut.by

Рассматривается задача параметрической идентификации математической модели технического устройства, в качестве которого рассматривается электропривод системы мониторинга, установленной на беспилотном летательном аппарате. Идентификация параметров элементов сложной технический 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.

Мехатронная система - единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта. Мехатронные системы особенно актуальны в современных условиях. Каждый год в мире происходит рост производства мехатронных систем и устройств, которые охватывают все больше сфер [1]. Одним из примеров такой системы является электропривод, который предназначен для управления угловым положением видеокамеры БЛА и изменяющий угловое положение видеокамеры в двух плоскостях относительно корпуса БЛА.

Такой электропривод системы мониторинга как системы слежения относится к классу позиционных электроприводов [2]. Он перемещает рабочий

орган из некоторой исходной позиции в некоторую конечную позицию с требуемой точностью остановки в ней. Чтобы обеспечить достаточную надежность привода системы мониторинга в сложных условиях эксплуатации БЛА (резкие перепады температуры, тряска, вибрации и т.п.) применяют вентильные двигатели, у которых механический коммутатор заменен электронным (полупроводниковым). Простейшая функциональная схема вентильного двигателя представлена на Рис. 1, где обозначено: ДПР – датчик положения ротора.

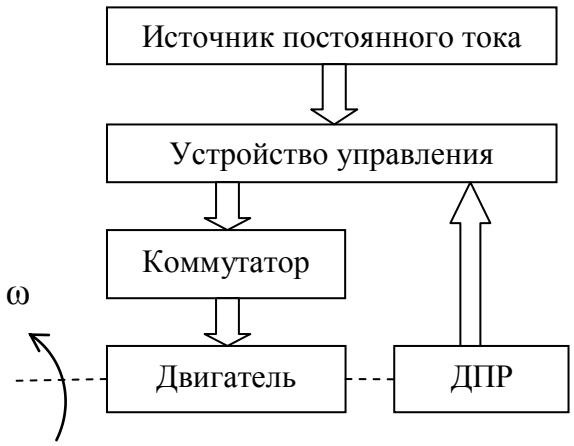

Рис. 1. – Функциональная схема электропривода

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

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

$$\dot{\omega} = -\frac{1}{T_д}\omega + \frac{K_д}{T_д}U_{ср}, \qquad \omega(t_0) = \omega_0. \tag{2}$$

где φ – угол поворота ротора, ω – угловая скорость вращения ротора, $U_{ср}$ - среднее управляющее напряжение, $K_д$ и $T_д$ - 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

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

где $K = \frac{K_д}{T_д}$, $a = -\frac{1}{T_д}$. Принцип работы таких электроприводов подробно рассмотрен в [2, 3, 4].

Решение задачи идентификации. При создании сложных мехатронных систем изготовитель и поставщики, 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.

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, 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 [10].

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.

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

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

где $A = [a_1, a_2 ... a_n]$ - 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; ξ – вектор входных возмущений, ζ – 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

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

где Γ 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:

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

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

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

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

Считаем, что поисковый сигнал δA_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 δY_M и δX можно пренебречь ввиду их малости по отношению к A_M, то будет справедливо приближенное равенство [8]

$$\partial \dot{Y}_M \approx \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M , \tag{9}$$

или в операторной форме

$$\delta Y_M \approx \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \delta A_M , \tag{10}$$

где $1/p$ - оператор интегрирования.

Из соотношения (10) при квазистационарном режиме получаем

$$\frac{\partial Y_M}{\partial A_M} \approx \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} . \tag{11}$$

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

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

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.

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

где <…> операция усреднения, а левая часть выражения (13) вычисляется по формуле

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

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

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

Следовательно

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

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

$$\dot{A}_M = -\Gamma \nabla_{A_M} q(E) = \Gamma \left[\frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \left(\frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \right) \right]^T =$$

$$= \Gamma \cdot \left\langle \left[\delta A_M \left(\delta A_M\right)^T \right]^{-1} \right\rangle \cdot \left\langle \delta A_M \left(\delta Y_M\right)^T \right\rangle \left(\frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \right)^T . \qquad (17)$$

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.

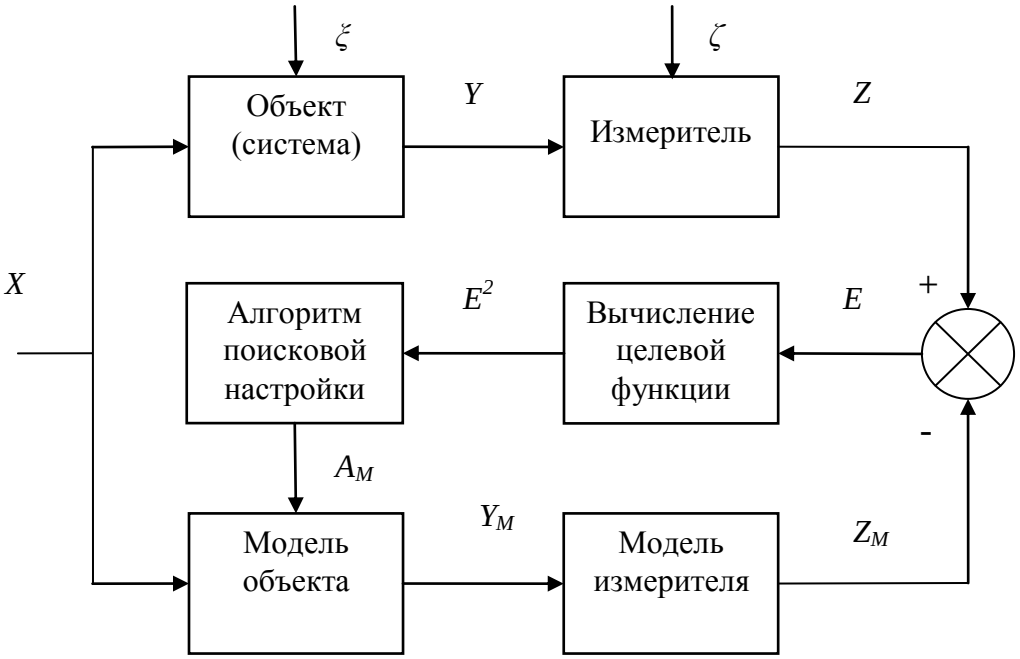

Рис.2. Структурная схема поисковой системы идентификации с градиентным алгоритмом

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

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

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

Целью управления будем считать синтез алгоритма настройки параметра a_M, обеспечивающего 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

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

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 a_M (Рис. 6). Интегрирование выполнялось в среде Mathcad при заданном значении параметра a=3, дисперсии помехи D_ξ=0.08, γ=-2.9.

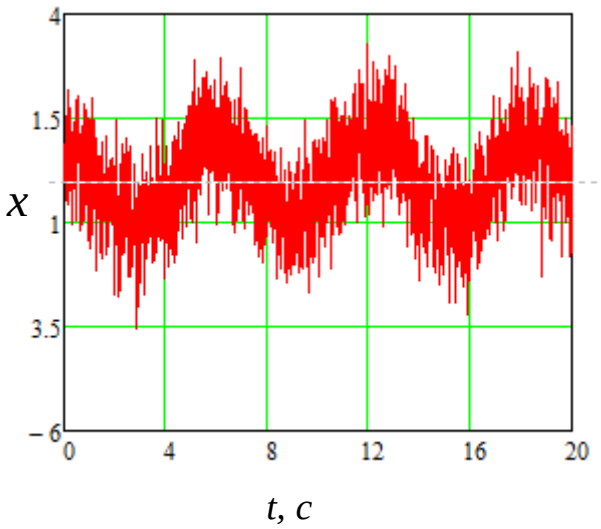

Рис. 3. График зашумленного входного сигнала x.

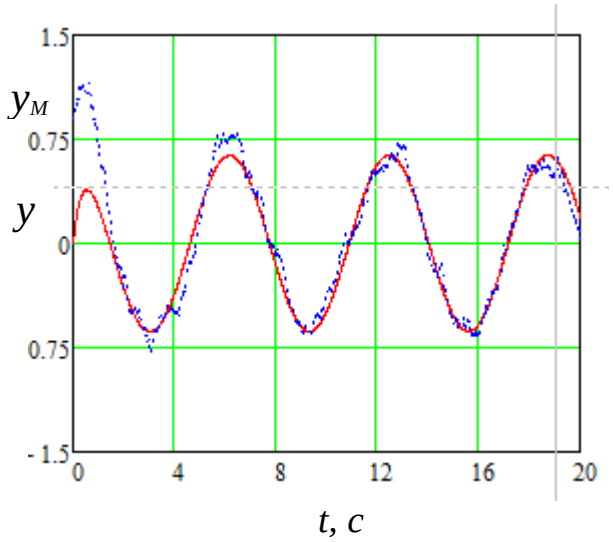

Рис. 4. Графики изменения выходных сигналов системы y и модели y_M.

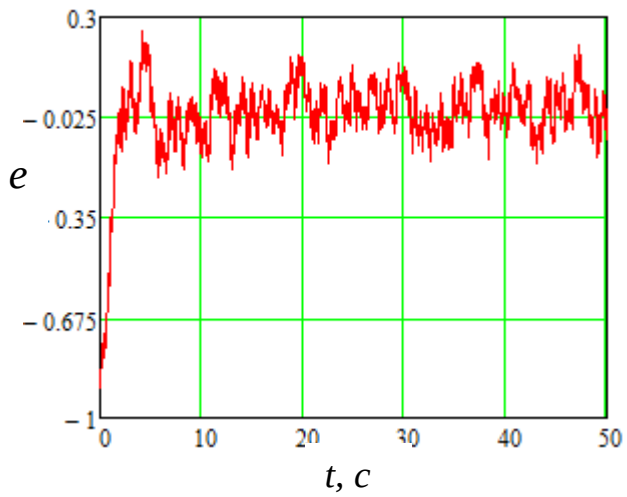

Рис 5. График изменения рассогласования e.

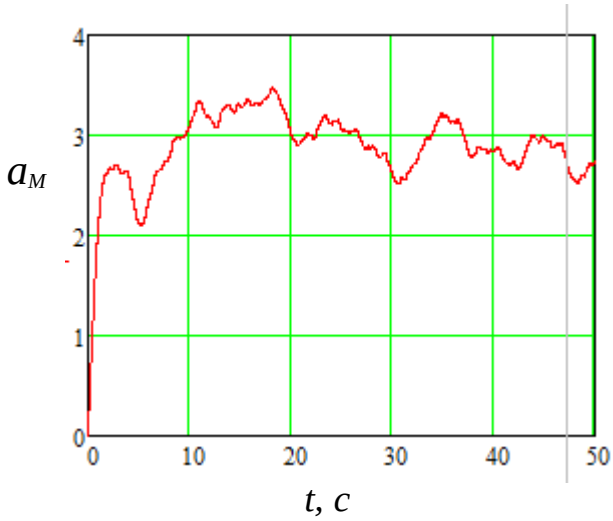

Рис. 6. График изменения настраиваемого параметра a_M

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 δA_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. **Овчинников, И.Е.** Электромеханические и мехатронные системы. Часть 1 / И.Е. Овчинников. – М.: Издательство Корона-Принт, 2012. – 400 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. **Льюнг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – 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.** Поисковый алгоритм настройки модели непрямого адаптивного фазового управления / А.А. Лобатый, М.В. Почебут // Доклады БГУИР. – 2009. – № 6 (44) . – С. 62-68.

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