

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЮ И ЕГО АПРОБАЦИЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Тихонов А.В.¹, Зарницын А.Ю.²

¹ *Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, 8Т12, e-mail: avt131@tpu.ru*

² *Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, старший преподаватель, e-mail: ayz10@tpu.ru*

Аннотация

В работе исследуется алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью (ЭМ) для его применения на аэродинамическом стенде физического подобия. Была получена нелинейная математическая модель объекта управления (ОУ), проведена её идентификация, линеаризация, выбор алгоритма проводится по линеаризованной математической модели. Алгоритм апробируется на стенде с использованием среды имитационного моделирования и технологии OPC UA.

Ключевые слова: адаптивная система управления, адаптивный регулятор, эталонная модель, нелинейная модель, линеаризация.

Введение

Исследования по построению адаптивных систем управления начались в начале 50-х годов прошлого столетия в связи с усложнением объектов, управлением совокупностью объектов, высокими требованиями к точности и динамики объектов [1, 3]. В настоящий момент времени в связи с большими возможностями современных вычислительных комплексов методы адаптивного управления находят практическое применение в таких областях, как робототехника, управление самолётами и ракетами, энергетическая система, управление сложными технологическими процессами [1]. В сложных технологических процессах, например, в области нефтехимии, широко используются системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП), иначе advanced process control (APC). Адаптация заключается в том, что многопараметрические регуляторы на уровне СУУТП используют текущую информацию с объекта управления и формируют задающие воздействия для контроллеров АСУ ТП, изменяя алгоритм управления технологическим процессом в оптимальную сторону. Таким образом, исследование и разработка адаптивных систем управления является актуальной задачей. Аэродинамический стенд физического подобия позволит исследовать, апробировать адаптивную систему управления с эталонной моделью на практике для изучения особенностей её реализации.

Алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью

Система управления называется адаптивной, если в ней текущая информация, помимо выработки управляющего воздействия, используется также для изменения алгоритма управления [1]. Эталонная модель (ЭМ) – это динамическая модель системы, обладающая требуемым качеством [1]. В работе используется самонастраивающаяся адаптивная система с ЭМ, так как аэродинамический стенд включает объект с переменным аэродинамическим сопротивлением (далее объект), что является параметрической неопределенностью. ЭМ вырабатывает желаемый выходной сигнал [1]. Разность между выходным сигналом ОУ и ЭМ называется ошибкой слежения. Для существования возможности идеального слежения регулятора основного контура за выходом ЭМ необходимо, чтобы относительный порядок передаточной функции ЭМ был не меньше относительного порядка передаточной функции ОУ [1]. Кроме того, ЭМ выбирается так, чтобы в ней отражались желаемые требования к качеству переходного процесса выходной координаты ОУ [1].

В работе используется адаптивный алгоритм управления с ЭМ по выходу линейного объекта с относительным порядком, превышающим единицу. В источнике [1] утверждается,

что данный вид алгоритма обеспечивает глобальную устойчивость системы и сходимость к нулю ошибки слежения при стремлении времени к бесконечности. При этом передаточные функции (далее ПФ) ОУ и ЭМ имеют один и тот же относительный порядок, который больше единицы. Алгоритм управления принимает вид:

$$u = k^T w, \quad (1)$$

где u – управляющее воздействие, k – вектор варьируемых параметров регулятора, w – вектор сигналов. Алгоритм адаптации принимает вид:

$$\dot{k} = \frac{-\text{sign}(k_0)\gamma\varepsilon\tilde{w}}{1+|\tilde{w}|^2}, \quad (2)$$

$$\dot{\mu} = -\frac{\gamma\varepsilon\eta}{1+|\tilde{w}|^2}, \quad (3)$$

где μ – дополнительный переменный параметр, который вычисляется в процессе адаптации, k_0 – коэффициент усиления ПФ ОУ, γ – произвольная положительная константа, ε – комбинированная ошибка, η – вспомогательная ошибка, $\tilde{w}$ – преобразованный вектор сигналов. Формулы вычисления $\tilde{w}$, η и ε приведены ниже:

$$\tilde{w} = W_M(s)w, \quad (4)$$

$$\eta = k^T \tilde{w} - W_M(s)u, \quad (5)$$

$$\varepsilon = e + \mu\eta, \quad (6)$$

где $W_M(s)$ – ПФ ЭМ, e – ошибка слежения.

Таким образом, для использования данного алгоритма необходимо получить линеаризованные уравнения ОУ и задать ЭМ, по требованиям и условиям, описанным выше. Алгоритм будет решать задачу стабилизации объекта при изменении его аэродинамики на заданной высоте в воздушном потоке.

Получение математической модели ОУ

Аэродинамический стенд включает в себя асинхронный однофазный конденсаторный электродвигатель с вентиляторной нагрузкой, имеющим короткозамкнутый ротор и несимметричный по параметрам. Для описания данного электродвигателя используется математическая модель двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и несимметричного по параметрам, приведенная в источнике [2]. Соотношения, характеризующие несимметричность параметров, были заимствованы из источника [2]. Данная модель переводится во вращающуюся систему координат «d-q» – направление оси «q» выбрано вдоль вектора напряжения статора. Таким образом, при постоянной угловой скорости вращения электродвигателя, токи статора и ротора по осям «d-q» также будут принимать постоянные значения, перестают быть синусоидальными. Это упрощает выбор рабочей точки линеаризации математической модели. Была проведена параметрическая идентификация нелинейной модели с помощью средств среды имитационного моделирования. Таким образом нелинейная математическая модель электродвигателя принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -10.6x_1 + 19.9x_3 - 0.271x_2x_5 - 0.309x_4x_5 + (108 - 2.65x_2 - 2.23x_4)f, \\ \dot{x}_2 = -982x_2 + 838x_4 + 2.46x_1x_5 + 2.81x_3x_5 + (48.9x_1 - 9.44x_3)f, \\ \dot{x}_3 = 9.31x_1 - 156x_3 + 2.12x_2x_5 + 2.42x_4x_5 + (-94.5 - 9.53x_2 - 11.6x_4)f, \\ \dot{x}_4 = 861x_2 - 874x_4 - 2.57x_1x_5 - 2.93x_3x_5 + (-40.3x_1 + 11.2x_3)f, \\ \dot{x}_5 = -0.008x_5^2 + 0.952x_1x_4 - 4.4x_2x_3, \end{cases} \quad (7)$$

где x_1 – проекция тока статора на ось «q», x_2 – проекция тока статора на ось «d», x_3 – проекция тока ротора на ось «q», x_4 – проекция тока ротора на ось «d», x_5 – угловая скорость вращения ротора электродвигателя, f – управляющее воздействие, частота питающего напряжения обмотки статора.

Результат параметрической идентификации модели (7) показан на рис. 1. Сравниваются зависимости угловой скорости ротора от времени идентифицированной модели и реального электродвигателя стенда.

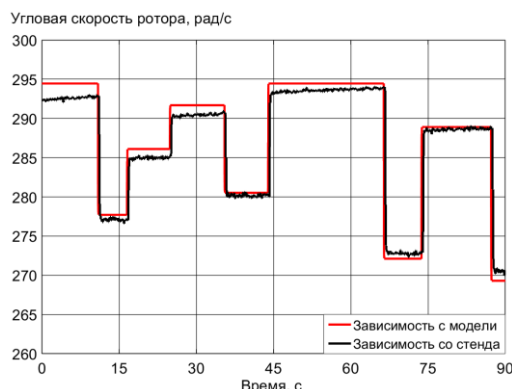


Рис. 1. Результат идентификации нелинейной модели по сравнению с электродвигателем стенда

Для количественной оценки сравнения данных зависимостей, используем интегральный критерий, заключающийся в процентном отличии площадей под данными графиками. В математический пакет были импортированы данные с модели и со стенда с одинаковым числом точек. Площадь вычисляется методом левых прямоугольников с одинаковым шагом. В результате, площадь под графиком модели отличается от площади под графиком с физического стенда на -0.226%, что говорит о высокой точности нелинейной модели. Знак « - » означает, что площадь под графиком модели больше площади под графиком со стенда.

Было получено математическое описание механической части стенда, а именно полёт объекта в вертикальной аэротрубе за счёт потока воздуха от вентилятора электродвигателя.

Математическая модель представлена в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{x}_6 = x_7, \\ \dot{x}_7 = \frac{K_c K}{m} x_5 - \frac{K_c}{m} x_7 - g, \end{cases} \quad (8)$$

где x_6 – текущая высота, на которой находится объект в аэротрубе, x_7 – абсолютная скорость объекта в аэротрубе, m – масса объекта, g – ускорение свободного падения, K – коэффициент пропорциональности между скоростью набегающего потока воздуха и угловой скоростью вращения ротора x_5 электродвигателя, K_c – аэродинамическое сопротивление объекта (параметр, который может изменяться произвольным образом). Параметр K_c будем изменять путём управления объектом с мобильного приложения по Wi-Fi, изменяя его аэродинамику. Так будем задавать параметрическую неопределённость объекта управления.

Была проведена параметрическая идентификация математической модели (8). Масса объекта m была найдена путём взвешивания его на настольных весах, ускорение свободного падения g – известная константа. Параметр K_c был идентифицирован при установке открытого на 15% аэродинамического положения объекта (подробнее об аэродинамических положениях в следующем разделе) путём проведения физического эксперимента. Параметр K был найден при подстановке в систему (8) всех других известных параметров, а также при условии стабилизации объекта в воздушном потоке.

Выбор рабочей точки для ОУ

Поскольку существует два граничных аэродинамических положений объекта (рис. 2), его аэродинамическое сопротивление K_c будет находится внутри отрезка $K_c \in [K_{c_{\min}}; K_{c_{\max}}]$, где $K_{c_{\min}}$ – минимальное аэродинамическое сопротивление, $K_{c_{\max}}$ – максимальное аэродинамическое сопротивление.

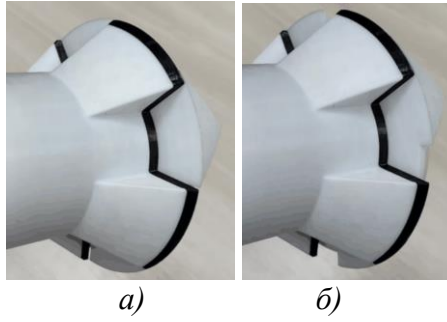


Рис. 2. Граничные аэродинамические положения объекта:
а) – закрытое положение, б) – открытое на 30% положение

При степени открытия больше 30% мощности потока воздуха недостаточно для полёта объекта, поэтому данные положения являются граничными для объекта. Будем использовать рабочую точку на основе среднего значения K_c , которое было найдено при параметрической идентификации. Рабочая точка переменных состояния $x_1 \dots x_7$ принимает вид:

$$X_0 = (x_1^0 \ x_2^0 \ x_3^0 \ x_4^0 \ x_5^0 \ x_6^0 \ x_7^0)^T = (8.4 \ 24.2 \ -6.1 \ 0 \ 284.4 \ 1 \ 0)^T \quad (9)$$

Рабочая точка управляющего воздействия f принимает значение:

$$f_0 = 48.2 \quad (10)$$

Рабочие точки $x_1^0 \dots x_5^0$ были найдены по нелинейной модели электродвигателя, при подаче управляющего воздействия f_0 .

Рабочая точка x_6^0 выбирается произвольной в пределах высоты аэротрубы, поскольку удержание объекта может происходить при различных высотах вне зависимости от других рабочих точек. Таким образом, алгоритм адаптивного управления будет работать в окрестности данной рабочей точки.

Линеаризация и запись уравнений ОУ в отклонениях

Математическая модель электродвигателя (7) была линеаризована с использованием формулы Тейлора:

$$\dot{X} = F(X_0, U_0) + A(X_0)(X - X_0) + B(X_0)(U - U_0), \quad (11)$$

где $F(X_0, U_0)$ – значение уравнений системы в точках X_0 и U_0 ; матрицы $A(X_0)$ и $B(X_0)$ – матрицы Якоби по состоянию и управлению; X – вектор состояния; X_0 – рабочая точка линеаризации; U – вектор управляющих воздействий; U_0 – рабочая точка управляющего воздействия. Для данной системы $U = f$ и $U_0 = f_0$. Причём $F(X_0, U_0) = 0$, так как полагаем, что в рабочей точке система работает в статическом режиме – объект удерживается на произвольной высоте в воздушном потоке.

В результате проведения линеаризации математической модели электродвигателя и записи всех уравнений ОУ в отклонениях от рабочей точки, была получена математическая модель в пространстве состояний. Для того, чтобы перейти от математической модели в пространстве состояний к математической модели в виде ПФ, используется метода Крамера. В результате была получена ПФ ОУ (без явного указания коэффициентов):

$$W_0(s) = k_0 \frac{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^7 + b_6 s^6 + \dots + b_1 s}, \quad (12)$$

где $a_0 \dots a_2$ и $b_1 \dots b_6$ – коэффициенты числителя и знаменателя, которые рассчитываются с помощью метода Крамера. Был определён относительный порядок ПФ ОУ как разность между числом полюсов и нулей ПФ, равный четырём. Применяется соответствующий вид алгоритма адаптивного управления с ЭМ.

Результаты работы

Была разработана адаптивная система управления с ЭМ в среде имитационного моделирования (рис. 3).

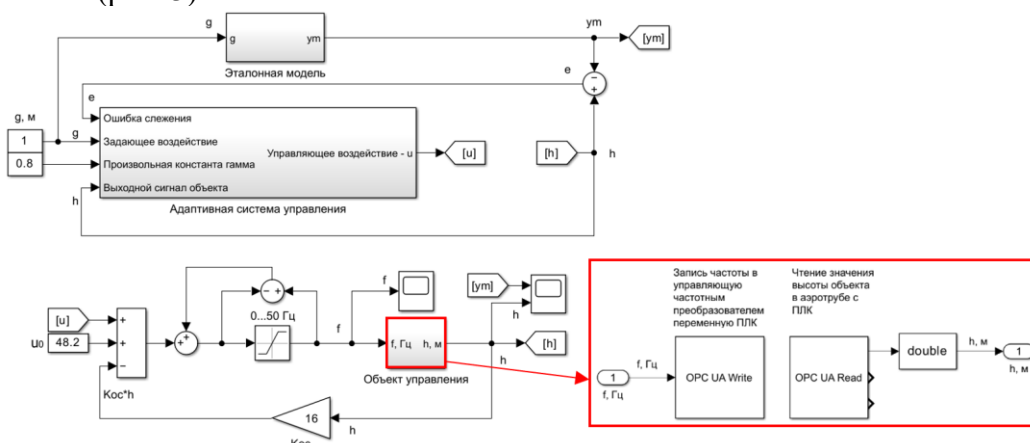


Рис. 3. Адаптивная система управления с эталонной моделью

В разработанной системе управления применяется метод борьбы с возможным насыщением алгоритма управления «back calculation». Так как алгоритмы адаптивного управления синтезируются на основе уравнений в отклонениях [1], то к управляющему воздействию алгоритма прибавляется величин f_0 . Поскольку ОУ содержит интегрирующее звено, выходная переменная не будет приходить к установившемуся значению. Так как ЭМ задана как передаточная функция с самовыравниванием, необходимо, чтобы ОУ так же обладал данным свойством. Поэтому ОУ был охвачен обратной связью. Относительный порядок ОУ при этом не изменяется, но теперь он способен к самовыравниванию. При этом в системе управления есть два настраиваемых параметра: K_{oc} – коэффициент введённой обратной связи и постоянная γ . При этом выяснено экспериментально, что чем больше K_{oc} , тем меньше перерегулирование, но время переходного процесса увеличивается. Чем больше γ , тем быстрее протекает процесс адаптации, косвенно уменьшается время переходного процесса. Однако при увеличении γ управляющее воздействие становится колебательным, и система может стать неустойчивой [1]. Обмен данными между клиентом среды имитационного моделирования и аэродинамическим стендом происходит с помощью технологии OPC UA. При этом, в среде имитационного моделирования используется библиотека, предоставляющая ядро реального времени для тестирования систем управления, не требуя специального оборудования, работающего с операционными системами реального времени, таких как программируемые логические контроллеры. Результат работы адаптивной системы управления показан на рис. 4.

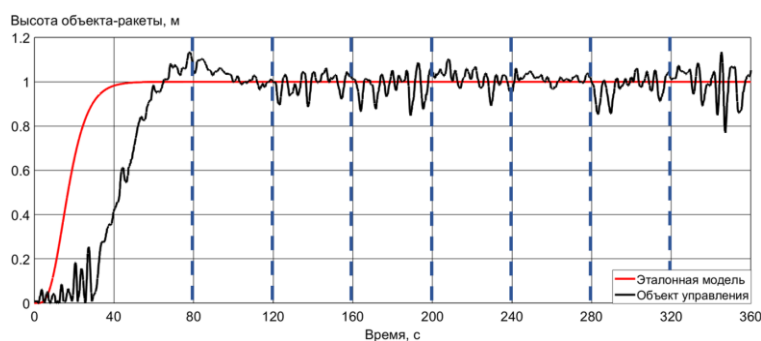


Рис. 4. Кривая переходного процесса объекта при варьировании его параметра по сравнению выходом эталонной модели

Апробирование алгоритма адаптивного управления проводилось при $K_{oc} = 16$ и $\gamma = 0.8$. Данные значения были подобраны экспериментально, соблюдая баланс между перерегулированием и временем переходного процесса. При снятии переходного процесса на рис. 4 параметр K_c варьировали через заданные промежутки времени ΔT путём изменения аэродинамических положений объекта согласно таблице 1.

Таблица 1. Изменение аэродинамических положений объекта через промежутки времени ΔT

ΔT , с	0-80	80-120	120-160	160-200	200-240	240-280	280-320	320-360
Степень открытия положений, %	30	0	15	30	15	0	30	Хаотично 0-30

Таким образом, алгоритм адаптивного управления с ЭМ был апробирован на аэродинамическом стенде. Система управления лучше стабилизирует объект при его закрытом положении. При этом система управления остаётся устойчивой на протяжении всего времени апробации.

Заключение

Таким образом, предложенные подходы исследования и апробации адаптивного алгоритма управления с эталонной моделью могут облегчить синтез адаптивной системы управления для других физических систем или технологических процессов с параметрической неопределенностью. При этом важно учитывать физические ограничения каждого отдельного объекта управления. Прежде чем применять адаптивные системы управления на производстве, необходимо проводить их математическое моделирование, для того чтобы пронаблюдать за поведением системы при различных условиях; предсказать, как поведёт себя реальная система при натурных испытаниях; исследовать систему безопасно для окружающего мира и использовать меньшее количество материальных затрат [4].

Целью дальнейшего исследования данной работы может стать разработка системы подстройки параметров адаптивного регулятора, таких как γ и K_{oc} в данной работе, в процессе функционирования системы. Данная идея уже используется для настройки параметров типовых регуляторов различными методами, например в работах [5, 6].

Список использованных источников

1. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы : Учеб. Пособие. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2004. – 464 с.
2. Krause P. C. et al. Analysis of electric machinery and drive systems. – New York : IEEE press, 2002. – Т. 2. – 688 p.
3. Воронин А.В. Адаптивные системы управления : Учеб. Пособие. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 138 с.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – Лаб. базовых знаний, 2004. – 832 с.
5. Кудинов Ю. И. и др. Построение и настройка нечеткого адаптивного ПИД-регулятора // Информатика и системы управления. – 2016. – №. 3. – С. 86-96.
6. Яковис Л. М., Смирнова Н. А., Шагниева О. Б. Адаптивная настройка типовых регуляторов с применением настраиваемой модели // IV Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2021). Сборник докладов. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. – С. 324-327.