

А. С. ГОЛЬЦОВ, TRAN MANH HUNG

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОВОРОТА ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

В простейших случаях для управления технологическими процессами применяют П-, ПИ- и ПИД-регуляторы с жесткой (неизменной) настройкой параметров. Если математическая модель объекта управления содержит неизвестные возмущающие воздействия и параметры, изменяющиеся в процессе управления, то следует применять цифровую систему управления с обучаемой моделью. Задачи управления, анализа и моделирования различных процессов и систем решают с применением их математических моделей. Выбор модели диктуется условиями реализации и требованием адекватности. Проблема разработки алгоритмов управления в условиях неопределенности занимает одно из центральных мест в современной теории управления. Для решения возникающих задач структурной и параметрической идентификации применяют, как правило, методы и алгоритмы теории адаптивных систем управления. Применение принципов адаптации позволяет обеспечить высокую точность моделирования при существенном изменении динамических свойств изучаемой системы, унифицировать отдельные подсистемы и их блоки; сократить сроки разработки и доводки системы. В данной статье рассмотрена задача исследования цифровой адаптивной системы поворота лопаток направляющих аппаратов (НА) осевого компрессора газотурбинных двигателей (ГТД). Целью исследования является увеличение эффективности системы управления поворота лопаток НА с применением цифровой адаптивной системы. Газодинамическую устойчивость осевого компрессора ГТД при изменении внешних условий и дросселировании двигателя обеспечивают перепуском воздуха и поворотом лопаток НА первых и последних ступеней компрессора. Выполнена постановка задачи синтеза системы адаптивного управления поворотом лопаток НА компрессора ГТД. Разработана математическая модель САУ в канонической форме «модель системы в пространстве состояний» и алгоритм поворота лопаток НА с помощью адаптивного ПИ-регулятора. Выполнено имитационное моделирование САУ с помощью пакета прикладных программ Matlab/Simulink. При реализации адаптивного ПИ-регулятора отклонение давления за ступенью компрессора от требуемого значения уменьшено до 0,4 %.

Ключевые слова: цифровая система; адаптивный ПИ-регулятор; имитационное моделирование; направляющий аппарат осевого компрессора; газотурбинный двигатель; модель системы в пространстве состояний.

Введение

Трудность создания систем управления заключается в том, что ряд наиболее передовых идей в области управления базируется на сложный математический аппарат. Математическая теория систем управления используется в качестве средства моделирования процессов для анализа их свойств под действием обратных связей, для синтеза регуляторов с требуемыми свойствами и достижения цели управления с учетом внутренних компромиссов и ограничений, присущих задаче. Однако непрактично описывать все детали процессов, для которых можно было бы применять системы управления, потому что они охватывают и химические объекты, и электромеханические системы, и энергетические генераторы, и т. д. Следует концентрироваться на фундаментальных аспектах проектирования систем

управления, являющихся общими для любых промышленных приложений [1-3].

В простейших случаях для управления технологическими процессами применяют П-, ПИ- и ПИД-регуляторы с жесткой (неизменной) настройкой параметров [1-5]. Если математическая модель объекта управления содержит неизвестные возмущающие воздействия и параметры, изменяющиеся в процессе управления, то следует применять цифровую систему управления с обучаемой моделью [1-3, 5, 7].

При проектировании цифровых систем управления обычно применяют математические модели объекта управления и других элементов системы автоматического управления (САУ) в виде дискретных передаточных функций и разностных уравнений. Однако предпочтение следует отдавать дискретной модели в пространстве состояний, содер-

жащей систему разностных уравнений первого порядка. Кроме того, предполагается, что измерительные устройства имеют только случайную составляющую погрешности измерений с математическим ожиданием, равным нулю [1, 2, 5, 7].

Задачи управления, анализа и моделирования различных процессов и систем решают с применением их математических моделей. Выбор модели диктуется условиями реализации и требованием адекватности. Любую математическую модель получают с использованием упрощающих допущений. Поэтому математические модели лишь приближенно описывают реальные процессы, что неизбежно сказывается на результатах моделирования и управления.

Проблема разработки алгоритмов управления в условиях неопределенности занимает одно из центральных мест в современной теории управления. Для решения возникающих задач структурной и параметрической идентификации применяют, как правило, методы и алгоритмы теории адаптивных систем управления. Связано это с тем, что традиционные методы принятия решений являются неработоспособными в данных условиях, так как требуют полной априорной информации о структуре, параметрах и режимах функционирования объекта. Кроме того, классические методы не позволяют накапливать информацию в процессе работы системы, поэтому в условиях действия неконтролируемых возмущений и дрейфа параметров нельзя обеспечить требуемые значения показателей качества системы [1, 2, 5].

Применение принципов адаптации позволяет обеспечить высокую точность моделирования при существенном изменении динамических свойств изучаемой системы, унифицировать отдельные подсистемы и их блоки; сократить сроки разработки и доводки системы.

В основном можно применять методы наименьших квадратов, стохастической аппроксимации и их модификации, а также различные градиентные алгоритмы. Алгоритмы управления объектом и обучения его модели можно получить, например, минимизацией соответствующих функционалов обобщенной работы с помощью принципа максимума. Эти алгоритмы учитывают индивидуальные особенности объектов управления и хорошо приспособлены для реализации в цифровых системах [1-7].

В статье рассмотрена задача исследования цифровой адаптивной системы поворота лопаток направляющих аппаратов (НА) осевого компрессора газотурбинных двигателей (ГТД) для повышения эффективности системы управления поворота лопа-

ток НА с применением цифровой адаптивной системы и для обеспечения газодинамической устойчивости осевого компрессора ГТД при изменении внешних условий и дросселирования двигателя выполняют перепуск воздуха из компрессора и поворот лопаток НА первых и последних ступеней компрессора.

1. Постановка задачи управления

Для обеспечения газодинамической устойчивости осевого компрессора ГТД при изменении внешних условий и дросселирования двигателя выполняют перепуск воздуха из компрессора и поворот лопаток НА первых и последних ступеней компрессора.

Для каждой ступени компрессора составляют программы поворота лопаток НА в зависимости от степени повышения давления $\pi_k^*(t)$ и приведенной частоты вращения ротора $n_{пр}(t)$:

$$\varphi_{тр}(t) = f(n_{пр}(t), \pi_k^*(t)). \quad (1)$$

Поворот лопаток выполняют с помощью гидромеханических регуляторов разомкнутого типа. Такие регуляторы обеспечивают удовлетворительные эксплуатационные характеристики компрессора при изменении частоты вращения ротора $n_{пр}$ в узкой окрестности расчётного режима [3, 4]. Однако при существенном изменении условий работы двигателя коэффициент полезного действия и запас устойчивости компрессора снижаются.

Повысить эффективность системы управления можно за счёт применения цифровой адаптивной системы поворота лопаток НА. Цифровые адаптивные системы автоматического управления хорошо себя зарекомендовали в системах управления технологическими процессами предприятий химической промышленности, гидроагрегатами ГЭС и другими объектами управления [1, 2, 7].

Цифровая адаптивная система управления выполнена по замкнутой схеме и содержит (рис. 1):

- цифровой модуль формирования задания (МФЗ);
- цифровой ПИ-регулятор с автоматически настраиваемыми параметрами;
- цифровой модуль настройки параметров регулятора;
- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП);
- сервопривод (СП);
- компрессор (К);
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

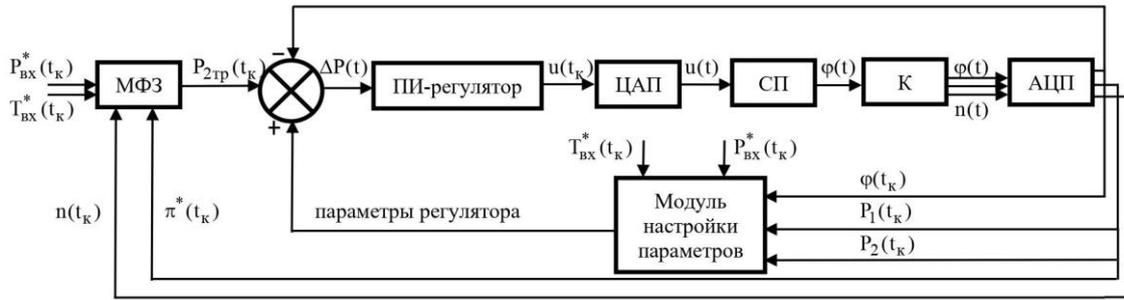


Рис. 1. Функціональна схема адаптивної системи повороту лопаток НА

2. Априорная модель объекта управления (ОУ)

Предполагается, что известна статическая характеристика первой ступени осевого компрессора (модель ОУ):

$$f(P_{вх}(t), P(t), \varphi(t), n(t)) = 0, \quad (2)$$

$$P_{изм}(t) = P(t) + \varepsilon(t); \quad (3)$$

$$P(t) \leq P_{доп}, \quad (4)$$

где $P_{вх}(t)$ – давление на входе первой ступени;
 $P(t)$ – давление за первой ступенью;
 $\varphi(t)$ – угол поворота лопаток НА;
 $n(t)$ – число оборотов ротора компрессора;
 $P_{изм}(t)$ – измеренная величина давления за первой ступенью;
 $\varepsilon(t)$ – погрешность измерений;
 $P_{доп}$ – допустимое давление за первой ступенью компрессора.

Рассматривается случай, когда линеаризованная статическая характеристика первой ступени компрессора имеет следующий вид:

$$\Delta P(t) - b_1 \cdot \Delta P(t) \cdot \Delta \varphi(t) = b_0 \cdot \Delta \varphi(t) + w_1(t), \quad (5)$$

где $\Delta P(t)$ – отклонение перепада давления на ступени от номинального значения;

$\Delta \varphi(t)$ – отклонение угла поворота лопаток НА от номинального значения;

$w_1(t)$ – неконтролируемое возмущающее воздействие окружающей среды (погрешность линеаризации).

Уравнение динамики поворота лопаток НА:

$$\dot{\varphi}(t) = \omega(t), \quad (6)$$

где $\omega(t)$ – угловая скорость поворота лопаток НА.

Модель датчика давления:

$$\Delta P_{изм}(t_k) = \Delta P(t_k) + \varepsilon(t_k), \quad (7)$$

где $t_k = t_{k-1} + \Delta t = k \cdot \Delta t; k = 1, 2, \dots, N;$

Δt – период опроса датчика.

Параметры модели ОУ:

$$b_0 = 0,1; b_1 = -0,01; \sigma = 1; \Delta \varphi_{доп} = 1.$$

Предполагается, что возмущающее воздействие окружающей среды на процесс повышения давления исследуемой ступенью компрессора изменяется следующим образом (см. рис. 2):

$$w_1(t) = b_2 \cdot \Delta n(t) + b_3 \cdot \Delta P_{вх}(t) + b_4 \cdot \Delta P_{изм}(t) + \delta P(t), \quad (8)$$

где $\delta P(t)$ – случайная составляющая возмущающего воздействия;

$\Delta P_{изм}(t)$ – измеренная величина отклонения перепада давления от номинального значения.

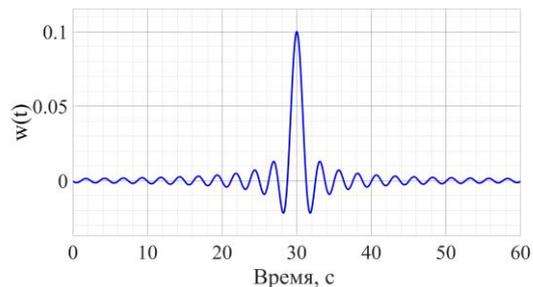


Рис. 2. Изменение по времени возмущающего воздействия

3. Регуляризованная модель ОУ (с апериодическим фильтром 1-го порядка)

При синтезе системы управления используется регуляризованная модель динамики ОУ (статическая характеристика ступени компрессора с апериодическим фильтром 1-го порядка):

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{1}{\tau} \cdot x_1(t) + \frac{1}{\tau} \cdot \left[b_0 \cdot x_2(t) + b_1 \cdot x_1(t) \cdot x_2(t) + w_1(t) \right], \quad (9)$$

$$x_2(t) = \Delta \varphi(t), \quad (10)$$

где $\tau = 0,5$ – постоянная времени фильтра (параметр регуляризации);

$$x_1(t) \approx \Delta P(t).$$

С учетом (5), (6) и (7) уравнения (9) и (10) примут следующий вид:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{1}{\tau} \cdot x_1(t) + \frac{1}{\tau} \cdot [b_0 + b_1 \cdot \Delta P_{\text{изм}}(t)] \cdot x_2(t) + \frac{1}{\tau} \cdot w(t), \quad (11)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{\Delta \varphi_{\text{доп}}}{\tau} \cdot u(t), \quad (12)$$

где $\Delta \varphi_{\text{доп}}$ – допустимое изменение угла поворота лопаток НА за время τ ;

$u(t)$ – управляющее воздействие;

$$w(t) = w_1(t) - b_1 \cdot \varepsilon(t) \cdot \Delta \varphi(t).$$

Требуемые значения допустимого перепада давления формирует апериодический фильтр 1-го порядка:

$$\dot{x}_{1\text{тр}}(t) = -\frac{1}{\tau} \cdot x_{1\text{тр}}(t) + \frac{1}{\tau} \cdot [b_0 \cdot \Delta \varphi(t) + b_1 \cdot \Delta P_{\text{тр}}(t) \cdot \Delta \varphi(t) + w_1(t)]; \quad (13)$$

где $x_{1\text{тр}}(0) = \Delta P_{\text{тр}}(0)$; $x_{\text{изм}}(t) = \Delta P_{\text{изм}}(t)$.

Показатель эффективности САУ (регуляризованный функционал метода наименьших квадратов (МНК)):

$$J_{\text{МНК}} = \frac{1}{2\tau} \cdot \int_0^{t_k} \left\{ \frac{[x_{1\text{тр}}(t) - x_1(t)]^2}{\sigma_{\text{доп}}^2} + \alpha \cdot u^2(t) \right\} dt, \quad (14)$$

где $x_{1\text{тр}}(t)$ – требуемый закон изменения управляемой переменной;

$$x_{1\text{тр}}(t) = f_1(n(t), P_{\text{вх}}^*(t), T_{\text{вх}}^*(t));$$

$\sigma_{\text{доп}}$ – допустимая погрешность управления;

$\alpha \leq 1$ – параметр регуляризации.

Модель ОУ в матричной форме:

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{\tau} \cdot F(t) \cdot x(t) + \frac{\Delta \varphi_{\text{доп}}}{\tau} \cdot B \cdot u(t) + \frac{1}{\tau} \cdot C^T \cdot w(t), \quad (15)$$

и тогда

$$J_{\text{МНК}} = \frac{1}{2\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot \int_0^{t_k} \left\{ [x_{1\text{тр}}(t) - C \cdot x_1(t)]^2 + \alpha \cdot \sigma_{\text{доп}}^2 \cdot u^2(t) \right\} dt, \quad (16)$$

$$\text{где } F(t) = \begin{bmatrix} -1 & [b_0 + b_1 \cdot \Delta P_{\text{изм}}(t)] \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0], \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Модель ОУ содержит управляющее воздействие $u(t)$, подлежащее определению в результате решения задачи синтеза САУ, и вектор неконтролируемых возмущающих воздействий $w(t)$.

4. Синтез адаптивного ПИ-регулятора давления за ступенью компрессора с поворотными лопатками НА

Решение задачи синтеза алгоритма управления выполнено с помощью принципа максимума. В процессе решения этой задачи были получены функция Гамильтона [1]:

$$H(x, u, \lambda) = -\frac{1}{2\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} [x_{1\text{тр}}(t) - C \cdot x_1(t)]^T - \frac{\alpha}{2\tau} \cdot u^2(t) + \frac{1}{\tau} \cdot \lambda(t)^T \cdot [F(t) \cdot x(t) + \Delta \varphi_{\text{доп}} \cdot B \cdot u(t) + C^T \cdot w(t)] \quad (17)$$

и уравнения Эйлера-Лагранжа, обращающие в минимум функцию Гамильтона:

$$\dot{x}_{\text{опт}}(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda(t)}, \quad (18)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x(t)}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = -\frac{\alpha}{\tau} \cdot u(t) + \frac{\Delta \varphi_{\text{доп}}}{\tau} \cdot B^T \cdot \lambda(t) = 0,$$

$$\text{где } u(t) = \frac{\Delta \varphi_{\text{доп}}}{\alpha} \cdot B^T \cdot \lambda(t).$$

После выполнения операций вычисления частных производных уравнения Эйлера-Лагранжа для рассматриваемой задачи были представлены в следующем виде:

$$\dot{x}_{\text{опт}} = \frac{1}{\tau} \cdot F(t) \cdot x_{\text{опт}}(t) + \frac{\Delta \varphi_{\text{доп}}^2}{\alpha \cdot \tau} \cdot B \cdot B^T \cdot \lambda(t), \quad (21)$$

$$\text{где } x_{\text{опт}}(t) = \begin{bmatrix} \Delta P(0) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{1}{\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot C^T \cdot [x_{1\text{тр}}(t) - C \cdot x_{1\text{опт}}(t)] - \frac{1}{\tau} \cdot F(t)^T \cdot \lambda(t), \quad (22)$$

$$\text{где } \lambda(t_N) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнения Эйлера-Лагранжа [1], определяют двухточечную краевую задачу (ДКЗ) для системы нелинейных дифференциальных уравнений (21), (22) с заданными краевыми условиями в начальный

и конечный моменты времени управления. Однако очень сложно реализовать решение нелинейной ДКЗ в реальном масштабе времени, как это требуется для управления.

Поэтому полученные уравнения Эйлера-Лагранжа были преобразованы с помощью метода инвариантного погружения [1] в задачу Коши для системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_{\text{опт}}(t) = \frac{1}{\tau} \cdot F(t) \cdot x(t) + \frac{1}{\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot V(t) \cdot C^T \cdot e(t), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \frac{1}{\tau} \cdot F(t) \cdot V(t) + \frac{1}{\tau} \cdot V(t) \cdot F(t)^T - \\ & - \frac{1}{\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot V(t) \cdot C^T \cdot C \cdot V(t) + \frac{\Delta\varphi_{\text{доп}}^2}{\tau \cdot \alpha} \cdot B \cdot B^T, \end{aligned} \quad (24)$$

с известными начальными условиями:

$$x_{\text{опт}}(0) = \begin{bmatrix} \Delta P(0) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad V(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $e(t)$ – сигнал рассогласования между требуемыми и измеренными значениями управляемой переменной (давления за рабочим колесом ступени компрессора $x_1(t)$).

$$e(t) = x_{1\text{тр}}(t) - x_{1\text{изм}}(t), \quad (25)$$

$$\dot{e}(t) = -\frac{1}{\tau} \cdot e(t) + \frac{1}{\tau} [\Delta P_{\text{тр}}(t) - \Delta P_{\text{изм}}(t)]. \quad (26)$$

Из уравнений (23) и (24) для оптимальных значений переменных состояния замкнутой системы управления по методике, изложенной в [1], был получен алгоритм адаптивного ПИ-регулятора давления за регулируемой ступенью компрессора:

$$\dot{x}_2(t) = \frac{V_{21}}{\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot e(t), \quad (27)$$

где $x_2(0) = 0$.

Тогда полученные уравнения примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1\text{опт}}(t) = & -\frac{1}{\tau} \cdot x_{1\text{опт}}(t) + \\ & + \frac{b_0 + b_1 \cdot \Delta P_{\text{изм}}(t)}{\tau} \cdot x_2(t) + \frac{V_{11}}{\tau \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot e(t) + \frac{1}{\tau} \cdot w(t). \end{aligned} \quad (28)$$

Но если известен закон оптимального изменения угла поворота лопаток НА $\varphi_{\text{опт}}(t)$, то оптимальные значения давления за ступенью компрессора

можно определить интегрированием уравнения состояния ОУ (11):

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1\text{опт}}(t) = & -\frac{1}{\tau} \cdot x_{1\text{опт}}(t) + \\ & + \frac{b_0 + b_1 \cdot \Delta P_{\text{изм}}(t)}{\tau} \cdot \varphi_{\text{опт}}(t) + \frac{1}{\tau} \cdot w(t). \end{aligned} \quad (29)$$

Поэтому из равенства правых и левых частей уравнений (29) и (30) был получен требуемый алгоритм поворота лопаток НА:

$$\varphi_{\text{опт}}(t) = x_2(t) + \frac{V_{11}}{[b_0 + b_1 \cdot \Delta P_{\text{изм}}(t)] \cdot \sigma_{\text{доп}}^2} \cdot e(t), \quad (30)$$

где V_{11} и V_{21} – элементы матрицы $V(t)$, полученные интегрированием матричного дифференциального уравнения (24);

$\varphi_{\text{опт}}(t)$ – оптимальный угол поворота лопаток НА, обеспечивающий минимум регуляризованного функционала МНК $J_{\text{МНК}}$ при наличии неконтролируемых возмущающих воздействий.

5. Имитационное моделирование САУ с адаптивным ПИ-регулятором давления за ступенью компрессора с поворотными лопатками НА

Моделирование выполнено с помощью пакета прикладных программ Matlab/Simulink. Результаты моделирования приведены на графиках рис. 3÷7.

Заключение

1. Выполнена постановка задачи синтеза системы адаптивного управления поворотом лопаток НА ступени осевого компрессора ГТД и разработана математическая модель САУ в канонической форме «модель системы в пространстве состояний».

2. Составлен регуляризованный функционал метода наименьших квадратов для задачи синтеза адаптивного ПИ-регулятора давления. С помощью принципа максимума и метода инвариантного погружения получен алгоритм поворота лопаток НА с помощью адаптивного ПИ-регулятора, параметры которого вычисляются автоматически в процессе функционирования САУ.

3. Выполнено имитационное моделирование САУ с адаптивным ПИ-регулятором с помощью пакета прикладных программ Matlab/Simulink.

4. Получены графики изменения переменных состояния объекта управления при реализации адаптивного регулирования.

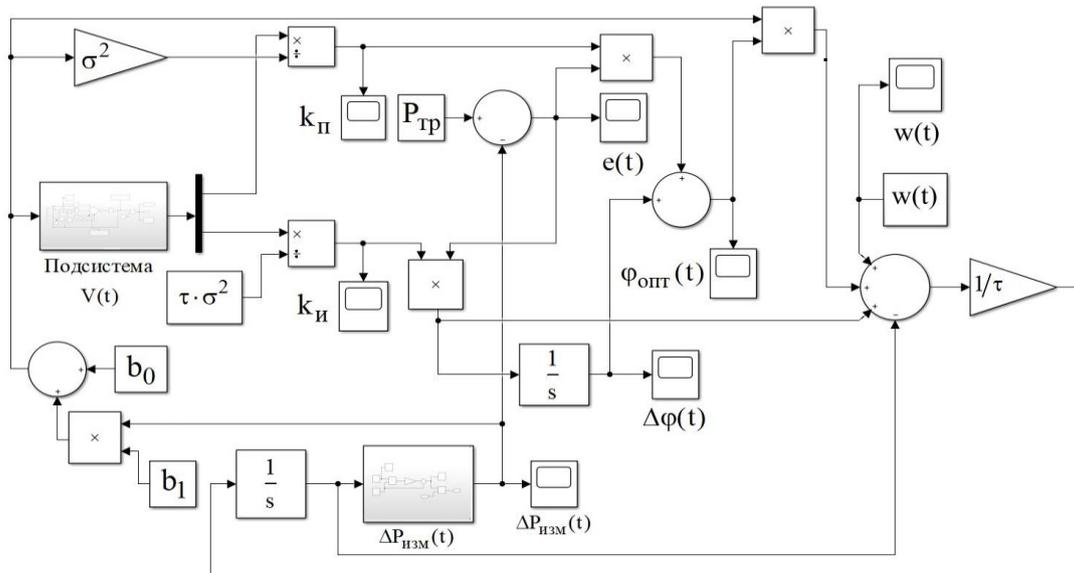


Рис. 3. Алгоритм моделирования динамики ОУ с адаптивным ПИ-регулятором с помощью пакета прикладных программ Matlab/Simulink

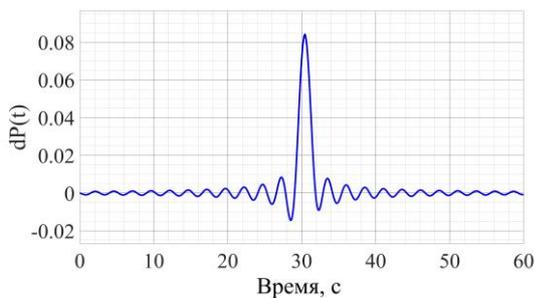


Рис. 4. Отклонение давления $\Delta P(t)$ от требуемого значения без реализации адаптивного регулирования

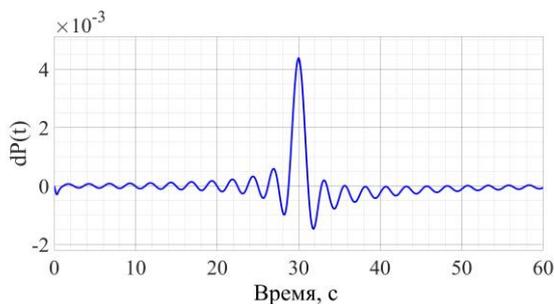


Рис. 5. Отклонение давления $\Delta P(t)$ от требуемого значения при реализации адаптивного регулирования

5. Отклонение давления за ступенью компрессора от требуемого значения без реализации адаптивного регулирования составляет 8%. При реализации адаптивного ПИ-регулятора отклонение давления за ступенью компрессора от требуемого значения уменьшено до 0,4%.

6. Эксплуатационные характеристики компрессора улучшены за счёт автоматической настройки параметров регулятора в процессе управления в зависимости от режима работы двигателя и изменения внешних возмущающих воздействий. Алгоритм настройки параметров регулятора получен в результате решения задачи минимизации функционала обобщенной работы с помощью принципа максимума и метода инвариантного погружения.

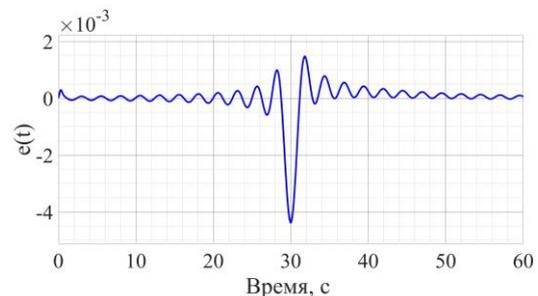


Рис. 6. Погрешность $e(t)$ адаптивного регулирования

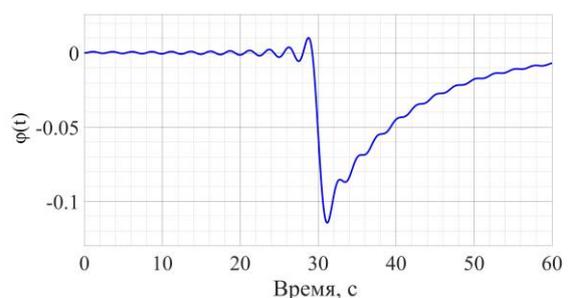


Рис. 7. Угол поворота $\varphi(t)$ лопаток НА при реализации адаптивного регулирования

Литература

1. Гольцов, А. С. *Методы оптимизации и адаптивного управления в машиностроении [Текст] : учеб. пособие / А. С. Гольцов. – Волгоград : ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2009. – 168 с.*
2. Ротач, В. Я. *Теория автоматического управления [Текст] : учеб. для вузов. / В. Я. Ротач. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.*
3. *Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] : монография / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко и др. – К. : Техника, 1998. – 312 с.*
4. Черкасов, Б. А. *Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей [Текст] : учеб. для вузов / Б. А. Черкасов. – М. : Машиностроение, 1988. – 360 с.*
5. Гольцов, А. С. *Адаптивные системы автоматического управления нелинейными объектами [Текст] : монография / А. С. Гольцов. – Орел : Академия ФАПСи, 2001. – 156 с.*
6. Граничин, О. Н. *Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах [Текст] / О. Н. Граничин, Б. Т. Поляк. – М. : Наука, 2003. – 291 с.*
7. Изерман, Р. *Цифровые системы управления [Текст] : пер. с англ. / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.*

References

1. Holtsov, A. S. *Metody optimizatsii i adaptivnogo upravleniya v mashinostroenii* [Optimization and adaptive control methods in mechanical engineering]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2009. 168 p.
2. Rotach, V. Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Moscow, MEI Publ., 2004. 400 p.
3. Epifanov, S. V., Kuznetsov, B. I., Bogaenko, I. N. *Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinnnykh dvigatelei* [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1998. 312 p.
4. Cherkasov, B. A. *Avtomatika i regulirovanie vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* [Automation and regulation of jet engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 360 p.
5. Holtsov, A. S. *Adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya nelineinymi ob"ektami* [Adaptive systems for automatic control of nonlinear objects]. Oryol, Akademiya FAPSI Publ., 2001. 156 p.
6. Granichin, O. N. *Randomizirovannye algoritmy otsenivaniya i optimizatsii pri pochti proizvol'nykh pomekhakh* [Randomized estimation and optimization algorithms with almost arbitrary noise]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 291 p.
7. Izerman, R. *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital control systems]. Moscow, Mir Publ., 1984. 541 p.

Надійшла до редакції 10.05.2021, розглянута на редколегії 20.08.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИЙ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ПОВОРОТУ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТІВ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА

А. С. Гольцов, Tran Manh Hung

У найпростіших випадках для управління технологічними процесами застосовують П-, ПІ- і ПІД-регулятори з жорстким (незмінним) налаштуванням параметрів. Якщо математична модель об'єкта управління містить невідомі впливи і параметри, що змінюються в процесі управління, то слід застосовувати цифрову систему управління з навченою моделлю. Завдання управління, аналізу і моделювання різних процесів і систем вирішують із застосуванням їх математичних моделей. Вибір моделі диктується умовами реалізації і вимогами адекватності. Проблема розробки алгоритмів управління в умовах невизначеності займає одне з центральних місць у сучасній теорії управління. Для вирішення виникаючих завдань структурної та параметричної ідентифікації застосовують, як правило, методи і алгоритми теорії адаптивних систем управління. Застосування принципів адаптації дозволяє забезпечити високу точність моделювання при істотній зміні динамічних властивостей досліджуваної системи, уніфікувати окремі підсистеми і їх блоки; скоротити терміни розробки і доведення системи. У даній статті розглянуто задачу дослідження цифрової адаптивної системи повороту лопаток напрямних апаратів (НА) осьового компресора газотурбінних двигунів (ГТД). Метою дослідження є підвищення ефективності системи управління повороту лопаток НА із застосуванням цифрової адаптивної системи. Газодинамічну стійкість осьового компресора ГТД при зміні зовнішніх умов і дроселювання двигуна забезпечують перепуском повітря і поворотом лопаток НА перших і останніх ступенів компресора. Виконано постановку задачі синтезу системи адаптивного управління поворотом лопаток НА компресора ГТД. Розроблено математичну модель САУ в канонічній формі «модель системи в просторі станів» і алгоритм повороту лопаток НА за допомогою адаптивного ПІД-регулятора. Виконано імітаційне моделювання САУ за допомогою пакета прикладних програм Matlab / Simulink. При реалізації адаптивного ПІД-регулятора відхилення тиску за щаблем компресора від необхідного значення зменшено до 0,4 %.

Ключові слова: цифрова система; адаптивний ПІД-регулятор; імітаційне моделювання; направляючий апарат осьового компресора; газотурбінний двигун; модель системи в просторі стану.

RESEARCH OF THE DIGITAL ADAPTIVE SYSTEM OF ROTATION OF THE AXIAL COMPRESSOR GUIDE BLADES

A. Holtsov, Tran Manh Hung

In the simplest cases, P-, PI- and PID-controllers with rigid (unchanged) parameter settings are used to control technological processes. If the mathematical model of the control object contains unknown disturbing influences and parameters that change during the control process, then a digital control system with a learning model should be used. The tasks of control, analysis and modeling of various processes and systems are solved using their mathematical models. The choice of a model is dictated by the conditions of implementation and the requirement of adequacy. The problem of developing control algorithms under uncertainty occupies one of the central places in modern control theory. To solve the arising problems of structural and parametric identification, as a rule, methods, and algorithms of the theory of adaptive control systems are used. The application of the principles of adaptation allows to ensure high accuracy of modeling with a significant change in the dynamic properties of the system under study, to unify individual subsystems and their blocks; reduce the development and debugging time of the system. This article discusses the problem of studying a digital adaptive system for turning the blades of guide apparatus (GA) of an axial compressor of gas turbine engines (GTE). The aim of the study is to increase the efficiency of the control system for turning the blades of the GA using a digital adaptive system. The gas-dynamic stability of the GTE axial compressor under changes in external conditions and engine throttling is provided by air bypass and turning the blades of the first and last compressor stages. The statement of the problem of synthesis of the system of adaptive control of the rotation of the blades of the GA compressor of the gas turbine engine is carried out. A mathematical model of the ACS in the canonical form “model of the system in the state space” and an algorithm for turning the blades of the GA using an adaptive PI-controller have been developed. Simulation modeling of ACS was carried out using the Matlab / Simulink software package. When implementing an adaptive PI-controller, the pressure deviation downstream of the compressor stage from the required value is reduced to 0.4 %.

Keywords: digital system; adaptive PI-controller; simulation modeling; axial compressor guide vanes; gas turbine engine; model of the system in the state space.

Гольцов Анатолий Сергеевич – д-р техн. наук, проф. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Чан Мань Хунг – асп. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Anatolii Holtsov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: goltsov43@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7265-8037.

Tran Manh Hung – PhD student, Department of Aircraft Engine Design, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: tranmanhhung1202@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9854-780X.