

На правах рукописи

ХАММУД Абдулла

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПОДХОДОВ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

A. Hammed

Москва

2004

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана.

У1661292

Науч	Хаммуд А.	ических наук,
	Использование	ифеев В.В.
	нейросетевых подходов в	
	адаптивных системах	
Офи	управления летательными...	ических наук,
2004	0-00	едведев В.С.
		ических наук,
		сотрудник Дегтярев О.В.
Вед		й институт эли
		оения
Заш		ля 2004г. в 14 ³⁰ на
		сударстве
		05005, М

У1661292

Б-ка МГТУ им. Н.Э. Баумана



1661292

Хаммуд А. Использование

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

тью, просьба высы-

Московского госу-
я.

Иванов В.А.

502

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В шестидесятых годах прошлого века появились системы активной адаптации. В последнем десятилетии двадцатого века получили развитие системы искусственного интеллекта, в том числе с использованием нейронных сетей, обладающих адаптивными свойствами.

С целью улучшения характеристик существующих систем управления летательными аппаратами (ЛА) в настоящее время во многих странах мира наметилась тенденция модернизации автопилотов для находящихся на вооружении и серийно выпускаемых ЛА, что позволяет уменьшить военный бюджет государства и сократить сроки создания современного оружия. Использование принципов адаптации даёт возможность наиболее просто решить проблемы, связанные с модернизацией систем управления ЛА. Самое важное преимущество модернизированных систем заключается в том, что они формируются на базе сложившихся систем с сохранением базовой структуры системы управления полётом ЛА.

Цель диссертационной работы заключается в формировании и исследовании адаптивной системы с моделью применительно к системе стабилизации ЛА с использованием нейронных сетей. В соответствии с поставленной целью, основными задачами работы являются:

- разработка алгоритмов идентификации динамических параметров ЛА в полёте;
- анализ необходимости применения для всех режимов полёта ЛА адаптивной модели системы управления полётом ЛА и разработка алгоритма, обеспечивающего адаптацию параметров модели на основе процесса идентификации параметров ЛА;
- обеспечение адаптации системы стабилизации ЛА к изменению её параметров в полёте путём формирования сигнальной коррекции с помощью нейронной сети.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории нелинейных систем управления, адаптивных систем управления, систем стабилизации летательных аппаратов, и нейросетевых систем управления. При моделировании применялись пакеты прикладных программ Matlab и Simulink.

Научная новизна. На основе анализа, систематизации и обобщения научных достижений в таких областях, как теория нелинейного управления и теория адаптивных систем, нейроконтроллеры с учётом, предъявляемых к современным летательным аппаратам технических требований, сформирован подход к решению задач модернизации систем стабилизации ЛА как активных адаптивных систем. Для этого потребовалось решить такие проблемы как идентификация динамики ЛА в реальном масштабе времени с использованием нейронных сетей, создание адаптивной модели базовой системы стабилизации ЛА и разработка методики синтеза сигнальной коррекции с помощью нейронной сети.

Р. 111
111
111

Практическая ценность. Разработанные методы и алгоритмы позволяют оценивать динамические параметры ЛА, адаптировать модель базовой системы управления в зависимости от режима полёта ЛА и компенсировать неопределенности и нелинейности системы управления, которые невозможно учитывать в процессе её проектирования.

Внедрение результатов работы. Полученные в диссертации результаты предназначены для использования при разработке новых и модернизации систем управления ЛА различных классов.

Основные положения и результаты работы заслушивались и обсуждались на научно-технических семинарах и заседаниях кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения. Она изложена на 132 машинописных листах. Содержит 12 таблицы и 74 рисунков. Список литературы включает 107 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая ценность исследований, представлены основные научные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

В первой главе рассматриваются принципы построения адаптивных систем ЛА. Показаны недостатки и преимущества адаптивных систем. Приведены схем пассивной адаптации и активной адаптации, дается краткий обзор систем управления полётом ЛА, разработанных на принципах адаптации. Анализ преимуществ и недостатков этих принципов, показал целесообразно формирование систем стабилизации ЛА как адаптивной системы с нестационарной эталонной моделью.

Во второй главе рассмотренные современные методы разработки систем управления полётом ЛА, анализируются принципы проектирования нелинейных систем управления полётом с использованием многослойных нейронных сетей (МНС) (рис. 1). В таких системах МНС играет роль адаптивного элемента для компенсации ошибки в реальном масштабе времени. В качестве эффективного средства для решения неопределенностей, возникающих при управлении высокоманевренными ЛА, успешно может быть использован нейроконтроллер.

Третья глава посвящена рассмотрению различных методов проектирования адаптивных систем: на основе функции Ляпунова, использования алгоритма скоростного градиента, алгоритмов робастного управления и другие. Также показаны адаптивные и аппроксимирующие свойства нейронных сетей при применении их в системах управления, приведены алгоритмы обучения нейронных сетей в системах управления, функционирующих в реальном

масштабе времени. Показана возможность использования нейронных сетей в процессе идентификации объекта.

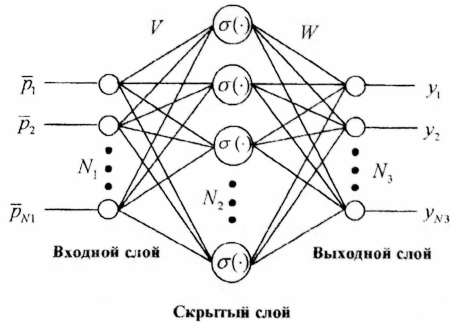


Рис. 1. многослойная нейронная сеть

Постановка задачи синтеза адаптивных систем управления

При синтезе алгоритмов адаптации удобно использовать понятие «*обобщенного настраиваемого объекта (ОНО)*» (рис.2), структура которого включает в себя неизменяемую часть системы (обобщенный объект и регулятор основного контура). Обобщенный объект управления включает объект управления (ОУ), исполнительные, измерительные, корректирующие устройства, настраиваемую модель системы и другие элементы системы.

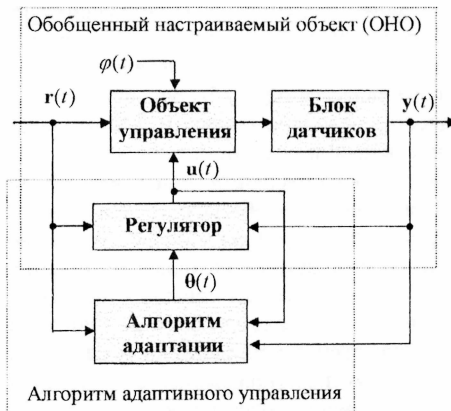


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления

Исходными данными для синтеза алгоритма адаптации являются уравнение ОНО и цель управления. ОНО задан уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{r}, \varphi, t, \xi), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = G(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{r}, \varphi, t, \xi), \quad (2)$$

где $\mathbf{x} \in R^n, \mathbf{u} \in R^m, \mathbf{r} \in R^r, \mathbf{y} \in R^l$ – векторы состояния, управления, внешних входов и выходов ОНО соответственно; $F(\cdot), G(\cdot)$ – известные вектор-функции; φ – возмущение на объект управления; ξ – вектор неизвестных параметров, который обычно состоит из коэффициентов уравнений, составляющих математическое описание объекта, а также из коэффициентов, определяющих изменение внешних воздействий. Вектор ξ , чаще всего, считается квазистационарным.

В простейшем случае цель управления (ЦУ) задается в виде целевого неравенства:

$$q \leq \Delta \text{ при } t \geq t_*, \Delta \geq 0, \quad (3)$$

где $q(t) = q(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$ – целевая функция.

В задачах слежения в качестве целевой функции выбирается функция невязки между действительной и желаемой траекторией движения объекта $q = q(t, t)$, $E(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_*(t)$. Желаемое поведение системы задается с помощью эталонной модели:

$$\dot{\mathbf{x}}_* = F_*(\mathbf{x}_*, \mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где $\mathbf{x}_* \in R^n$ – вектор состояния эталонной модели.

Задача синтеза адаптивной системы управления состоит в нахождении алгоритма управления из заданного класса двухуровневых алгоритмов вида:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_t(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{r}(t)), \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}_t(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{r}(t)), \quad (6)$$

обеспечивающих достижение ЦУ (3) в системе (1), (2), (5), (6) для каждого ξ . Здесь $\boldsymbol{\theta}_t(\cdot), \mathbf{u}_t(\cdot)$ – некоторые операторы; $\boldsymbol{\theta}$ – вектор параметров регулятора.

Для решения поставленной задачи рассмотрены различные методы исследования систем управления и алгоритмы адаптации.

Метод Ляпунова является одним из основных методов исследования устойчивости и качества нелинейных систем. Метод нашёл глубокое и эффективное приложение к проблеме синтеза адаптивных систем управления.

Алгоритмы скоростного градиента (АСГ) являются непрерывными аналогами градиентных алгоритмов и обеспечивают изменение настраиваемых переменных пропорционально градиенту скорости изменения целевого функционала. В зависимости от задания исходной математической модели объекта АСГ могут применяться как для синтеза основного контура адаптивной системы управления, так и для синтеза контура адаптации.

В системах с параметрической адаптацией цель управления достигается за счёт изменения параметров управляющего устройства. Такие системы более универсальны, но имеют более сложную структуру. Сложность таких систем увеличивается с увеличением числа настраиваемых параметров.

Сигнально-параметрические АСГ с эталонной моделью обладают высоким быстродействием, простотой реализацией и сохраняют свою работоспособность в условиях параметрических и координатных возмущений, изменяющихся быстро и в достаточно широких пределах. Наличие сигнальной составляющей позволяет уменьшить число настраиваемых параметров.

Алгоритм сигнальной адаптации обеспечивает в системе высокое быстроедействие.

В случае, когда доступной для прямых измерений является только регулируемая переменная y , а не весь вектор состояния x , т.е. когда модель неопределенного объекта имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u, & \text{или} & & \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x), & & & y &= h(x), \end{aligned}$$

где $h(x)$ – гладкая функция, $h(0) = 0, x \in R^n$. В этом случае говорят об управлении по выходной переменной.

Современное решение задачи управления такими системами с высшими неопределенностями связано с использованием нейронных сетей и эталонной модели.

Идентификация на основе нейронных сетей

В процессе идентификации системы или объекта управления нейронная сеть (НС) имеет возможность быть альтернативой математической моделью системы (объекта).

Модели идентификации объектов управления на основе нейронной сети

Предлагается четыре модели идентификации объектов управления с одним входом и одним выходом, которые можно обобщить на многомерные объекты.

При идентификации объекта управления целесообразно пользоваться две схемы:

1- параллельная схема (рис.3), в которой нейросетевой идентификатор имеет обратную связь по выходу с применением линии задержки (ЛЗ).

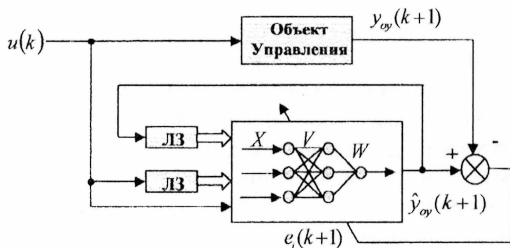


Рис.3. Параллельная схема модели идентификации

Модель идентификации описывается следующим уравнением:

$$\hat{y}_{оп}(k+1) = N[\hat{y}_{оп}(k), \hat{y}_{оп}(k-1), \dots, \hat{y}_{оп}(k-n+1); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)], \quad (7)$$

где N – передаточная функция НС. Эта схема используется чаще всего при идентификации динамических объектов офф-лайн и используется в системах с высоким уровнем шумов.

2- последовательно-параллельная схема (рис.4), в которой нейросетевой идентификатор не имеет обратной связи. Модель идентификации описывается следующим уравнением:

$$\hat{y}_{оп}(k+1) = N[y_{оп}(k), y_{оп}(k-1), \dots, y_{оп}(k-n+1); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m+1)]. \quad (8)$$

Схема (4) имеет ряд достоинств. Предполагается, что объект управления устойчив, поступающие на вход нейросетевого идентификатора сигналы являются ограниченными. Отсутствие обратной связи в идентификаторе позволяет использовать статические алгоритмы обучения.

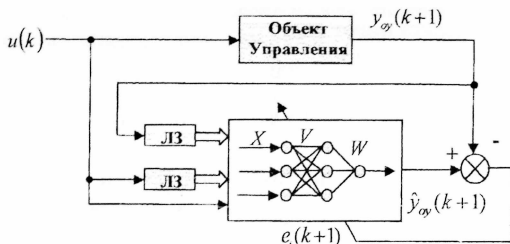


Рис.4. Последовательно-параллельная схема модели идентификации
Для решения поставленной задачи выбраны следующие методы и алгоритмы:

1. структура адаптивной системы с эталонной моделью;
2. метод адаптации по выходу системы и принцип сигнальной адаптации;
3. Функция Ляпунова необходима для исследования устойчивости процесса адаптации;
4. трехслойная нелинейная нейронная сеть прямого действия для реализации адаптации в реальном масштабе времени;
5. однослойная сеть с линейными функциями активации для идентификации параметров ЛА;
6. в алгоритмах обучения нейронных сетей используется градиентный алгоритм.

Четвертая глава посвящена формированию адаптивной системы управления полётом ЛА. Рассмотрены особенности динамики ЛА, описана структура базовой системы управления полётом ЛА, разработаны алгоритмы решения поставленной задачи при модернизации системы управления конкретного ЛА. Разработана и исследована простейшая структура нейроидентификатора параметров ЛА, разработаны и исследованы алгоритмы адаптивной эталонной модели системы, проведен синтез нейронной сети для компенсации неопределенностей и нелинейностей в системе управления ЛА.

Предлагаемая структура системы управления ЛА

При модернизации системы управления полётом (СУП) ЛА предлагается адаптивная система, использующая адаптивные нейросетевые подходы. В систему входят:

- нейронная сеть 1 для выполнения процесса идентификации параметров ЛА в полёте;
- адаптивная эталонная модель (АЭМ) системы с желаемыми характеристиками СУП ЛА для всех режимов полёта ЛА;
- блок логики и вычисления (БЛВ), включающий алгоритмы настройки параметров АЭМ на основе результата идентификации параметров ЛА;

- блок адаптации, включающий многослойную нейронную сеть (МНС) и компенсатор. При полёте ЛА блок адаптации формирует сигнал коррекции.

Предлагаемая адаптивная система управления полётом ЛА имеет структуру, представленную на рис. 5.

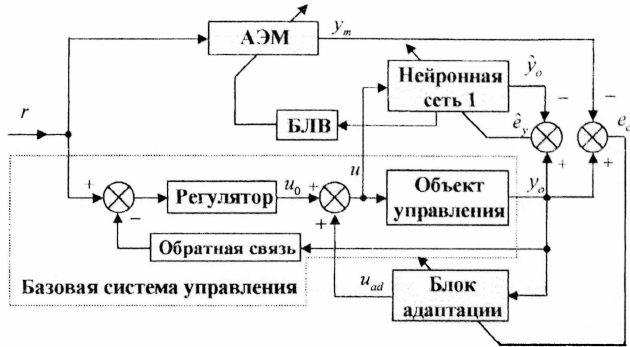


Рис. 5. Адаптивная система управления с АЭМ

Предлагаемая адаптивная система управления обладает следующими преимуществами:

- сохраняет существующую архитектуру базовой системы управления;
- имеет достаточно простую техническую реализацию;
- может использоваться в существующих и в перспективных системах управления полётом ЛА.

Модель ЛА

В качестве объекта управления выбрана модель продольного движения ракеты класса «воздух-воздух». Продольное движение ЛА описываются уравнениями:

$$\dot{\alpha}(t) = K_a M(t) C_n[\alpha(t), \delta_a(t), M(t)] \cos(\alpha(t)) + \omega_z(t) \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_z(t) = K_{\omega_z} M^2(t) C_m[\alpha(t), \delta(t), M(t)], \quad (10)$$

где C_n, C_m – аэродинамические коэффициенты подъемной силы и момента тангажа соответственно.

$$C_n[\alpha, \delta, M] = \text{sign}(\alpha)[a_n |\alpha|^3 + b_n |\alpha|^2 + c_n (2 - M/3) |\alpha|] + d_n \delta \quad (11)$$

$$C_m[\alpha, \delta, M] = \text{sign}(\alpha)[a_m |\alpha|^3 + b_m |\alpha|^2 + c_m (-7 + 8M/3) |\alpha|] + d_m \delta. \quad (12)$$

Динамика исполнительного рулевого привода описывается следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta(t) \\ \dot{\delta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{pm}^2 & -2\zeta_{pm}\omega_{pm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(t) \\ \dot{\delta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{pm}^2 \end{bmatrix} \delta_c(t). \quad (13)$$

Выходной переменной ЛА является нормальное ускорение:

$$n_y(t) = K_n M^2(t) C_n[\alpha(t), \delta(t), M(t)] \quad (14)$$

В (9)–(14) приняты следующие обозначения:

$\alpha(t)$ - угол атаки; $\omega_r(t)$ - угловая скорость вращения ЛА относительно оси oz ; $M(t)$ - число Маха; $\delta_c(t)$ - управляющая команда на отклонение руля высоты; $\delta(t)$ - угол отклонения руля высоты; $n_y(t)$ - нормальное ускорение ЛА; ω_{pm} - собственная частота рулевого привода; ζ_{pm} - коэффициент демпфирования рулевого привода.

Значения коэффициентов в уравнениях (9)-(14) и другие необходимые данные приведены в диссертации.

Далее подробно исследуются подсистемы в структуре адаптивной СУП ЛА (рис.5).

Идентификация параметров ЛА

С целью идентификации параметров СУП ЛА наиболее целесообразно использовать нейронной сети в виде нейроидентификатора (НИ) (рис. 6). В качестве модели нейронной сети использована архитектура однослойной статической нейросети, состоящей из четырёх нейронов с линейными функциями активации.

Работа НИ происходит в два этапа. На этапе обучения (офф-лайн) в процессе настройки весовых коэффициентов НИ формирует оптимальную аппроксимацию для заданных обучающих данных по минимуму критерия обучения. На этапе идентификации (он-лайн) обучающий НИ адаптируется на каждом шаге времени к изменению динамики объекта управления.

Нейроидентификатор имеет структуру, представленную на рис. 6.

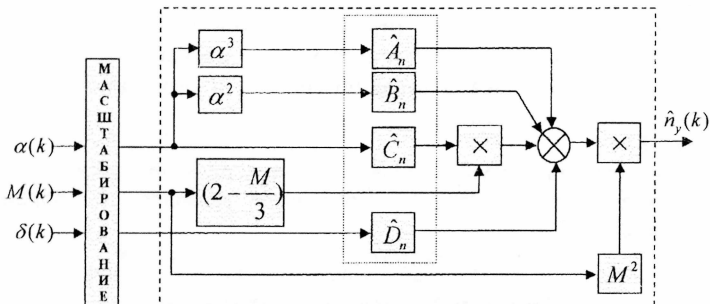


Рис. 6. Нейроидентификатор

После обучения нейроидентификатора с оператором N_{id} реализует уравнение (14), которое можно переписать в виде:

$$\hat{n}_y(k) = M^2(k)N_{id}[\alpha(k), M(k), \delta(k)] \quad (15)$$

С учётом (11) нормальная перегрузка ЛА в дискретном виде описывается следующим уравнением:

$$n_y(k) = M^2(k)[\text{sign}(\alpha)[A_n|\alpha(k)|^3 + B_n|\alpha(k)|^2 + C_n(2 - M(k)/3)|\alpha(k)| + D_n\delta(k)], \quad (16)$$

где $A_n = K_n a_n$, $B_n = K_n b_n$, $C_n = K_n c_n$, $D_n = K_n d_n$ - динамические коэффициенты ЛА, значения которых являются весовыми коэффициентами нейронной сети.

Адаптивная эталонная модель системы

Динамические особенности ЛА не позволяют использовать стационарную эталонную модель базовой системы управления при широком разбросе параметров ЛА на различных режимах полёта. Поэтому выбор подходящей эталонной модели системы весьма критичен.

В системах управления современными ЛА модель системы должна быть, в первую очередь, устойчивой и удовлетворять качественно-техническим требованиям к СУП.

Для описания реакции системы управления ЛА в переходном процессе можно пользоваться полином второго порядка вида:

$$G(s) = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2} \quad (17)$$

При формировании адаптивной эталонной модели в СУП ЛА необходимо иметь блок логики и вычисления (рис. 7).

Входными параметрами блока являются:

1- максимальные динамические параметры СУП ЛА:

$\sigma_{\text{дон max}}$ – допустимое перерегулирование; $\omega_{\text{max}}, \omega_{\text{min}}$ – допустимые значения собственной частоты;

2- ограничения:

α_{max} – максимально допустимый угол атаки; δ_{max} – максимальный угол отклонения руля; $n_{y, \text{дон}}$ – максимальная допустимая перегрузка.

3- измеряемые параметры:

$\alpha(k)$ – текущий угол атаки; $M(k)$ – текущее число Маха;

4- идентифицируемые параметры:

параметры динамической модели ЛА – результат процесса идентификации модели ЛА.

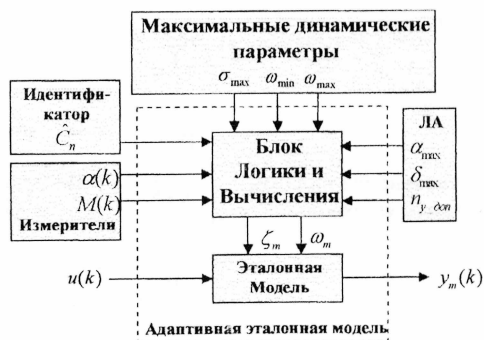


Рис. 7. Адаптивная эталонная модель системы

Процедура вычисления параметров адаптивной модели в блоке логики и вычисления на каждом шаге времени (k) происходит следующим образом:

1- расчёт располагаемой перегрузки в момент (k) по формуле:

$$n_{y_pac}(k) = M^2(k)[\text{sign}(\alpha)[\hat{A}_n|\alpha(k)|^3 + \hat{B}_n|\alpha(k)|^2 + \hat{C}_n(2 - M(k)/3)|\alpha(k)|] + \hat{D}_n\delta] \quad (18)$$

2- исходя из значения $n_{y_pac}(k)$, вычисление динамического отклонения:

$$\Delta n_y(k) = n_{y_don} - n_{y_pac}(k), \quad (19)$$

3- вычисление коэффициента демпфирования $\zeta_m(k)$ по формуле:

$$\zeta_m(k) = \left| \frac{\ln(\sigma_{n_y}(k))}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\sigma_{n_y}(k))}} \right|, \quad (20)$$

4- получениис собственной частоты $\omega_m(k)$ по алгоритму :

$$\omega_m(\hat{C}_n) = \begin{cases} \frac{|\hat{C}_n| - 5.66}{\text{tg}(56^\circ)} + 5.36 + \Delta\omega & H = 1000 - 8500_M \\ 13.6 + \Delta\omega & \text{при } H < 1000_M \\ 5.36 + \Delta\omega & H > 8500_M \end{cases} \quad (21)$$

где H – высота полёта ЛА.

Сигнальная коррекция

Система управления полётом ЛА с введением сигнальной коррекции показана на схеме (рис. 8). В систему входят: базовая система управления полётом (БСУП) ЛА, адаптивная эталонная модель (АЭМ) базовой системы и блок адаптации (БА).

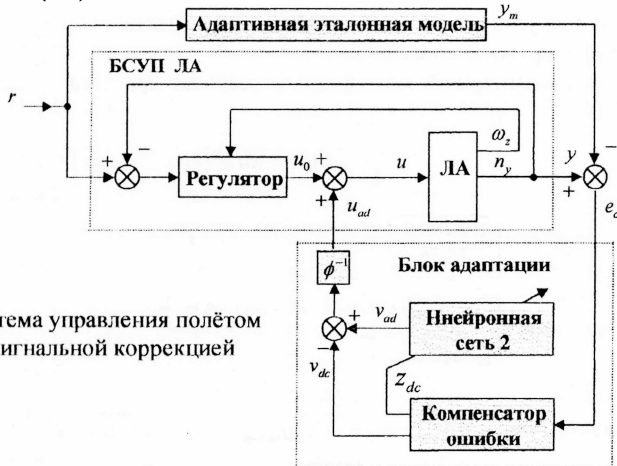


Рис. 8. Система управления полётом ЛА с сигнальной коррекцией

Из уравнений (9 - 14) видно: если $M(t)$ квазистационарная переменная, то математическое описание модели ЛА является аффинной системой по входу, описываемой следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= f(\mathbf{x}) + D\mathbf{u} \\ y &= h(\mathbf{x}) + d\mathbf{u} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где $\mathbf{x} \in R^n, \mathbf{u}, y \in R$ – переменные состояния, входа и выхода системы соответственно. Математическое описание эталонной модели системы стабилизации ЛА с одним входом (командный сигнал) и одним выходом (нормальная перегрузка) описывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_m(t) &= A_m \mathbf{x}_m(t) + B_m r(t) \\ y_m(t) &= C_m \mathbf{x}_m(t) \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где $\mathbf{x}_m$ – вектор состояния эталонной модели, y_m – выходная координата эталонной модели. A_m, B_m, C_m – Матрицы коэффициентов.

Динамика ошибки e_c

Сигнал ошибки e_c является разницей между реакциями базовой СУП (22) и эталонной модели (23) на один и тот же входной сигнал $r(t)$.

При применении сигнальной коррекции в систему управления вводится дополнительный сигнал коррекции $u_{ad}(t)$, который суммируется с сигналом регулятора $u_0(t)$. В результате на вход ЛА поступает сигнал $u(t) = u_0(t) + u_{ad}(t)$. Динамика ошибки в результате исследований записывается в следующем виде:

$$\dot{e}_c = -v_{dc} + v_{ad} - \Delta(\mathbf{x}_m, \mathbf{x}, r). \quad (24)$$

Составляющая v_{ad} в уравнении (24) используется для уменьшения ошибки $\Delta(\cdot, \cdot, \cdot)$, составляющая v_{dc} обеспечивает стабилизацию динамики ошибки по схеме с компенсатором, представленной на рис. 9.

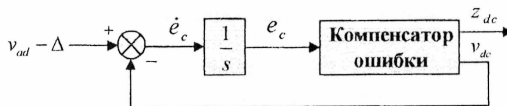


Рис. 9. Модель ошибки

Компенсатор ошибки формирует два сигнала v_{dc}, z_{dc} , описываемые следующими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} v_{dc}(s) \\ z_{ad}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{D_{dc}(s)} \begin{bmatrix} N_{dc}(s) \\ N_{ad}(s) \end{bmatrix} e_c(s), \quad (25)$$

$$\begin{aligned} z_{dc}(s) &= \frac{N_{ad}(s)}{sD_{dc}(s) + N_{dc}(s)} (v_{ad} - \Delta) \\ &\equiv G(s)(v_{ad} - \Delta) \end{aligned} \quad (26)$$

Чтобы алгоритм адаптации (29) был реализуемым и зависимым только от доступных сигналов, передаточная функция компенсатора ошибки $G(s)$ должна быть строго положительной действительной. В частном случае, ко-

гда в системе управления (22) относительная степень $\chi \leq 1$; $N_{ad}(s)$ определяет состояние при котором $G(s)$ строго положительно действительна.

Нейронная сеть (НС2)

Нейронная сеть 2 (рис.8) работает в реальном масштабе времени и не требует обучения офф-лайн. Для формирования НС2 используется многослойная нейронная сеть (МНС) с одним скрытым слоем и сигмоидными функциями активации (рис.1). Выходом НС2 является сигнал коррекции v_{ad} , который описывается уравнением:

$$v_{ad} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \eta), \quad (27)$$

где $\hat{W}$ – весовые коэффициенты связи между элементами скрытого и выходного слоев, $\sigma(\cdot)$ – сигмоидная функция активации $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, a – потенциал активации, $\hat{V}$ – весовые коэффициенты связи между элементами входного и скрытого слоев, η – входной вектор МНС, принимающий вид:

$$\eta = [1 \ \alpha(k) \ M(k) \ y_m(k) \ y(k) \ y(k-1) \ u(k)]^T, \quad (28)$$

в котором значение 1 соответствует ненулевому порогу, α – угол атаки, M – число Маха, y_m – выходной сигнал адаптивной эталонной модели, y – выходной сигнал системы управления (рис.8), u – управляющий сигнал объекта управления.

Алгоритм адаптации и выходной параметр МНС описывается следующими уравнениями:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{V}} \\ \dot{\hat{W}} \\ v_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Gamma_v [\eta(z_{dc} \hat{W}^T \hat{\sigma}') + \lambda \hat{V}] \\ -\Gamma_w [(\hat{\sigma} - \hat{\sigma}' \hat{N}^T \eta) z_{dc} + \lambda \hat{W}] \\ \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T \eta) \end{bmatrix}, \quad (29)$$

где $\sigma'(\hat{z}) = \frac{d\sigma(z)}{dz} \Big|_{z=\hat{z}}$ – якобиан σ , z_{dc} – сигнал ошибки, λ – е-модификация, обеспечивающая дополнительное демпфирование при обучении НС2, Γ_v – параметр скорости обучения коэффициентов V скрытого слоя, Γ_w – параметр скорости обучения коэффициентов W выходного слоя.

Адаптация по выходной координате на основе формирования сигнальной коррекции с использованием нейронных сетей эффективна особенно в условиях неопределённости ошибки и широкого диапазона работы системы управления. Адаптация по выходной координате не требует знания порядка базовой системы управления, а требуется знание только её относительного порядка.

Пятая глава посвящена исследованию путём моделирования предлагаемой адаптивной системы управления полётом ЛА с адаптивной эталонной моделью и сигнальной коррекцией.

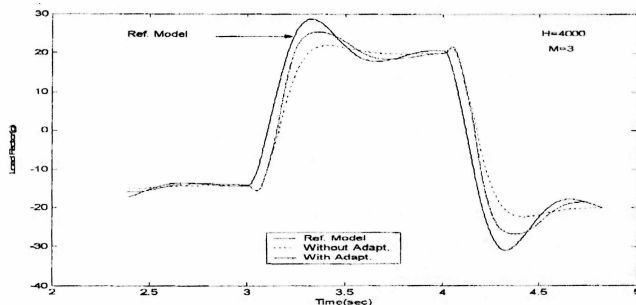
Моделирование проводилось в три этапа. На первом этапе в процессе подготовки моделирования были разработаны несколько программ с исполь-

The diagram illustrates the control system for the 'АЭМ' (Automatic Emergency Mode) of the 'АВТОПИЛОТ' (Autopilot). The system is composed of several interconnected blocks:

- Reference Input:** A signal $n(t)$ enters the system from the left.
- Autopilot (АВТОПИЛОТ):** This block contains sub-blocks Az_com , Az_m , and Fm . It receives $n(t)$ and outputs a signal to the feedback loop.
- Feedback Loop (БСК):** This block receives the output signal and provides feedback to the autopilot. It also receives signals from the plant (ЛИА) and the reference model (РВ).
- Reference Model (РВ):** This block contains a transfer function $\frac{wn_fin^2(s)}{den(s)}$. It receives the reference input $n(t)$ and outputs a signal to the feedback loop.
- Control Law (БЛВ):** This block receives the output signal and provides a control signal to the plant (ЛИА).
- Plant (ЛИА):** This block contains a transfer function $\frac{q}{s^2 + LF + V}$. It receives the control signal and outputs the system output $n_y(t)$.
- Intermediate Blocks:** There are several intermediate blocks labeled 'Alpha Delta M' and 'Id-LF' that receive signals from the autopilot and the control law, and provide feedback to the feedback loop.
- Outputs:** The system has three main outputs: $e_y(t)$ (output error), $e_c(t)$ (control error), and $n_y(t)$ (system output).

На втором этапе система исследовалась по блокам.

1. режим (1) $\{M=3, H=4000\text{ м}\}$. На рис.11 показаны сигналы на выходах АЭМ и системы, при работе системы без адаптации (пунктирная линия) и с адаптацией (непрерывная линия). Видно, что применение АЭМ с адаптацией в СУП ЛА увеличивает маневренное свойство ЛА.



2. режим (2) $\{M=3, H=10000 \text{ м}\}$. На рис.12 показаны сигналы на выходах АЭМ и системы, при работе системы без адаптации (пунктирная линия) и с адаптацией (непрерывная линия). Видно, что применение АЭМ с адаптацией в СУП ЛА расширяет область их полёта.

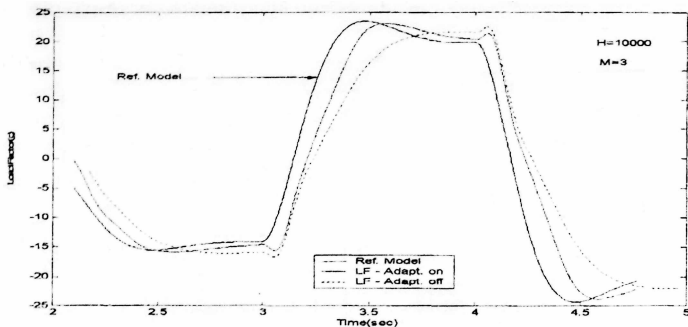


Рис. 12. Режим (2)

- на рис.13 показаны сигналы на выходе системы y , (непрерывная линия), нейронидентификатора $\hat{y}$, (пунктирная линия) и сигнал ошибки между ними;

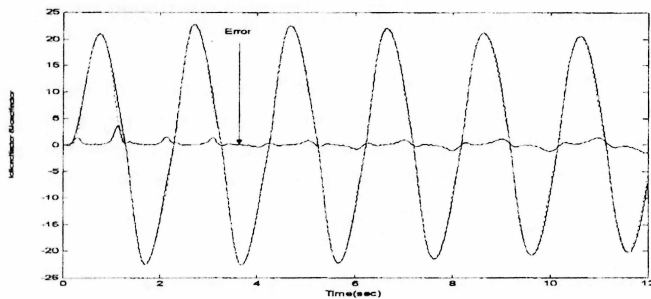


Рис. 13. Сигналы на выходе системы и идентификатора, и ошибки

На третьем этапе исследовалась работоспособность всей адаптивной системы.

При подаче на вход системы командного сигнала (непрерывная линия), а на второй секунде изменение высоты полёта (пунктирная линия) (рис.14), получены следующие результаты:

- на рис.15 показаны сигналы на выходе системы y , (непрерывная линия) и нейронидентификатора $\hat{y}$, (пунктирная линия);

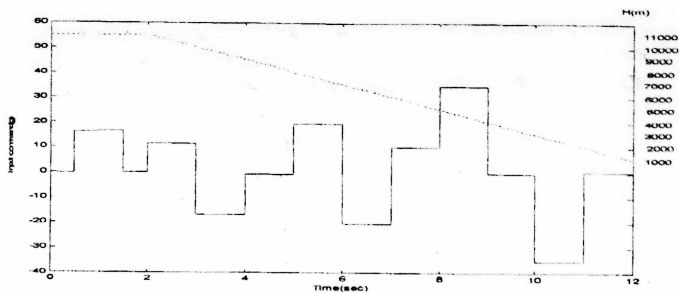


Рис. 14. Командный сигнал и сигнал высоты

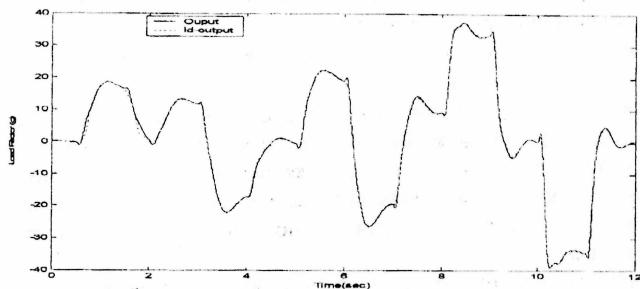


Рис. 15. Сигналы n_y и $\hat{n}_y$

2. на рис. 16 показаны сигналы на выходе АЭМ n_y (непрерывная линия) и системы (пунктирная линия).

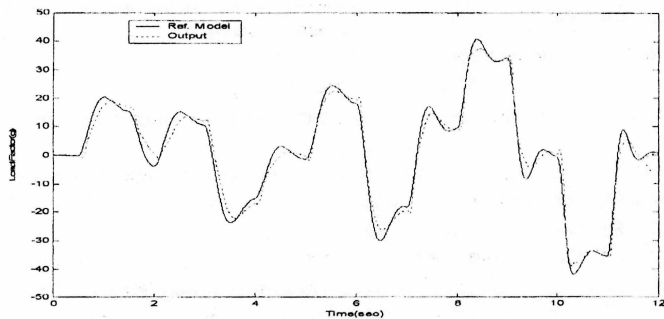


Рис. 16. Сигналы на выходе АЭМ и системы

Из рисунков, видно, что при изменении высоты полёта ЛА НИ, контур АЭМ и БСК выполняют свои функции в реальном масштабе времени.

Основные результаты диссертационной работы

1. Проведен анализ характерных особенностей и принципов построения традиционных адаптивных систем автоматического управления и обоснованы преимущества применения адаптивных свойств нейронных сетей для создания адаптивных систем управления;
2. Предложена новая архитектура адаптивной системы управления полётом летательного аппарата, сочетающая нейроидентификатор параметров системы управления, адаптивную эталонную модель и принцип сигнальной коррекции на основе нейронных сетей;
3. Разработан программный комплекс для исследования адаптивной системы управления полётом летательного аппарата на базе ППП Matlab и Simulink, позволяющий решать следующие задачи:
 - исследовать функционирование алгоритмов параметрической идентификации системы управления;
 - исследовать функционирование алгоритмов адаптации параметров эталонной модели;
 - исследовать функционирование алгоритмов сигнальной коррекции.
4. Эффективность предложенного в диссертационной работе принципа построения адаптивной системы, а также разработанных алгоритмов и программного обеспечения подтверждается результатами моделирования адаптивной системы управления продольным движением ракеты класса "воздух-воздух".
5. Полученные в работе научные и практические результаты показывают возможность использовать их при разработке перспективных и при модернизации существующих систем управления полётом летательного аппарата.
6. Верность разработанной методики синтеза предлагаемой адаптивной системы управления полётом летательными аппаратами при решении поставленной задачи подтверждается исследованием системы с помощью математического моделирования.

Работы по теме диссертации

По тематике диссертации и в результате исследования написаны следующие:

1. *Хаммуд А.Х.* Необходимость адаптации для работы динамических систем управления, работающих в жёстких условиях.- Отчет № 11-CY/2000-SSRC.- Дамаск (Сирия), 2000.- 20с.
2. *Хаммуд А.Х.* Нейронные сети как адаптивные элементы в системах управления.- Отчет № 34-AC/2001-SSRC.- Дамаск (Сирия), 20001.-18с.
3. *Хаммуд А.Х.* Нейросетевая реализация систем управления полётом на основе метода динамической инверсии (по зарубежным источникам) // Мехатроника, Автоматизация, Управление.- 2003.-№ 9.- С.25-31.
4. *Евстифеев В.В., Хаммуд А.Х.* Использование адаптивных нейронных подходов при модернизации систем управления летательными аппаратами // V Международный научный симпозиум.-2003.- 4с.

Подписано в печать 05.01.2004. Заказ №4т.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана