

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АДАПТИВНЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Рапенюк А.В.

(г. Камышин Волгоградской обл.)

Приводятся результаты исследования адаптивной системы автоматического управления, контур адаптации которой используется для автоматической настройки параметров пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора в условиях неполной информации о параметрах и форме математической модели объекта управления. Тип системы адаптации – беспоисковая самонастраивающаяся система (СНС) с эталонной моделью [1]. В развитие известных результатов [1] проведен анализ работоспособности адаптивной системы в условиях, когда характеристики объекта отличаются от учтенных на этапе синтеза контура адаптации.

THE INVESTIGATION OF THE CONTROL SYSTEM WITH THE ADAPTIVE PID-REGULATOR

Rapenok A.V.

(The city of Kamyshin, Volgograd region)

The issue deals with the adaptive control system investigation results. The adaptation contour of the system is applied for the proportional – integration – differential (PID) regulator's parameter adjustment in the conditions of the plant model structure and parameters uncertainty. The class of the adaptive system is the self-adjusting non – search system with the etalon model. In addition to the known results the investigation of the adaptation quality was worked out for the cases when the plant characteristics differ from the ones taken into account at the stage of adaptation algorithms synthesis.

Введение и постановка задачи. Рассматривается система управления, содержащая (рис. 1):

- контур традиционного управления (объект управления с неполностью известными параметрами и, возможно, с неполностью заданной структурой, а также регулятор с возможностью подстройки параметров и/или структурой, в терминах теории адаптивного управления – Обобщенный Настраиваемый Объект (ОНО));
- контур, осуществляющий в реальном времени (в ходе эксплуатации системы управления) подстройку параметров и/или структуры регулятора по мере накопления информации о заранее неизвестных характеристиках объекта.

Данная работа базируется на результатах раздела теории адаптивного управления, относящегося к *системам с эталонной моделью* [1]. Основная идея теории состоит в задании нужного качества управления и в подстройке ОНО для обеспечения близости между выходом ОНО и эталоном.

В развитие теоретических положений [1] в представляемой работе проведены исследования, направленные на проверку качества адаптации в условиях, когда характеристики системы отличаются от принятых при синтезе системы управления. В частности:

1. Проведен анализ влияния различий в параметрах эталонной модели и обобщенного настраиваемого объекта (ОНО, термин объединяет объект управления и регулятор).

2. Получены результаты исследования изменений скорости сходимости и качества адаптации, вызванные неточным учетом ряда параметров на этапе синтеза контура адаптации. В вычислительных экспериментах предполагался более высокий порядок модели ОНО по сравнению с эталонной моделью (с малыми параметрами при неучтенных переменных состоянии ОНО). Исследовалось также наличие небольшого неучтенного запаздывания в ОНО и в контурах управления и адаптации.

Схема синтеза алгоритма адаптации

Пусть объект управления (ОУ) описывается дискретным уравнением в состояниях:

$$X[S+1] = AX[S] + BU[S] \quad (1)$$

где S – дискретное время (такты), $S = 0, 1, \dots$

$X[S]$ – вектор состояний ОУ ($n \times 1$), $X[0]$ задано;

$U[S]$ – вектор управления ($m \times 1$);

A, B – постоянные матрицы параметров ОУ ($n \times n$ и $n \times m$), которые априорно предполагаются известными не полностью.

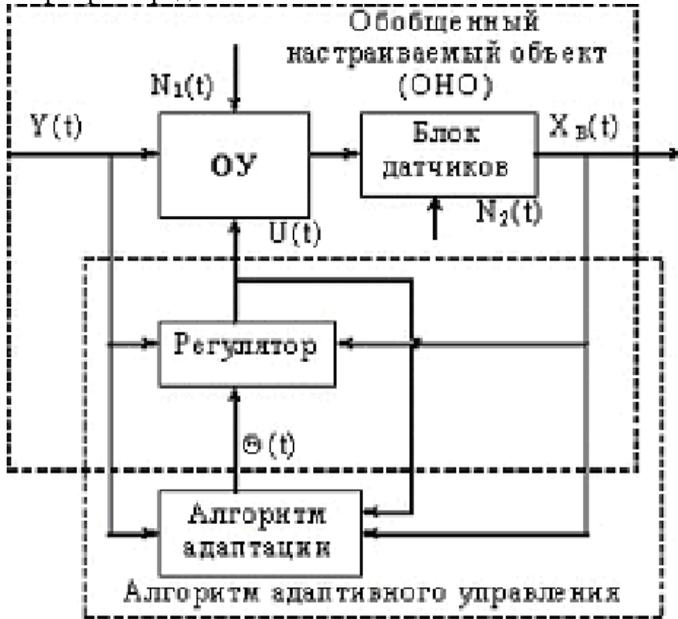


Рис. 1. Структура адаптивной системы с эталонной моделью.

Априорная информация о модели (1):

- порядок матриц A и B известен точно;
- известно, что элементы матриц изменяются настолько медленно, что за период сходимости алгоритма адаптации их можно считать постоянными. Сами элементы матриц объекта могут быть неизвестными.
- Предполагается доступность измерению всего вектора состояния ОУ.

Далее используется понятие *эталонной модели*. Будем считать, что мы располагаем данными, позволяющими выбрать параметры A_M и B_M такой же структуры, как A и B , чтобы качест-

во воспроизведения выхода объекта удовлетворяло требованиям заказчика. Технически нахождение A_M и B_M сводится к определению параметров регулятора внутреннего контура в предположении, что A и B известны. Уравнение эталонной модели:

$$X_M[S+1] = A_M X_M[S] + B_M Y[S] \quad (2)$$

где $X_M[S]$ – вектор состояния эталонной модели ($n \times 1$);

$Y[S]$ – вектор задающих воздействий ($m \times 1$);

A_M, B_M – постоянные матрицы параметров эталонной модели ($n \times n$ и $n \times m$).

Теперь можно потребовать, чтобы настройка параметров регулятора корректировалась в текущем времени так, чтобы рассогласование между желательным (модельным) выходом объекта и измеренным значением реального выхода стремилось к нулю. Поставленную задачу можно решить в терминах устойчивости.

Цель управления (ЦУ):

$E[S]$ должна стремиться к 0 при $S \rightarrow \infty$,

где $E[S] = X[S] - X_M[S]$ – ошибка системы (трагуемая как разность между фактическими и желаемыми значениями векторов состояния).

Описанная постановка задачи относится к СНС с явной эталонной моделью. В соответствии с двухуровневой структурой СНС задача решается в два этапа:

Этап 1. Построение основного контура.

Этап 2. Синтез контура адаптации.

Этап 1. Синтез основного контура

Задача решается в предположении, что параметры ОУ известны. Для получения структуры «идеального» регулятора запишем уравнение в отклонениях выхода объекта от желательного

$$E[S+1] = A_M E[S] + \{(A - A_M) X[S] + B U[S] - B_M Y[S]\} \quad (3)$$

Мы видим, что уравнение, определяющее рассогласование между модельным и реальным выходом, содержит два вида слагаемых. Первый – однородное уравнение, которое, если A_M устойчива, «само собой» устремит ошибку к нулю. Второй содер-

жит управляющие воздействия, в выборе которых имеется свобода. Поэтому выберем управляющие воздействия так, чтобы сумма элементов, показанных в фигурных скобках, была нулевой – тогда, как уже сказано выше, первая часть формулы приведет ошибку к нулю. Таким образом, идеальное управление найдем из приравнивания части формулы, показанной в фигурных скобках, нулю:

$$(A - A_M) X[S] + BU[S] - B_M Y[S] = 0 \quad (4)$$

Решая это уравнение относительно управлений, получим закон управления в форме обратной связи по вектору состояния и корректирующего слагаемого, учитывающего задающее воздействие:

$$U^*[S] = K^Y K^X X[S] + K^Y Y[S], \quad (5)$$

Этап 2. Синтез контура адаптации

Снова выделим часть формулы, содержащую автономный контур уменьшения ошибки во времени, и дополнительный контур, содержащий параметры регулятора, которые мы хотим подстраивать под неизвестные параметры объекта. Рассогласование между эталонным и реальным выходом объекта имеет вид:

$$E[S] = A_M E[S] + B_M \Theta[S] \Sigma[S] \quad (6)$$

где $\Theta[S] = \{\Phi[S] \mid \Psi[S]\}$ – расширенная матрица отклонений настраиваемых коэффициентов от их «идеальных» значений, вызванных неточными данными о параметрах объекта.

Используя аппарат устойчивости, создадим алгоритм, который приведет рассогласование между параметрами эталонной модели и ОНО к нулю. Это осуществляется с помощью введения функции Ляпунова в виде квадратичной формы с двумя слагаемыми: первое построено на рассогласовании выходов модели и объекта, второе – на рассогласовании параметров модели и ОНО:

$$V[S] = 1/2 E^T H E + 1/2 \text{tr}(\Theta[S]^T \Gamma \Theta[S]) \quad (6)$$

Известно [1], что процесс настройки параметров будет устойчив, если функция Ляпунова положительна (в данном случае это очевидно), а ее дискретная производная по времени – отри-

цательна. Если вычислить эту дискретную производную, то окажется, что у нее есть бесспорно отрицательные элементы и «сомнительные» элементы, которые могут быть как отрицательными, так и положительными. Тогда, чтобы процесс настройки параметров сходил, естественно приравнять эти элементы нулю, расписать итеративную процедуру, обеспечивающую сходимость выражения, содержащего эти элементы, к нулю и получить, таким образом, алгоритм адаптации.

Конечная разность, заменяющая в дискретных системах производную, вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} V[S+1] &= V[S] + E[S]^T H(A_M - I)E[S] + \\ &+ \text{tr}((B_M^T H E[S] \Sigma[S]^T + \Gamma^{-1} (\Theta[S+1] - \Theta[S])^T \Theta[S]) \end{aligned} \quad (7)$$

В результате получим алгоритм адаптации для контура обратной связи K^X (8) и контура воспроизведения задания K^Y (9):

$$K^X[S+1] = K^X[S] - \Gamma B_M^T H E[S] X[S]^T \quad (8)$$

$$K^Y[S+1] = K^Y[S] - K^Y[S] \Gamma B_M^T H E[S] (Y[S] + K^X[S] X[S])^T (K^Y[S])^T K^Y[S] \quad (9)$$

Как видно из (8) и (9), алгоритм адаптации построен на доступной для измерения информации, то есть:

- на задаваемых разработчиком параметрах эталонной модели;
- на задающих воздействиях;
- на рассогласованиях между выходами модели и объекта.

Поскольку в (8) – (9) не входят неизвестные параметры объекта, алгоритм адаптации получается физически реализуемым.

Задачи моделирования адаптивной системы с эталонной моделью

Ряд положений теории, описанных выше, возможно, не выполняются на практике. В частности:

- может быть неизвестен порядок модели объекта в (1);
- могут присутствовать небольшие запаздывания, учет которых требует увеличения размерности вектора состояния;
- могут наблюдаться трудности в выборе структуры и параметров эталонной модели;
- процесс адаптации может быть затруднен технологической целью функционирования ОНО (например, если тех-

нологическая цель состоит в стабилизации выхода объекта, то управляющие воздействия могут не обладать достаточной вариабельностью для достижения цели накопления информации о характеристиках объекта);

- управляющие воздействия могут оказаться ограниченными допустимым диапазоном.

Перечисленные трудности обосновывают необходимость проведения вычислительных экспериментов, в ходе которых нужно выявить применимость адаптивной системы для случая, когда имеют место отклонения от теоретических положений из-за перечисленных выше факторов.

Исследование влияния выбора структуры и параметров эталонной модели на качество адаптации

Проведенные вычислительные эксперименты позволили установить следующее (рис. 2):

- Если параметры матрицы A_M эталонной модели выбрать так, чтобы ее собственные числа располагались «между» собственными числами матрицы A объекта (т.е. если моды матрицы A_M «медленнее» быстрых мод матрицы A и «быстрее» медленных мод A), то процесс адаптации проходит с хорошей сходимостью.

Примечание. В [1] рекомендовалось выбирать матрицы эталонной модели так, чтобы они были ближе к самой медленной переменной состояния реального объекта. Однако при этом адаптивность системы по отношению к «быстрым» модам утрачивается.

- Алгоритм адаптации легче всего реализовать, если размерность вектора управляющих воздействий совпадает с размерностью вектора состояний, матрица A_M выбрана диагональной, а матрица B_M единичной. В этом случае, несмотря на наличие перекрестных связей между переменными состояниями в объекте, имеет место хорошая сходимость алгоритма (5), позволяющего оценить параметры объекта (элементы матрицы A).

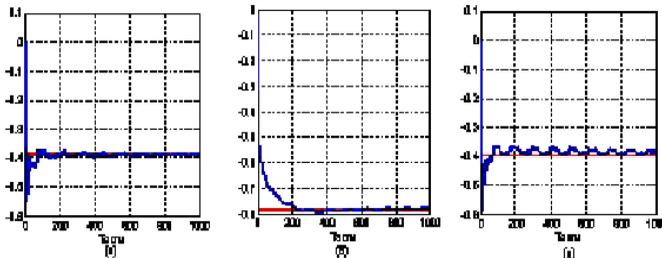


Рис. 2. Сходимость элементов матрицы K^X контура адаптации при выборе эталонной модели: а) с собственными числами лежащими между собственными числами матрицы A объекта управления; б) с собственными числами лежащими ближе к самой медленной переменной состояния объекта управления; в) с недиагональными параметрами A_M и V_M . Иллюстрируется сходимость в различных ситуациях

Исследование влияния выбора параметров адаптивной системы

При анализе параметров контура адаптации, а также в ходе ряда экспериментов было установлено (рис. 3,4):

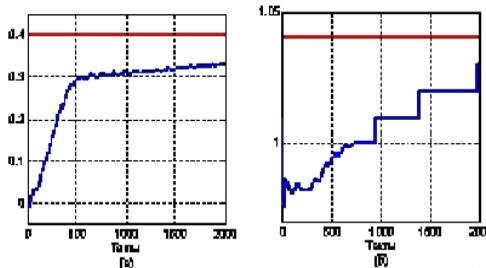


Рис. 3. Эволюция коэффициентов матриц адаптации K^X (а) и K^Y (б) при малых значениях матриц Γ_1 , Γ_2 и H . Хорошая устойчивость, плохая скорость сходимости

- Можно управлять скоростью сходимости и степенью устойчивости системы;
- однако повышение степени устойчивости приводит к снижению скорости сходимости;
- и наоборот, с принятием мер по увеличению скорости сходимости, запас устойчивости снижается, и адаптивная система может вообще стать неустойчивой.

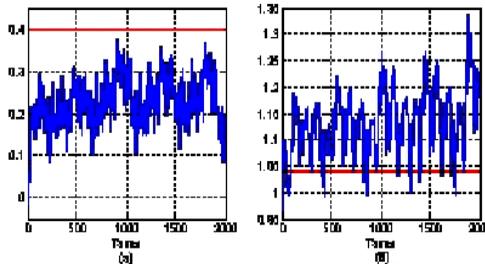


Рис. 4. Эволюция коэффициентов матриц адаптации K^X (а) и K^Y (б) при очень больших значениях матриц Γ_1 , Γ_2 и H . Нарушение устойчивости

Исследование влияния variability управляющих воздействий

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что наилучшие результаты сходимости параметров контура адаптации были получены при выборе управляющих воздействий в форме периодических сигналов с различными (некратными) частотами для разных компонент вектора управляющих воздействий (рис. 5).

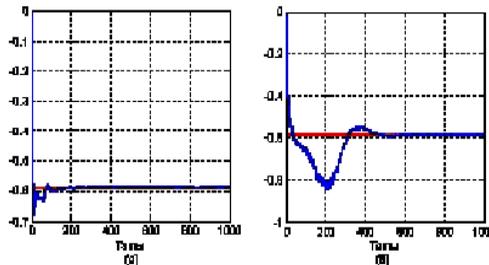


Рис. 5. Эволюция коэффициентов матриц адаптации K^X при сильно различающихся (а) и при кратных (б) частотах компонент вектора управляющих воздействий U . Иллюстрируется существенная разница в сходимости

Дальнейшие исследования направлены на использование адаптации в системах управления объектами с параметрами, зависящими от времени (можно сказать, что именно для таких объектов нужна адаптация системы управления). Естественно, при увеличении скорости изменения параметров объекта управления условия адаптации ухудшаются, и нужно выработать рекомендации по соотношениям между скоростью дрейфа параметров объекта и динамическими характеристиками контура

управления выходом объекта (рис. 6).

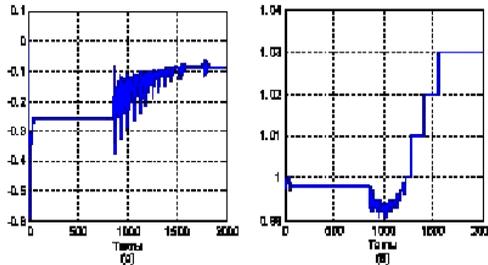


Рис. 6. Эволюция коэффициентов матриц контура адаптации K^X (а) и K^Y (б) в системе управления объектом с параметрами, изменяющимися во времени. Иллюстрируется успешность адаптации, осуществляемой эпизодически (при существенных отклонениях поведения системы от «модельного»)

Выводы и рекомендации по использованию алгоритмов адаптации, сформулированные по результатам моделирования

Проведенные исследования по использованию адаптивной системы позволили сформулировать рекомендации по подбору эталонной модели, по настройке параметров адаптивной системы, а также по восстановлению устойчивой работы с помощью коэффициентов усиления контура адаптации и задающего воздействия.

Литература.

1. Методы классической и современной теории управления. Том 3. Методы современной теории автоматического управления: Учебник для вузов / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – с. 200-316.
2. Рапенко А.В. Компьютерные иллюстрации к разделу «Теория адаптивных систем» учебной дисциплины «Основы теории управления» / Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в образовании, технике и медицине», Волгоград, 24-26.09.2002, часть 1. – Волгоград: Изд-во РПК «Политехник», 2002, с.213-216.