УДК 629.7.051.001

ПОИСКОВЫЙ АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ МОДЕЛИ НЕПРЯМОГО АДАПТИВНОГО ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.А. ЛОБАТЫЙ, М.В. ПОЧЕБУТ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки,6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 апреля 2009

Предлагается методика построения адаптивной системы фазового управления на основе поискового алгоритма настройки модели с использованием непрерывного градиентного метода идентификации с синхронным детектированием. Путем математического моделирования произведена оценка реализуемости и работоспособности алгоритма.

Ключевые слова: объект управления, целевая функция, идентификация параметров, адаптация модели.

Введение

Широкое распространение в различных областях автоматики, радиотехники и связи получили автоматические системы с фазовым управлением (СФУ), сигнал ошибки в которых формируется на основе сравнения фаз входного и выходного сигналов. Исследованию СФУ посвящен ряд работ, в которых рассматриваются вопросы анализа и синтеза, оценки точности и устойчивости. При рассмотрении различных структурных схем СФУ, как правило, предполагается, что оператор объекта управления задан и известны характеристики распределения случайных воздействий. Однако СФУ должны функционировать в самых разнообразных условиях, когда свойства объектов управления не только не известны, но и не могут быть предварительно определены. Следовательно, СФУ должна работать при неполной информации и выполнять свое назначение, а недостающая информация должна быть получена СФУ в процессе функционирования. Системы, способные самостоятельно в процессе функционирования разрешать неопределенность, получать дополнительную информацию и изменять свои свойства и параметры, называются адаптивными.

Самое важное свойство адаптации состоит в непрерывном получении информации и использовании ее для улучшения характеристик системы. Для получения недостающей информации автоматическая система снабжается дополнительными датчиками и устройствами обработки сигналов измерителей. Такие устройства образуют дополнительный контур адаптации параметров или структуры системы. В настоящее время существует большое разнообразие принципов построения адаптивных систем. Решим задачу адаптации СФУ в классе самонастраивающихся систем, в которых структура регулятора, в отличие от самоорганизующихся, задана (заранее выбрана), и требуется определить лишь алгоритм настройки его коэффициентов (алгоритм адаптации).

Постановка задачи и алгоритм настройки модели

Обобщенная структурная схема адаптивной СФУ может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

На рисунке введены следующие обозначения: $Y(t)$, $\varepsilon(t)$, $X(t)$, $Z(t)$ — входные и выходные сигналы соответствующих блоков СФУ [1], ξ_1, ξ_2 — возмущения и помехи измерений.

Назначение блока адаптации состоит в определении корректирующих воздействий на параметры фильтра и объекта управления на основании информации об объекте, возмущениях, системе в целом, полученной в процессе функционирования.

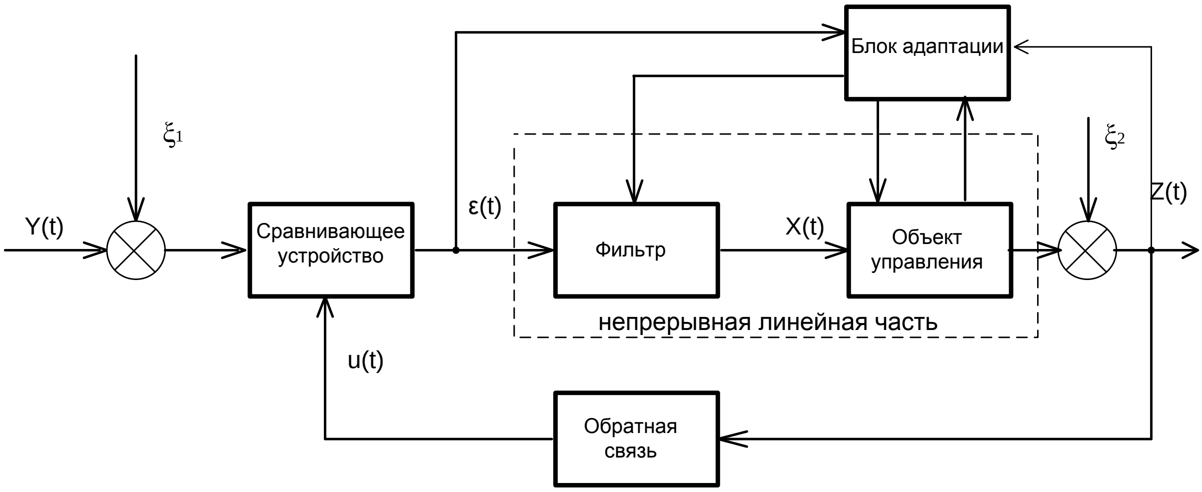

Рис. 1. Обобщенная структурная схема адаптивной СФУ

Рассмотрим построение адаптивной СФУ на основе алгоритма непрямого управления с настраиваемой моделью, которая обладает рядом достоинств, основное из которых заключается в том, что непрямое адаптивное управление позволяет решать задачу в два этапа. На первом этапе осуществляется идентификация объекта. На втором — выбор коэффициентов непрерывной линейной части (НЛЧ) СФУ (фильтра и объекта управления). Кроме того, непрямое адаптивное управление не влияет на динамику системы, так как контуры самонастройки работают по разомкнутому циклу.

Пусть существует алгоритм выбора коэффициентов адаптивной СФУ в соответствии с некоторым критерием и методом оптимизации. Рассмотрим алгоритм идентификации НЛЧ СФУ для настройки параметров модели, на основе которой производится формирование коэффициентов НЛЧ.

Так как СФУ в общем случае подвержена случайным воздействиям, то при неполной структурной адекватности модели и объекта, при сильном отличии в начальных значениях параметров объекта возможно существование множества экстремумов целевой функции по настраиваемым параметрам. Следовательно, беспоисковый алгоритм идентификации может оказаться неработоспособным. В этих условиях применим поисковый алгоритм идентификации НЛЧ СФУ с активным поиском и испытаниями адаптивной модели по параметрическим каналам на основе измерений входных и выходных сигналов НЛЧ СФУ. При этом учтем границы работоспособности системы.

Задачей алгоритма поисковой настройки является изменение параметров модели НЛЧ СФУ θ_M таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию невязки $q(E)$.

Рассмотрим подробнее непрерывный градиентный алгоритм идентификации с синхронным детектированием [2].

Пусть в общем случае НЛЧ СФУ и ее модель в соответствии с рис. 1 описываются уравнениями состояния.

$$\dot{X} = F(X, Y, \theta, t), \qquad Z = G(X, Y, t) + \xi_2,$$

$$\dot{X}_M = F_M(X_M, Y, \theta_M, t), \qquad Z_M = G_M(X_M, Y, t),$$

где $X \in R^n, X_M \in R^n, Z \in R^l, Z_M \in R^l, Y \in R^m, \theta \in R^p, \theta_M \in R^p$ — векторы состояний, выходов, входов и параметров СФУ и модели соответственно; ξ_1, ξ_2 — векторы возмущений и помех измерения; R^n, R^l, R^m, 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, а настраиваемая модель — наблюдаемая, так что известны текущие значения X_M, Z_M, θ_M.

Настройку параметров модели будем осуществлять в направлении антиградиента целевой функции [3]

$$\dot{\theta}_M = -\Gamma \nabla_{\theta_M} q(E), \tag{1}$$

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

Для осуществления градиентного метода необходимо определить

$$\frac{\partial q(E)}{\partial \theta_M} = -\frac{\partial q(E)}{\partial E}\frac{\partial G_M}{\partial X_M}\frac{\partial X_M}{\partial \theta_M}. \tag{2}$$

Основная трудность в вычислении правой части уравнения (2) состоит в нахождении $\frac{\partial X_M}{\partial \theta_M}$. Добавим к вектору параметров θ_M малую высокочастотную центрированную составляющую $\delta\theta_M(t)$. При этом уравнение модели в вариациях будет иметь вид

$$\delta\dot{X}_M = \frac{\partial F_M}{\partial X_M}\delta X_M + \frac{\partial F_M}{\partial \theta_M}\delta\theta_M + \frac{\partial F_M}{\partial Y}\delta Y.$$

Пусть поисковый сигнал $\delta\theta_M$ является быстроменяющейся вектор-функцией по сравнению с собственными движениями модели и движением, порожденным внешним воздействием $Y(t)$. При этом процесс $X(t)$ считается квазистационарным, так как он меняется существенно медленнее остальных динамических процессов, протекающих в системе. Тогда вариациями $\delta X_M(t), \delta Y$ можно пренебречь ввиду их малости по отношению к θ_M, так что будет справедливо приближенное равенство

$$\delta\dot{X}_M \approx \frac{\partial F_M}{\partial \theta_M}\delta\theta_M.$$

Или в операторной форме

$$\delta X_M \approx \frac{1}{p}\frac{\partial F_M}{\partial \theta_M}\delta\theta_M, \tag{3}$$

где $p = \frac{d}{dt}$.

Из соотношения (3) при квазистационарном режиме получаем

$$\frac{\partial X_M}{\partial \theta_M} \approx \frac{1}{p}\frac{\partial F_M}{\partial \theta_M}.$$

Для достаточно высокочастотного поискового сигнала $\delta\theta_M$ приближенное равенство (9) можно заменить строгим. С учетом этого уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\partial q}{\partial\theta_M} = -\frac{\partial q}{\partial E}\frac{\partial G_M}{\partial X_M}\left(\frac{1}{p}\frac{\partial X_M}{\partial\theta_M}\right). \tag{4}$$

Для вычисления $\frac{1}{p}\frac{\partial X_M}{\partial\theta_M}$ применим процедуру синхронного детектирования [2]. Умножим выражение (3) справа на $\delta\theta_M^T$ и усредним полученное уравнение по некоторому скользящему интервалу времени

$$<\delta X_M(\delta\theta_M)^T> = <\frac{1}{p}\frac{\partial F_M}{\partial\theta_M}\delta\theta_M(\delta\theta_M)^T>,$$

где <…> — операция усреднения; $<\delta X_M(\delta\theta_M)^T> = \frac{1}{T}\int_{t-1}^{t}\delta X_M(\tau)(\delta\theta_M(t))^T dt$.

Учитывая квазистационарность настройки модели, получаем

$$<\delta X_M(\delta\theta_M)^T> = \frac{1}{p}\frac{\partial F_M}{\partial\theta_M}<\delta\theta_M(\delta\theta_M)^T>, \tag{5}$$

следовательно

$$\frac{1}{p}\frac{\partial F_M}{\partial\theta_M} = <\delta X_M(\delta\theta_M)^T>\cdot<[\delta\theta_M(\delta\theta_M)^T]^{-1}>. \tag{6}$$

Пусть поисковые сигналы выбираются из условия невырожденности матрицы $\left\langle\delta\theta_M(\delta\theta_M)^T\right\rangle$. Тогда алгоритм настройки параметров (1) с учетом (4), (5) принимает вид

$$\dot{\theta}_M = -\Gamma\nabla_{\theta_M}q(E) = \Gamma\left[\frac{\partial q}{\partial E}\frac{\partial G_M}{\partial X_M}\left(\frac{1}{p}\frac{\partial X_M}{\partial\theta_M}\right)\right]^T = \Gamma<[\delta\theta_M(\delta\theta_M)^T]^{-1}><\delta\theta_M(\delta X_M)^T>\left(\frac{\partial q}{\partial E}\frac{\partial G_M}{\partial X_M}\right) \tag{7}$$

Структурная схема системы идентификации представлена на рис. 2.

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества поисковых алгоритмов, их реализация несколько сложнее, чем беспоисковых алгоритмов адаптивного управления, так как требует наличия генератора поисковых сигналов.

Пример

В качестве примера рассмотрим НЛЧ СФУ, описываемую передаточной функцией вида

$$W_0(S) = \frac{k}{s+a},$$

где k — коэффициент усиления; a — неизвестный параметр.

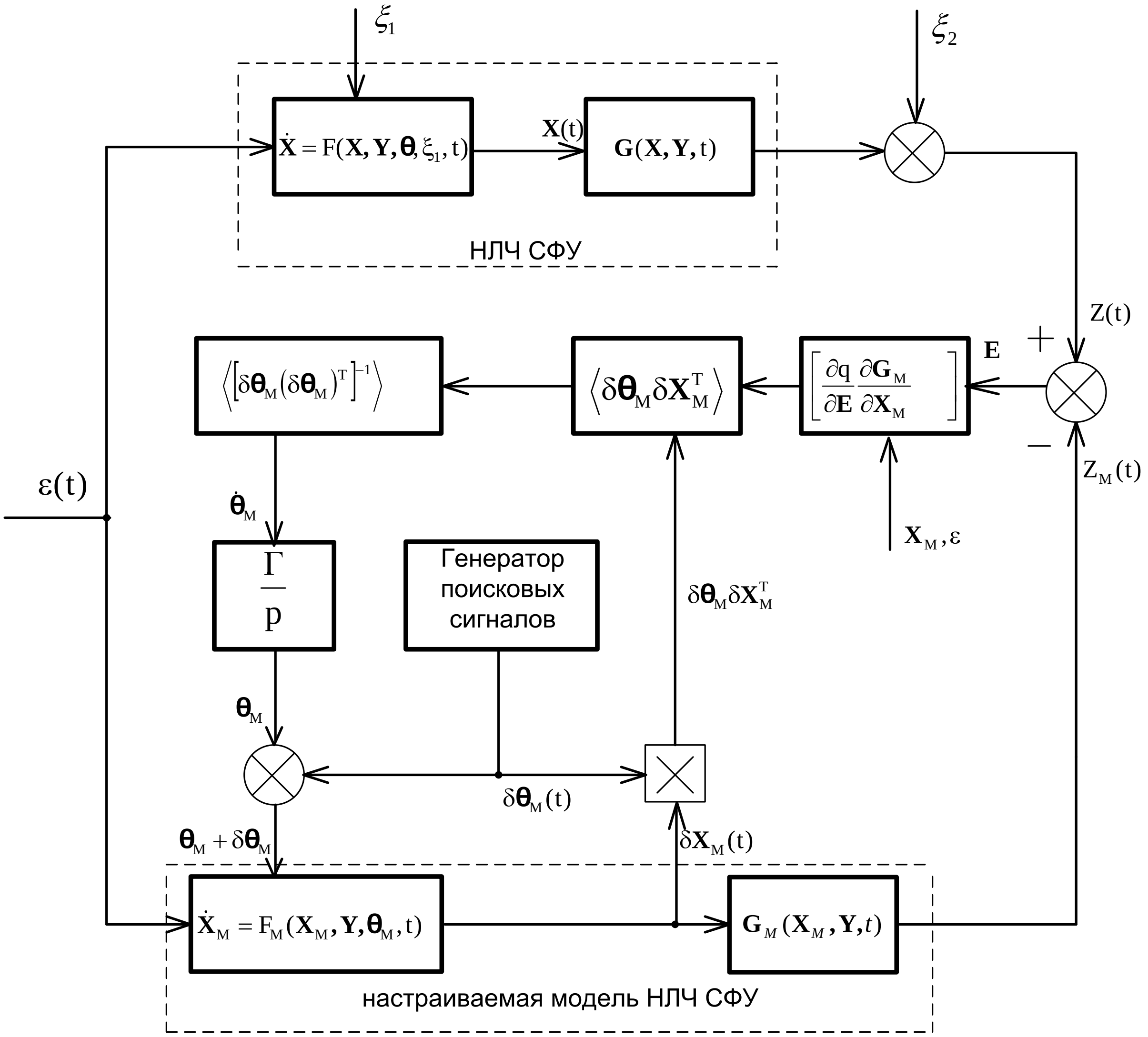

Рис. 2. Структурная схема поисковой системы идентификации с градиентным алгоритмом

Требуется провести идентификацию параметра *a* методом синхронного детектирования, считая, что на объект действует задающее воздействие $y = \sin(t)$, *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

$$W_M(S) = \frac{k}{s + \theta},$$

где $\theta = \theta(t)$ — настраиваемый параметр.

Целью управления будем считать синтез алгоритма настройки параметра θ, обеспечивающего минимизацию целевой функции $q = e^2$, где $e = X - X_M$ — рассогласование между выходами объекта и настраиваемой модели.

Выберем в качестве поискового высокочастотный сигнал вида $\delta\theta = 0{,}1\sin(200t)$. В соответствии с (14) алгоритм идентификации будет иметь вид

$$\dot{\theta} = \gamma \frac{< \delta\theta\delta X_M >}{< \delta\theta^2 >} e, \gamma > 0.$$

На рис. 3–6 приведены графики изменения во времени зашумленного входного сигнала y (рис. 3), настраиваемого параметра θ_M (рис. 4), выходных сигналов системы X и модели X_M (рис. 5), рассогласования e (рис. 6). Интегрирование выполнялось методом Эйлера в среде Mathcad при заданном значении параметра a=3,2 и дисперсии помехи $D_\xi = 0,01$.

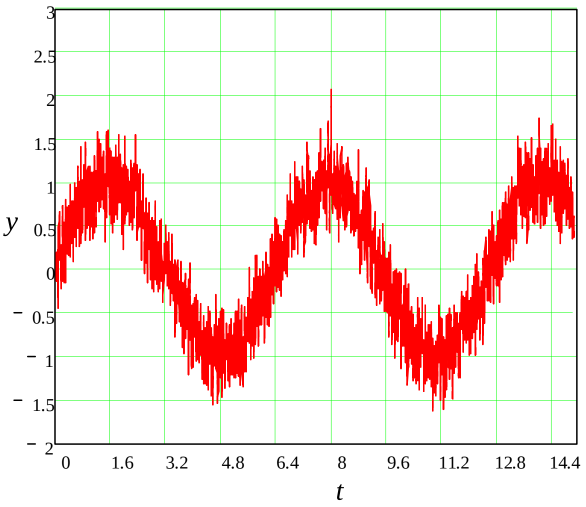

Рис. 3. График изменения зашумленного входного сигнала

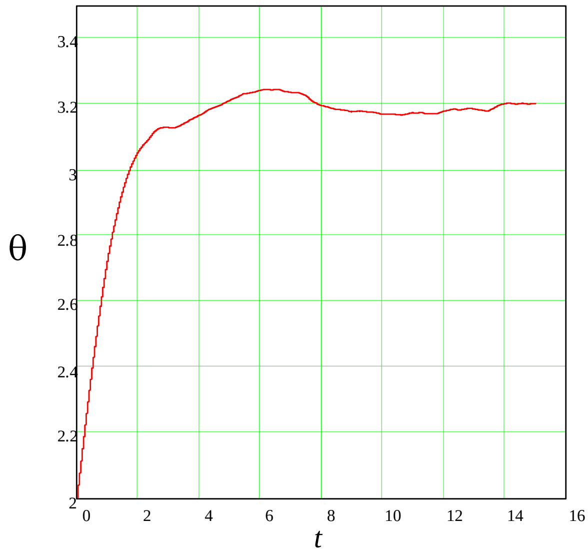

Рис. 4. График изменения настраиваемого параметра

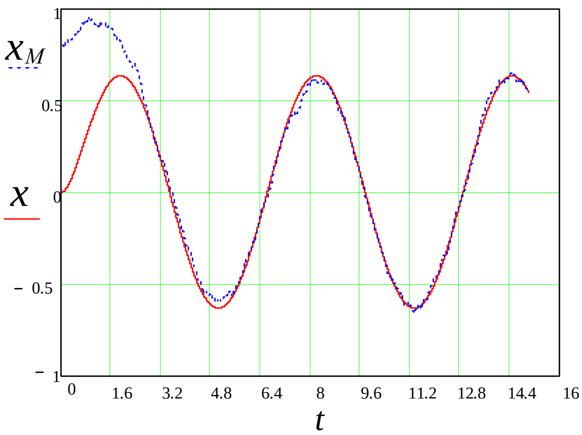

Рис. 5. Графики изменения выходных сигналов системы и модели

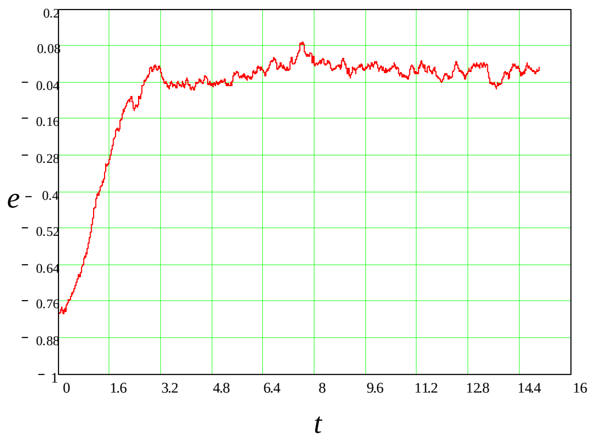

Рис. 6. График изменения параметра рассогласования

Результаты моделирования показывают, что точность идентификации, определяемая функцией невязки e, а также сходимость алгоритма настройки модели обеспечиваются в течение времени, обусловленного инерционностью системы. Заметим, что в данном примере реализация алгоритма идентификации упрощена за счет вычисления значения $\langle\delta\theta^2\rangle$ заранее, для заданного поискового сигнала, а ввиду наличия в алгоритме интегратора $1/p$ операция усреднения опущена.

Заключение

Наиболее перспективной является концепция создания адаптивных систем управления, основанных на сочетании устройств или алгоритмов идентификации динамических характеристик (в частности, параметров) управляемого объекта, оценивания его состояния и внешних воздействий с настраиваемым фильтром и регулятором. Системы, построенные на основе этой концепции, позволяют максимально использовать априорную и получаемую в процессе функционирования информацию о структуре и параметрах объекта в частности СФУ.

Итоговой процедурой многопараметрической адаптивной оптимальной системы управления является оптимизация управляющих сигналов и параметров закона управления (регулятора) на основе задаваемых цели управления и критерия оптимизации.

Реализация адаптивных алгоритмов управления должна быть ориентирована на быстроразвивающиеся средства вычислительной математики. Применение оптимального адаптивного управления позволяет успешно решать многие проблемы создания и освоения новых поколений СФУ, расширить диапазоны условий их применения, снизить временные и материальные затраты на разработку и освоение отдельных образцов.

SEARCHING ALGORITHM OF TUNING OF INDIRECT ADAPTIVE PHASE CASE FRAME

A.A. LOBATY, M.V. POCHEBUT

Abstract

The method of construction the adaptive system phase control is offered on the basis of searching algorithm of tuning model with the use continuous gradient method of authentication with synchronous detection. By a mathematical design the estimation of realizability and capacity algorithm is produced.

Литература

1. *Батура М.П.* Дискретные системы с фазовым управлением. Минск, 2002.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М., 1987.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.5. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, И.Д. Егупова. М., 2004.