

ФУНКЦИОНАЛЬНО-АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИСРЕДНЫМ ОБЪЕКТОМ

Селезнева А. Е.¹, Неретин Е. С.²

(Московский авиационный институт, Москва)

Представлены результаты исследования возможности использования цифровой функционально-адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью, синтезированной по методу покомпонентного формирования управления, для канала тангажа беспилотного аппарата, предполагающего движение в двух различных средах (вода и воздух). Динамические параметры объекта управления могут изменяться в широком диапазоне значений. Представлены результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы автоматического управления при борьбе с влиянием внешних воздействий, таких как порыв штормового ветра, при различных управляющих воздействиях, работы цифровой функционально-адаптивной системы в сравнении с аналоговой, а также работы системы при движении объекта по заданной траектории. Ключевой особенностью применения функционально-адаптивной системы автоматического управления является ее способность адаптироваться к новым условиям без необходимости изменения настроек системы. Принцип работы контура адаптации основан на вычислении управляющего воздействия из рассогласования между сигналами, снимаемыми с датчиков и сигналами эталонной модели. Интеграция функционально-адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью системы позволит сократить затраты на модернизацию и внедрение новых систем управления, а также повысит точность и эффективность работы системы в целом.

Ключевые слова: система автоматического управления, функционально-адаптивная система автоматического управления, эталонная модель, самонастраивающаяся система.

1. Введение

Система автоматического управления является важнейшим элементом любого современного технического устройства. Она позволяет без участия человека собирать и обрабатывать информацию о текущем состоянии устройства, а также формиро-

¹ Анна Евгеньевна Селезнева, аспирант (seleznevae@yandex.ru).

² Евгений Сергеевич Неретин, к.т.н., доцент (evgeny.neretin@gmail.com).

вать воздействия на него для решения поставленной устройству задачи. Системы автоматического управления также позволяют отслеживать поведение всех узлов устройства. Современные технические устройства отличаются большим количеством узлов, управление которыми является невозможным без помощи автоматики.

Одной из основных задач системы управления является нивелирование возможных внешних воздействий, влияющих на объект управления.

В настоящем исследовании рассматривается задача синтеза системы автоматического управления для канала угла тангажа беспилотного аппарата однократного запуска, движущегося в двух средах (вода и воздух) по заданной траектории с целью доставки груза к месту назначения с использованием принципа реактивного движения и динамические параметры которого могут изменяться в широком диапазоне. Внешними факторами, с влиянием которых должна справляться разработанная система автоматического управления, для рассматриваемого объекта управления являются: течения на подводном участке, порывы ветра на воздушном участке, волны, действующие в момент изменения среды движения.

В настоящее время для управления рассматриваемым объектом применяется ПИД-регулятор, коэффициенты которого зависят от параметров движения объекта (высоты, скорости и т.д.). Для формирования адекватного управляющего воздействия требуется точное определение изменений динамических параметров объекта. Для решения этой задачи в основном используются методы исследования объекта управления, такие как наземные испытания, летные испытания (для дальнейшего уточнения математической модели) и т.д. [2]. Однако даже при подобной предварительной подготовке велика вероятность неучета всех возможных факторов, влияющих на объект, за счет чего будет сформировано некорректное управляющее воздействие в каждый момент времени.

Целью работы является разработка системы автоматического управления, позволяющей быстро нивелировать возможные внешние воздействия, влияющие на объект управления,

и независимой от точности предварительного расчета динамических параметров объекта управления.

Для решения указанных задач предлагается использовать функционально-адаптивную систему управления с эталонной моделью [6]. Принцип работы контура адаптации основан на вычислении на основе метода покомпонентного формирования управления (МПФУ) управляющего воздействия из рассогласования между сигналами, снимаемыми с датчиков и сигналами эталонной модели.

Научная новизна исследования заключается в практическом применении МПФУ Лащева [6] для автоматической адаптации системы управления к изменениям окружающей среды и параметров рассматриваемого объекта. Ранее указанный метод для подобного объекта не применялся. Внедрение самонастраивающейся системы повысит эффективность системы автоматического управления и снизит требования к полноте математической модели объекта управления.

2. Понятие функционально-адаптивной системы автоматического управления

Адаптивная система автоматического управления – это система автоматического управления, в которой приспособление к случайно изменяющимся условиям обеспечивается автоматическим изменением параметров настройки или путём автоматического поиска оптимальной настройки [9].

По классификации, предлагаемой в [1], адаптивные системы делятся на функционально-адаптивные системы автоматического управления (с прямым алгоритмом адаптации) и параметрически-адаптивные системы автоматического управления (с идентификационным алгоритмом адаптации) [10, 11]. В настоящей статье рассмотрена только функционально-адаптивная система с эталонной моделью.

Общий принцип работы функционально-адаптивной системы заключается в следующем: управляющее воздействие настраивается регулятором в зависимости от функционирования системы. То есть динамические параметры объекта управления

при данном алгоритме не идентифицируются и не вычисляются. Принцип работы функционально-адаптивной системы автоматического управления представлен на рис. 1.

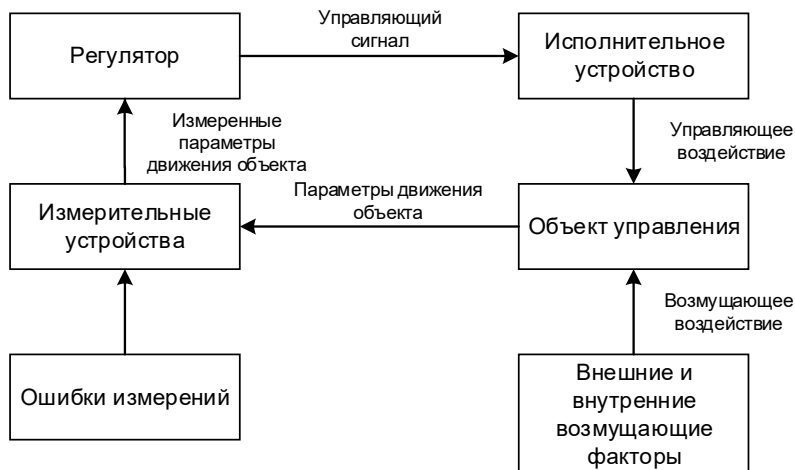


Рис. 1. Принцип работы функционально-адаптивной системы автоматического управления

Существуют различные виды функционально-адаптивных систем автоматического управления [18, 20]. Так, в [18] рассматривается адаптивный ПИД-регулятор с автоматически подстраиваемыми коэффициентами. Но в основном применяется подход к адаптации при помощи эталонной модели.

Согласно [16], первые попытки использования методов адаптивного управления с использованием эталонной модели появились в шестидесятых годах XX века. Адаптация на основе эталонной модели осуществляется при помощи корректировки управляющего воздействия исходя из рассогласования между текущими состояниями объекта управления и эталонной модели. Подробно принцип работы функционально-адаптивной системы с эталонной моделью рассмотрен в [15]. Различные методы построения контура адаптации на основе рассогласования

между текущими состояниями объекта управления и эталонной модели рассмотрены в [6, 14, 15, 17, 19, 21].

Задача, решаемая при построении адаптивного алгоритма с эталонной моделью, заключается в приведении требуемого состояния объекта управления (в рассматриваемой статье это угол тангажа) к заданному значению, причем переходный процесс должен соответствовать требованиям, предъявленным в разделе 3.

Для формирования нужного вида переходного процесса применяется эталонная модель. Алгоритмом адаптации основан на постоянном уменьшении рассогласования между сигналами, снимаемыми с датчиков и сигналами эталонной модели [6, 14, 21]. То есть рассогласование должно асимптотически стремиться к нулю. Структура функционально-адаптивной системы автоматического управления представлена на рис. 2.

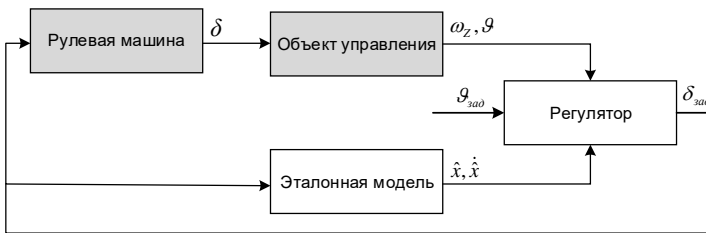


Рис. 2. Функциональная схема функционально-адаптивной системы управления

На функциональной схеме представлены следующие обозначения: ω_z – угловая скорость по оси Z; θ – угол тангажа; \hat{x} и $\dot{\hat{x}}$ – выходные сигналы эталонной модели (5); $\theta_{зад}$ – заданный угол тангажа; $\delta_{зад}$ – управляющее воздействие по оси Z; δ – управляющее воздействие по оси Z, приходящее от руля высоты. Блоки «Объект управления» и «Рулевая машина» рассмотрены в разделе 3, а блоки «Эталонная модель» и «Регулятор» – в разделе 4.

3. Математическая модель объекта

Рассматриваемый в настоящем исследовании объект управления представляет собой идеальную модель канала угла тангажа беспилотного аппарата (рис. 3.).

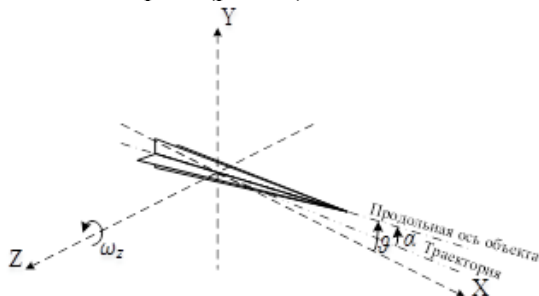


Рис. 3. Схема движения беспилотного аппарата в канале угла тангажа

Объект управления описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$(1) \begin{cases} \dot{\alpha} = -a_4 \alpha + a_6 \omega_z - a_5 \delta, \\ \dot{\omega}_z = -a_2 \alpha - a_1 \omega_z + a_3 \delta, \\ \dot{\vartheta} = \omega_z; \end{cases}$$

где α – угол атаки; ω_z – угловая скорость по оси Z ; ϑ – угол тангажа; δ – управляющее воздействие по оси Z , приходящее от руля высоты; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – динамические параметры объекта.

Наблюдаемыми являются угол тангажа (ϑ) и угловая скорость по оси Z (ω_z).

Динамические параметры объекта могут изменяться в широком диапазоне. Графики изменения параметров при движении объекта (в процентном соотношении относительно их максимального значения) представлены на рис. 4. Объект может перемещаться в различных средах (вода, воздух) по заданной траектории со скоростью в пределах 2 Махов с использованием принципа реактивного движения. На представленных графиках изображено изменение динамических параметров при движении объекта по заданной траектории в течение 35 с, на второй секунде происходит изменение среды движения и, соответствен-

но, резкое изменение динамических параметров. Рассматриваемая в настоящем исследовании траектория движения представлена на рис. 5.

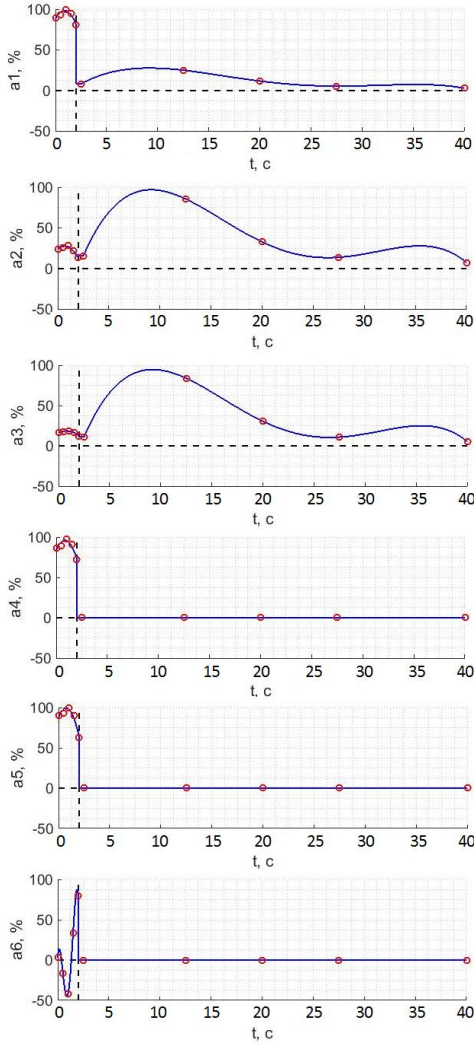


Рис. 4. Изменения значений динамических параметров объекта управления

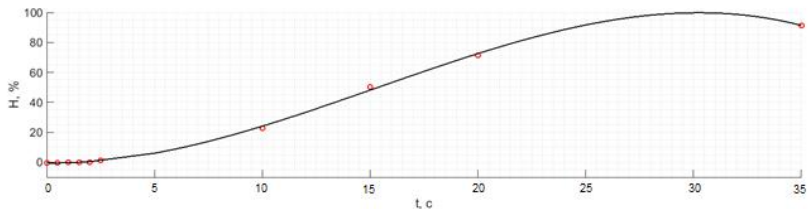


Рис. 5. Траектория движения объекта управления

Управляющее воздействие по оси $Z \delta$ (1), приходящее от руля высоты, представляет собой управляющее воздействие по оси $Z \delta_{\text{зад}}$ (3), пропущенное через рулевую машину. Передаточная функция рулевой машины имеет вид

$$(2) \quad W_{\text{PM}} = \frac{\delta}{\delta_{\text{зад}}} = \frac{1}{T_{\text{PM}}^2 s^2 + T_{\text{PM}} \zeta_{\text{PM}} s + 1}.$$

Значения коэффициентов передаточной функции рулевой машины представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов передаточной функции рулевой машины

Параметр	T_{PM}	ζ_{PM}
Значение	0,01	0,55

Рулевая машина имеет ограничение $\pm 20^\circ$.

Требования, предъявляемые к переходному процессу по углу тангажа:

- желаемое время переходного процесса: $t_{\text{mn}} = 1$ с;
- желаемое перерегулирование: не более 20%.
- время подавления внешних возмущений: не более 1 с;
- точность отработки задающего воздействия: $\pm 3\%$.

4. Синтез функционально-адаптивной системы автоматического управления

Требуется синтезировать регулятор, приводящий требуемое состояние объекта управления к значению аналогичного состо-

яния эталонной модели. Рассогласование между состояниями обеих моделей должно асимптотически стремиться к нулю.

Синтез функционально-адаптивной системы осуществляется на основе МПФУ, предложенного в [6]. Для реализации указанного метода зададим управляющий сигнал в виде суммы текущих состояний объекта управления и требуемого состояния (в рассматриваемой работе – требуемого угла тангажа), умноженных на некие настраиваемые коэффициенты:

$$(3) \quad \delta_{\text{зад}} = m(t)g_{\text{зад}} - k_2(t)\ddot{x} - k_1(t)\dot{x} - k_0(t)x,$$

где $m(t)$ – это настраиваемый коэффициент усиления заданного состояния; k_2, k_1, k_0 – настраиваемые коэффициенты усиления сигналов, принимаемых с датчиков.

МПФУ заключается в расчете коэффициентов усиления управляющего воздействия вида (3) исходя из требования к устойчивости системы по Ляпунову.

Для синтеза системы управления МПФУ, представим математическую модель (1) в виде дифференциального уравнения:

$$(4) \quad \ddot{x} + (a_1 + a_4)\dot{x} + (a_1a_4 + a_2a_6)x = a_3\delta + (a_2a_5 + a_3a_4)\delta,$$

где $x = g, \dot{x} = \omega_z$.

Слагаемым, содержащим δ , можно пренебречь (для рассматриваемого объекта управления), так как порядок коэффициента a_3 много меньше $a_2a_5 + a_3a_4$. Обозначим для удобства записи: $a_1 + a_4 = a_{12}, a_1a_4 + a_2a_6 = a_{11}, a_2a_5 + a_3a_4 = b$.

Состояния эталонной модели в каждый момент времени вычисляются в блоке «Эталонная модель». Эталонная модель должна обеспечивать переходный процесс требуемого состояния к заданному значению в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями. Структура эталонной модели для рассматриваемого объекта [12] задается следующим дифференциальным уравнением:

$$(5) \quad \ddot{\hat{x}} + a_2^m\dot{\hat{x}} + a_1^m\hat{x} + a_0^m\hat{x} = b^m g_{\text{зад}}.$$

Параметры эталонной модели a_2^m, a_1^m, a_0^m, b^m выбираются частотным методом, описанным в [5, 8, 13], исходя из пожеланий к виду переходного процесса (время переходного процесса

должно составлять 1 с, перегулирование – 10%, статическая ошибка – 0).

Представим (5) в виде передаточной функции

$$(6) \quad W_{ЭМ}(s) = \frac{b^m}{s^3 + a_2^m s^2 + a_1^m s + a_0^m}.$$

Поскольку статическая ошибка должна быть равна 0, $b^m = a_0^m$.

Передаточная функция (6) соответствует замкнутой системе, для применения частотного метода требуется построить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) разомкнутой системы; запишем ее передаточную функцию:

$$(7) \quad W_{ЭМ}^p(s) = \frac{a_0^m}{s^3 + a_2^m s^2 + a_1^m s} = \frac{\omega_{cp}}{s} \frac{\omega_1}{s + \omega_1} \frac{\omega_2}{s + \omega_2},$$

где ω_{cp} – частота среза; ω_1 – частота 1-го излома; ω_2 – частота 2-го излома желаемой ЛАЧХ разомкнутой системы.

Из (6) и (7) следует:

$$a_0^m = \omega_{cp} \omega_1 \omega_2,$$

$$a_1^m = \omega_1 \omega_2,$$

$$a_2^m = \omega_1 + \omega_2.$$

Как видно из (7), передаточную функцию разомкнутой системы можно представить как совокупность типовых звеньев: интегрирующего и двух аperiodических.

Для выполнения требований к виду переходного процесса частоты рассчитываются следующим образом:

$$\omega_{cp} = 0,6 \frac{\pi}{t_{nn}},$$

$$\omega_1 = 10^{0,3 + \lg(\omega_{cp})},$$

$$\omega_2 = 10^{0,5 + \lg(\omega_1)}.$$

Значения динамических параметров эталонной модели представлены в таблице 2. Желаемая ЛАЧХ эталонной модели представлена на рис. 6. Переходный процесс для эталонной модели представлен на рис. 7.

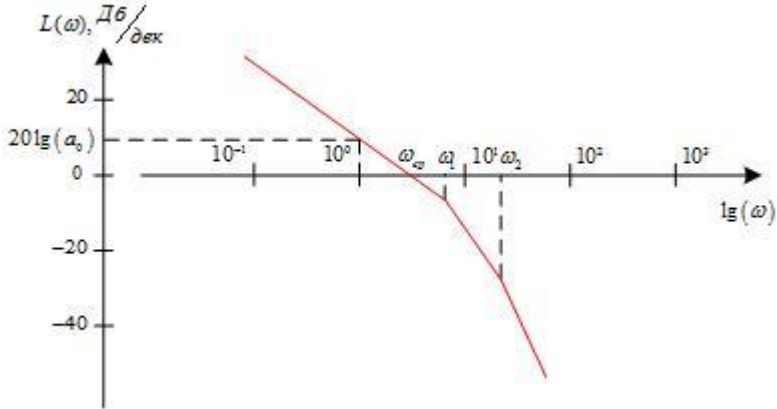


Рис. 6. Желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы для эталонной модели

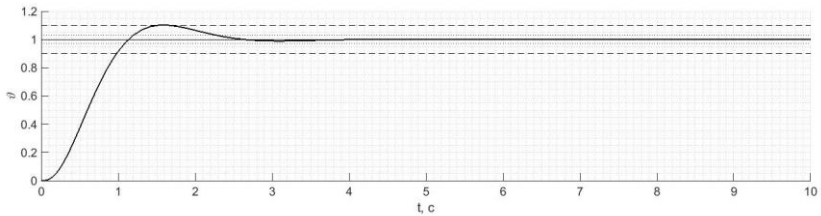


Рис. 7. Переходный процесс эталонной модели

Таблица 2. Значения параметров эталонной модели

Параметр	a_2^m	a_1^m	a_0^m	b^m
Значение	8,848	35,392	4	4

Для упрощения расчета не будем учитывать влияние рулевой машины (2) при синтезе регулятора, т.е. представим передаточную функцию рулевой машины $W_{PM} = 1$. В таком случае в (4) $\delta = \delta_{зад}$. Подставим (3) в (4) и получим следующее выражение:

$$(8) \quad \ddot{x} + (a_{12} + bk_2(t))\ddot{x} + (a_{11} + bk_1(t))\dot{x} + bk_0(t)x = bm(t)\mathcal{G}_{зад}$$

В общем виде для дифференциального уравнения n -й степени вида можно записать

$$\sum_{i=0}^n \tilde{a}_i x^i = \tilde{b}u.$$

Каждый коэффициент \tilde{a}_i и \tilde{b} можно представить как сумму неких констант a_i^{const} и переменных Δa_i :

$$(9) \quad \tilde{a}_i = \tilde{a}_i^{const} + \Delta \tilde{a}_i.$$

Тогда представим коэффициенты при x и u выражения (8) через (9), где в качестве константы выступают параметры эталонной модели (при соответствующих степенях x):

$$(10) \quad \begin{aligned} a_{12} + bk_2(t) &= a_2^m + \Delta a_{12}(t), \\ a_{11} + bk_1(t) &= a_1^m + \Delta a_{11}(t), \\ bk_0(t) &= a_0^m + \Delta a_{10}(t), \\ bm(t) &= b^m + \Delta b(t). \end{aligned}$$

Подставим (10) в (8) и из полученного выражения вычтем (5):

$$(11) \quad \begin{aligned} &\ddot{e} + a_2^m \dot{e} + a_1^m e = \\ &= (bm(t) - b^m) \mathcal{G}_{\text{зад}} - (a_{12} + bk_2(t) - a_2^m) \ddot{x} - \\ &\quad - (a_{11} + bk_1(t) - a_1^m) \dot{x} - (bk_0(t) - a_0^m) x, \end{aligned}$$

где $e = x - \hat{x}$.

Обозначим правую часть полученного выражения как σ_1 . Выберем функцию Ляпунова [7]:

$$V = 0,5\sigma_1^2.$$

Для выполнения условия устойчивости производная функции Ляпунова должна быть отрицательной [7], т.е.

$$\dot{V} = \sigma_1 \dot{\sigma}_1 < 0.$$

Для выполнения указанного условия должны быть отрицательными слагаемые, содержащие производные настраиваемых коэффициентов управления из выражения (3) ($m(t)$, $k_0(t)$, $k_1(t)$, $k_2(t)$), т.е. должны выполняться следующие соотношения:

$$(12) \begin{cases} \sigma_1 b \dot{m}(t) \mathcal{G}_{\text{зад}} < 0, \\ -\sigma_1 b \dot{k}_2(t) \ddot{x} < 0, \\ -\sigma_1 b \dot{k}_1(t) \dot{x} < 0, \\ -\sigma_1 b \dot{k}_0(t) x < 0. \end{cases}$$

Для рассматриваемого объекта управления $b = a_2 a_5 + a_3 a_4 < 0$, соответственно условия (12) будут выполняться при $\dot{m}(t) = \sigma_1 u$, $\dot{k}_2(t) = -\sigma_1 \ddot{x}$, $\dot{k}_1(t) = -\sigma_1 \dot{x}$, $\dot{k}_0(t) = -\sigma_1 x$. Таким образом, можно определить формулы для вычисления настраиваемых коэффициентов управления:

$$(13) \begin{cases} m(t) = \lambda \mathcal{G}_{\text{зад}} \int \sigma_1 dt + m^0, \\ k_2(t) = -\lambda \ddot{x} \int \sigma_1 dt + k_2^0, \\ k_1(t) = -\lambda \dot{x} \int \sigma_1 dt + k_1^0, \\ k_0(t) = -\lambda x \int \sigma_1 dt + k_0^0; \end{cases}$$

где $\lambda = \text{const} > 0$ – это скорость подстройки коэффициентов, а учетом (11),

$$(14) \int \sigma_1 dt = \int (\ddot{e} + a_2^m \ddot{e} + a_1^m \dot{e} + a_0^m e) dt = \ddot{e} + a_2^m \dot{e} + a_1^m e + a_0^m \int e dt.$$

Сигнал \ddot{e} примем равным 0, так как сигнал \ddot{x} не измеряется системой, а введение дифференцирующего звена внесет помехи в работу системы. Итак, выражение (14) примет вид:

$$\int \sigma_1 dt = a_2^m \dot{e} + a_1^m e + a_0^m \int e dt.$$

Подставив (12) и (13) в (3), получим закон управления:

$$(15) \delta_{\text{зад}} = \lambda (a_2^m \dot{e} + a_1^m e + a_0^m \int e dt) (\mathcal{G}_{\text{зад}}^2 + \dot{x}^2 + x^2).$$

Указанный закон управления (15) реализуется в блоке «Регулятор» на рис. 2.

5. Цифровое исполнение синтезированных систем автоматического управления

Поскольку реализация разрабатываемых систем автоматического управления предполагается цифровой, перейдем к цифровым моделям.

Чтобы свести возникающие при оцифровке погрешности в работе системы к минимуму, необходимо выбрать период дискретизации. Для его определения можно воспользоваться теоремой Котельникова [3]: период дискретизации можно найти из следующего соотношения:

$$T_0 \leq \frac{\pi}{2\omega_{\text{гп}}},$$

где $\omega_{\text{гп}}$ – граничная частота, определяющаяся следующим образом: $20 \lg(\omega_{\text{гп}}) \leq -20$ Дб.

Минимально допустимый период дискретизации определим из ЛАЧХ разомкнутой системы. ЛАЧХ объекта управления, рассмотренного в разделе 3, с синтезированной в разделе 4 функционально-адаптивной системой автоматического управления представлена на рис. 8.

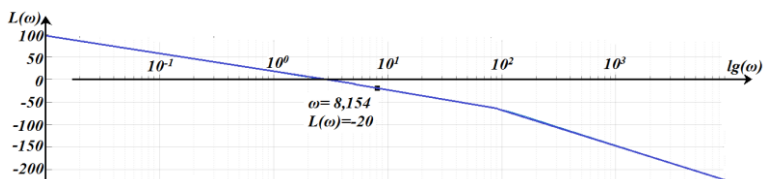


Рис. 8. ЛАЧХ системы с функционально-адаптивной системой автоматического управления

Из ЛАЧХ определим точку, соответствующую $L(\omega_{\text{гп}}) = -20$ Дб. Итак, $\omega_{\text{гп}} = 8,154$ рад/с, соответственно, минимально допустимый период дискретизации должен быть равен $T_0 = 0,193$ с. При моделировании $T_0 = 0,2$ с.

Цифровыми являются все блоки синтезированных систем автоматического управления, за исключением блоков «Объект управления».

6. Моделирование

Моделирование производилось в среде Simulink. Структурная схема модели представлена на рис. 9.

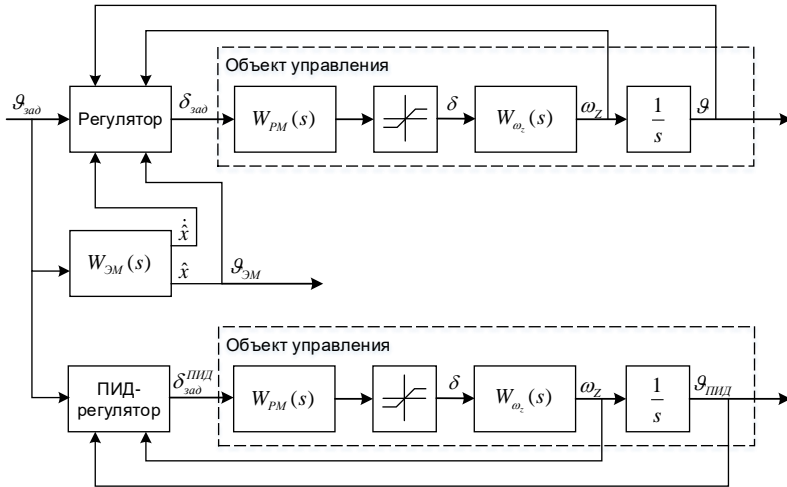


Рис. 9. Структурная схема модели функционально-адаптивной системы автоматического управления в канале угла тангажа

В модели в блоках $W_{\omega_z}(s)$ реализована передаточная функция, полученная из системы дифференциальных уравнений (1). В блоках $W_{PM}(s)$ реализована передаточная функция рулевой машины (2) для оценки ее влияния на динамику системы.

В блоке $W_{ЭМ}(s)$ реализована передаточная функция эталонной модели (6). В блоке «Регулятор» производится вычисление управляющего воздействия согласно (15).

Предлагаемая функционально-адаптивная система автоматического управления в процессе моделирования сравнивалась с системой управления, построенной с использованием ПИД-регулятора, синтезированного частотным методом [5, 8, 13] и реализованного в блоке «ПИД-регулятор».

Поскольку решались задачи нивелирования возможных внешних воздействий и минимизации зависимости от точности предварительного расчета параметров, проводилось моделиро-

вание для функционально-адаптивной системы автоматического управления при заданном значении угла тангажа, равном 1^0 и 10^0 при штормовом ветре, начинающем действовать на 5 секунде. Штормовым является ветер, скорость которого $\sim 23,5$ м/с (ветер 9 баллов). Результаты моделирования представлены на рис. 11–14.

Внешнее воздействие моделировалось в соответствии с рис. 10, на котором изображен укрупненный блок $W\omega_z(s)$, представленный на рис. 9

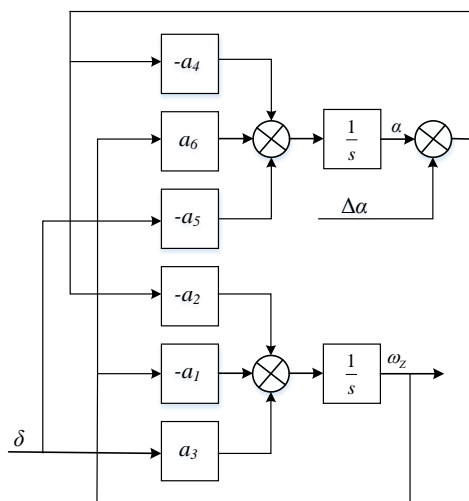


Рис. 10. Структурная схема модели воздействия ветра в канале угла тангажа

Отклонение угла атаки при ветровом возмущении вычислялось по формуле

$$(16) \Delta\alpha = \frac{V - W \cos \Theta}{\sqrt{V^2 + W^2 - 2VW \cos \Theta}},$$

где $V = const$ – скорость движения объекта; $W = const$ – скорость ветра; $\Theta = const$ – угол наклона траектории.

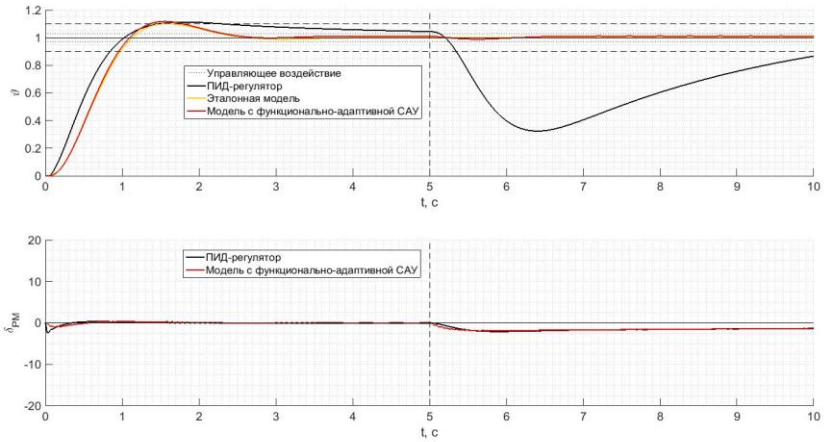


Рис. 11. Результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы управления при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1

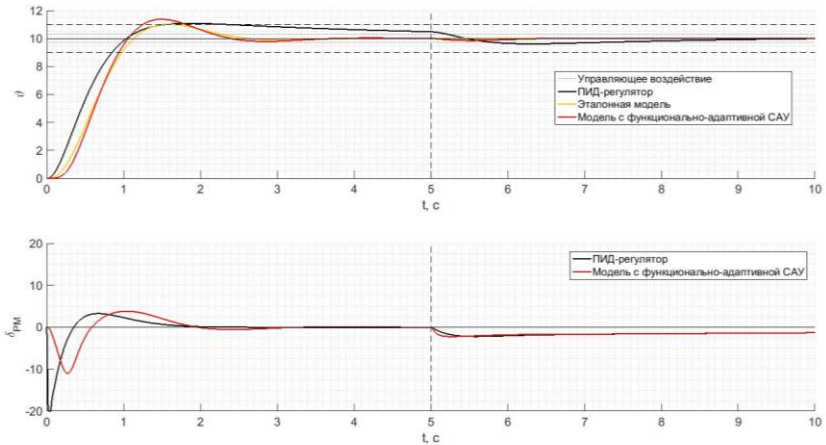


Рис. 12. Результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы управления при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1, при $\lambda = 0,001$

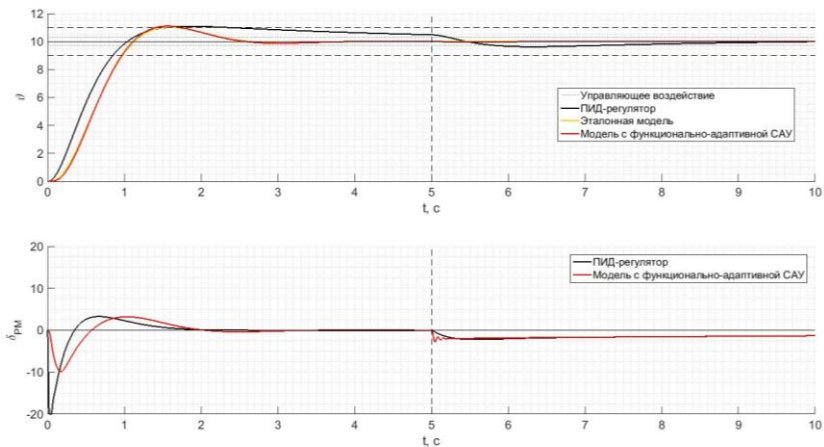


Рис. 13. Результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы управления при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 10, при $\lambda = 0,004$

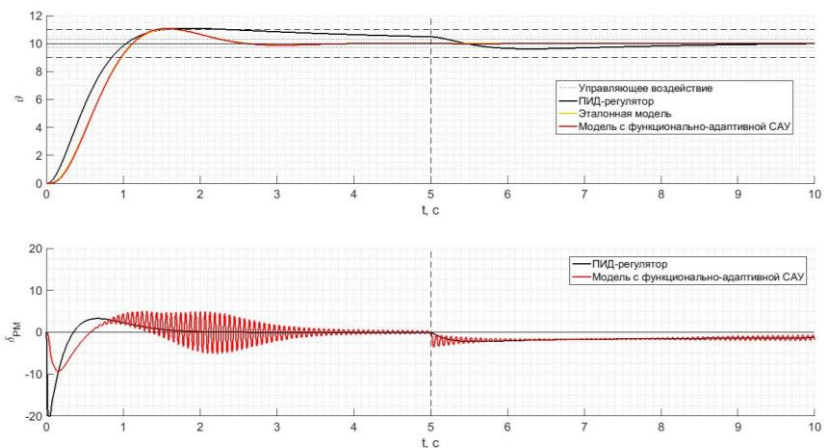


Рис. 14. Результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы управления при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 10, при $\lambda = 0,007$

Как видно из результатов моделирования работы функционально-адаптивной системы, представленных на рис. 11–14, переходные процессы по углу тангажа имеют характеристики, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Результаты моделирования работы функционально-адаптивной системы управления при порыве штормового ветра

№ рисунка		11	12	13	14
Требуемый угол тангажа, °		1	10	10	10
Модель с адаптивной САУ	Скорость подстройки коэффициентов	0,02	0,001	0,004	0,007
	Время переходного процесса, с	1	1	1	1
	Перерегулирование, %	10	14	10	10
	Статическая ошибка, %	0	0	0	0
	Время подавления внешних возмущений, с	0	1	0	0
	Наличие колебаний рулей высоты	нет	нет	нет	есть
Модель с ПИД-регулятором	Время переходного процесса, с	0,8	0,8	0,8	0,8
	Перерегулирование, %	10	10	10	10
	Статическая ошибка, %	0	0	0	0
	Время подавления внешних возмущений, с	6	3	3	3
	Наличие колебаний рулей высоты	нет	нет	нет	нет

Функционально-адаптивная система позволяет справляться с внешним воздействием (порыв штормового ветра) намного лучше ПИД-регулятора: угол тангажа практически не отклоняется от установившегося значения. Однако при увеличении заданного воздействия возникает необходимость уменьшать коэффициент скорости подстройки коэффициентов λ , так как может возникнуть колебательность при отклонении рулей (рис. 14), что повышает нагрузку на них. Не следует и слишком сильно уменьшать коэффициент скорости подстройки коэффициентов λ , так как система начинает хуже справляться с внешним воздействием (рис. 12 и 13).

Проводилось моделирование для цифровой функционально-адаптивной системы автоматического управления, описанной в разделе 5. Результаты моделирования представлены на рис. 15 и 16.

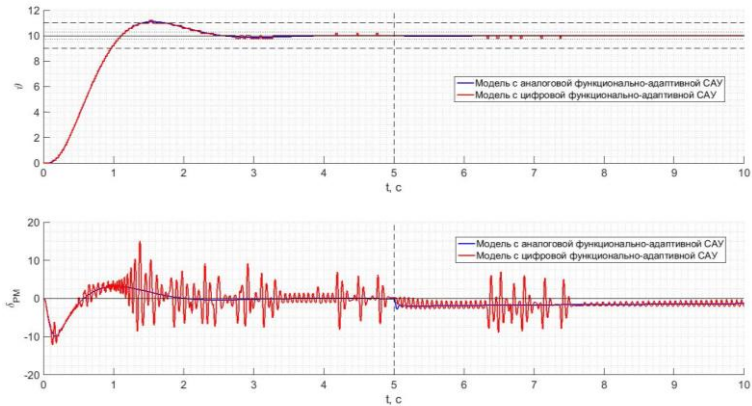


Рис. 15. Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой функционально-адаптивной системы управления, при $\lambda = 0,004$

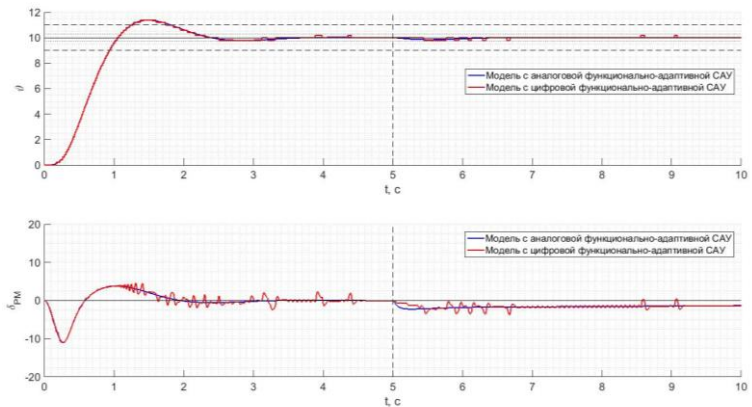


Рис. 16. Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой функционально-адаптивной системы управления, при $\lambda = 0,001$

Как видно из результатов моделирования работы функционально-адаптивной системы, представленных на рис. 15 и 16, переходные процессы по углу тангажа имеют характеристики, представленные в таблице 4.

По сравнению с аналоговой системой, цифровая требует меньшего коэффициента скорости подстройки коэффициентов λ , что приводит к незначительному увеличению перерегулирования (от 10% до 14%).

Таблица 4. Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой функционально-адаптивной системы управления

№ рисунка		15	16
Требуемый угол тангажа, °		10	10
Модель с аналоговой САУ	Скорость подстройки коэффициентов	0,004	0,001
	Время переходного процесса, с	1	1
	Перерегулирование, %	10	14
	Статическая ошибка, %	0	0
	Время подавления внешних возмущений, с	0	1
	Наличие колебаний рулей высоты	нет	нет
Модель с цифровой САУ	Скорость подстройки коэффициентов	0,004	0,001
	Время переходного процесса, с	1	1
	Перерегулирование, %	10	14
	Статическая ошибка, %	0	0
	Время подавления внешних возмущений, с	0	0
	Наличие колебаний рулей высоты	есть	есть

Также проводилось моделирование работы функционально-адаптивной систем автоматического управления при движении по заданной траектории. В этом случае в модели рис. 9 в блоке $W\omega_z(s)$ динамические параметры были являлись функциями $a_1(t)$, $a_2(t)$, $a_3(t)$, $a_4(t)$, $a_5(t)$, $a_6(t)$, значения которых изменялись в соответствии с рис. 4. Кроме того, переменные (16) также являлись функциями от времени: $V(t)$, $W(t)$, $\Theta(t)$. Значение $\vartheta_{зад}$ также является функцией от времени, изменяющейся таким образом, чтобы движение осуществлялось согласно рис. 5. Резуль-

таты моделирования представлены на рис. 17. При движении по заданной траектории на 2 секунде произошло изменение среды движения и на объект управления начал действовать штормовой ветер.

Как видно из результатов моделирования работы функционально-адаптивной системы, представленных на рис. 17, функционально-адаптивная система обрабатывает заданное значение точнее системы с ПИД-регулятором.

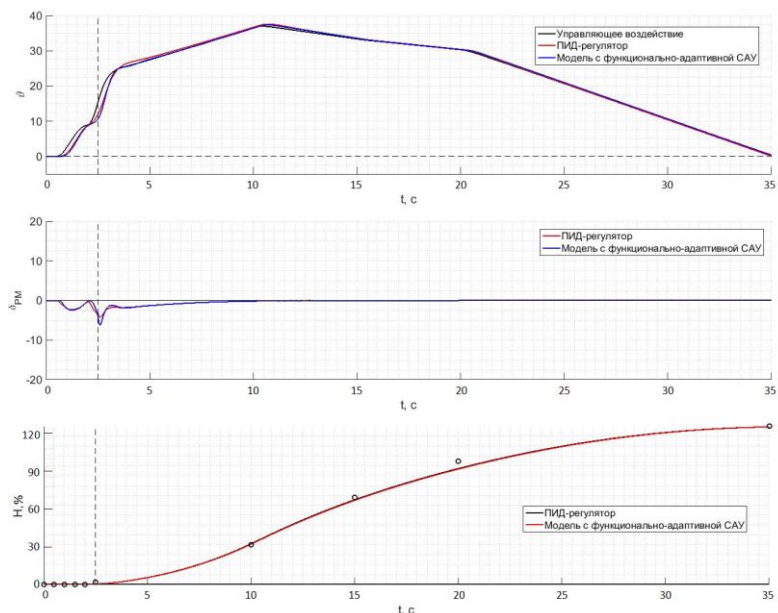


Рис. 17. Результаты моделирования работы цифровых ПИД-регулятора и функционально-адаптивной системы управления при движении объекта по заданной траектории в течении 35 с

7. Заключение

В статье предложена функционально-адаптивная система автоматического управления мультисредным объектом.

Существенным преимуществом разработанной системы управления является ее способность быстро адаптироваться

к внешним воздействиям и независимость от вычисления динамических параметров объекта. Недостатком является излишняя колебательность, которая проявляется при увеличении задающего воздействия и коэффициента скорости подстройки коэффициентов управления, что повышает нагрузку на привод и органы управления объектом.

Рассмотрен вариант системы в цифровом исполнении, при этом показано, что в динамическом режиме работы увеличивается перерегулирование, так как требуется меньший коэффициент скорости подстройки коэффициентов управления. Динамика функционально-адаптивной системы практически не изменяется.

Таким образом, в работе показано, что для решения задачи увеличения точности отработки объектом заданных воздействий и удержания постоянного состояния системы целесообразно, по сравнению с применяемыми ранее системами с ПИД-регулятором, использовать функционально-адаптивную систему автоматического управления. Внедрение такой системы позволит сократить затраты на модернизацию и внедрение новых систем управления за счет снижения требований к полноте математической модели объекта управления, а также повысит точность и эффективность работы системы в целом.

Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Г. *Оптимальные и адаптивные системы: Учебное пособие*. – М.: Высшая школа, – 1989.
2. БЕЗЯЕВ В.С., МАКАРЫЧЕВ П.П. *Идентификация параметров моделей объектов методом регрессионного анализа* // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – №1(53). – С. 19–27.
3. БИККЕНИН Р.Р., ЧЕСНОКОВ М.Н. *Теория электрической связи*. – М.: Издательский центр «Академия», 2010.
4. ДЕНИСЕНКО В.В. *ПИД-регуляторы: принцип построения и модификации* // Современные технологии автоматизации. – 2006. – №4. – С. 66–74.

5. ИГНАТЬЕВ А.А., ИГНАТЬЕВА С.А. *Основы теории автоматического управления: учеб. Пособие по курсу «Теория автоматического управления» для студентов машиностроительных специальностей.* – Саратов: СГТУ, 2009.
6. ЛАЩЁВ А.Я. *Синтез адаптивных систем управления с использованием идеи параметрических отрицательных обратных связей* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №3.
7. ПОПОВ Е. П. *Динамика систем автоматического регулирования.* – М: Государственное изд-во технико-теоретической лит-ры, 1954.
8. ПУПКОВ К.А. *Моделирование и испытание систем автоматического управления: выставочные материалы.* – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
9. РЕМЕНЬ – САФИ. *Большая советская энциклопедия: Т. 22 / Гл. ред. А.М. Прохоров.* – М.: Советская энциклопедия, 1975.
10. СЕЛЕЗНЕВА А.Е., НЕРЕТИН Е.С. *Параметрически-адаптивная система автоматического управления* // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2022: сборник трудов XV Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященный празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 74-летия Иркутского авиационного колледжа 8-9 декабря 2022 г. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА. – 2023. – Т. 1 – С. 112–118.
11. СЕЛЕЗНЕВА А.Е., НЕРЕТИН Е.С. *Применение параметрически-адаптивной системы автоматического управления для объекта с широким диапазоном изменения аэродинамических параметров.* // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2023): материалы мультиконференции. – Волгоград: ВолгГТУ, 2023. – Т. 3 – С. 123–125.
12. ФУРТАТ И.Б. *Адаптивное управление неминимально-фазовыми объектами определенного класса* // Проблемы управления. – 2013. – №1. – С. 19–25.

13. ЩЕПЕТОВ А.Г. *Об оптимальных формах переходного процесса и амплитудно-частотной характеристики линейной динамической системы* // Проблемы управления. – 2008. – №3. – С. 30–36.
14. BARKANA I. *Adaptive control? But is so Simple!* // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2016 – No. 83 – С. 3-34.
15. BARKANA I. *Output feedback stabilizability and passivity in nonstationary and nonlinear systems* // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2010 – No. 7 – P. 568–591.
16. BARKANA I. *Simple adaptive control – a stable direct model reference adaptive control methodology – brief survey* // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2014. – No. 28 – P. 567–603.
17. GAO Q.Z., XIE X.J. *Robustness analysis of discrete-time indirect model reference adaptive control with normalized adaptive laws* // Int. Journal of Automation and Computing. – 2010. – No. 3. – P. 381–388.
18. IWAI Z., MIZUMOTO I. *Realization of simple adaptive control by using parallel feedforward compensator* // Int. Journal of Control. – 1994. – Vol. 59, No. 6. – P. 1543–1565.
19. KANNAN S.K., CHOWDHARY G.V., JOHNSON E.N. *Adaptive control of unmanned aerial vehicles: Theory and flight tests* // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. – Springer, 2015. – P. 613–673.
20. KAUFMAN H., BAR-KANA I., SOBEL K. *Direct adaptive control algorithms*. – N.Y.: Springer-Verlag, 1994.
21. LAVRETSKY E. *Robust and Adaptive Control Methods for Aerial Vehicles* // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, Dordrecht, 2015. – P. 675–710.

FUNCTIONAL ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-ENVIRONMENT VEHICLE

Anna Selezneva, Moscow Aviation Institute, Moscow, graduate student (seleznevae@yandex.ru).

Evgeny Neretin, Moscow Aviation Institute, Moscow, (evgeny.neretin@gmail.com)

Abstract: This article presents the results of a research of the possibility of using a digital functionally adaptive automatic control system with a reference model synthesized by the method of component-by-component control formation, for the pitch channel of an unmanned vehicle, assuming movement in two environments (water and air). The objects dynamic parameters can vary over a wide range of values. Presents the results of modeling the operation of the digital and the analog functionally adaptive automatic control systems in the flight against the influence of external influences, such as a gust of stormy wind, under various control influence, as well as the results the operation of the system when the object moves along a given trajectory are present. A key feature of the application of a functionally adaptive automatic control system is its ability to adapt to new conditions without the need to change system settings. The principle of operation of the adaptation circuit is based on the calculation of the control action from the mismatch between the signals taken from the sensors and signals of the reference model. The integration of such a system will reduce the cost of modernization and implementation of new control systems.

Keywords: automatic control system, functionally adaptive automatic control system, reference model, self-adjusting control system.

УДК 62.50

ББК 30

DOI: 10.25728/ubs.2024.109.3

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

Поступила в редакцию 22.12.2023.

Опубликована 31.05.2024.