



Научная статья

УДК 62-503.57

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188280>

EDN: <https://www.elibrary.ru/MSQURC>

ЦИФРОВАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

А.Е. Селезнева 

Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт
приборостроения», г. Москва, Россия

 seleznevae@yandex.ru

Цитирование: Селезнева А.Е. Цифровая адаптивная система автоматического управления объектом с эталонной моделью // Труды МАИ. 2026. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188280>

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты исследования влияния оцифровки адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью на качество ее работы. В качестве объекта управления рассмотрен канал тангажа беспилотного аппарата самолетного типа. Принцип действия адаптивной системы с эталонной моделью заключается в вычислении управляющего воздействия, исходя из разницы между реальным состоянием объекта управления и состоянием эталонной модели. В качестве эталонной модели предлагается применить модель, разработанную с помощью частотного метода синтеза. Для проведения оцифровки разработанной системы, выполняются следующие действия: определяется структура системы, выявляются блоки системы, для цифрового и аналогового исполнений, производится оцифровка для каждого из блоков, предназначенных для цифрового исполнения.

Ключевые слова: система автоматического управления; адаптивная система автоматического управления; эталонная модель; цифровая система автоматического управления.

DIGITAL ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH A REFERENCE MODEL OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.E. Selezneva✉

Joint-Stock Company «State Research Institute of Instrument Engineering»,

Moscow, Russia

✉ seleznevaae@yandex.ru

Citation: Selezneva A.E. Digital adaptive automatic control system with a reference model of an unmanned aerial vehicle // Trudy MAI. 2026. No. 148. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188280>

Abstract. This article presents the results of a study of the impact of digitization of an adaptive automatic control system with a reference model on the quality of its work. The pitch channel of an aircraft-type unmanned aerial vehicle is considered as an object of control. The principle of operation of an adaptive system with a reference model is to calculate the control effect based on the difference between the actual state of the control object and the state of the reference model. As a reference model, it is proposed to apply a model developed using the frequency synthesis method. To carry out the digitization of the developed system, the following actions are performed: the system structure is determined, the system blocks for digital and analog versions are identified, digitization is performed for each of the blocks intended for digital execution.

Keywords: automatic control system; adaptive automatic control system; reference model, digital automatic control system.

Введение

Одной из важнейших проблем при разработке систем автоматического управления является проблема формирования правильной математической модели объекта управления. Существует множество препятствий на пути точной оценки динамических параметров объекта управления. Например, высока вероятность не учесть все возможные факторы, влияющие на объект. Однако, точность определения динамических параметров движения объекта является критичной для современных методов формирования управляющего воздействия. Для решения задачи повышения точности математической модели в основном

используются методы исследования объекта управления, такие как наземные испытания, летные испытания и т.д. [1]. Также, для решения указанной проблемы предлагается использовать контур адаптации, встроенный в систему автоматического управления.

Существуют различные виды адаптивных систем автоматического управления [3,1,12,13,16,9,10,15,14,11]. В настоящем исследовании рассматривается адаптивная система автоматического управления с эталонной моделью. Принцип работы такой системы заключается в нивелировании рассогласования между текущими реальными состояниями объекта управления и расчётными состояниями эталонной модели.

Несмотря на большое обилие рассматриваемых систем, в основном в работах предлагаются расчеты для контура адаптации, представленного в аналоговом исполнении. Однако, в настоящее время подавляющее большинство систем автоматического управления являются цифровыми. Цифровые системы автоматического управления обладают рядом преимуществ по сравнению с аналоговыми: гибкость и масштабируемость разрабатываемой системы, простота обслуживания и модернизации, возможность интеграции с другими системами.

В настоящем исследовании представлены результаты исследования работы адаптивной системы, рассмотренной в [7], синтезированной в цифровом исполнении.

Понятие 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 [6].

Основными направлениями развития подобных систем являются системы с алгоритмом адаптации на основе эталонной модели и на основе некоего числового критерия качества. В большинстве исследований на тему применения адаптивной

системы автоматического управления рассматриваются аналоговые алгоритмы адаптации. Однако, в настоящее время большинство систем являются цифровыми.

В настоящей статье рассмотрена адаптивная система автоматического управления с эталонной моделью. Принцип работы такой системы подробно рассмотрен в [7]. Основная идея заключается в приведении текущих состояний объекта управления к расчётным состояниям эталонной модели. Алгоритм адаптации заключается в минимизации рассогласования между указанными состояниями.

Функциональная схема адаптивной системы автоматического управления, синтезированной в [7], представлена на рисунке 1.

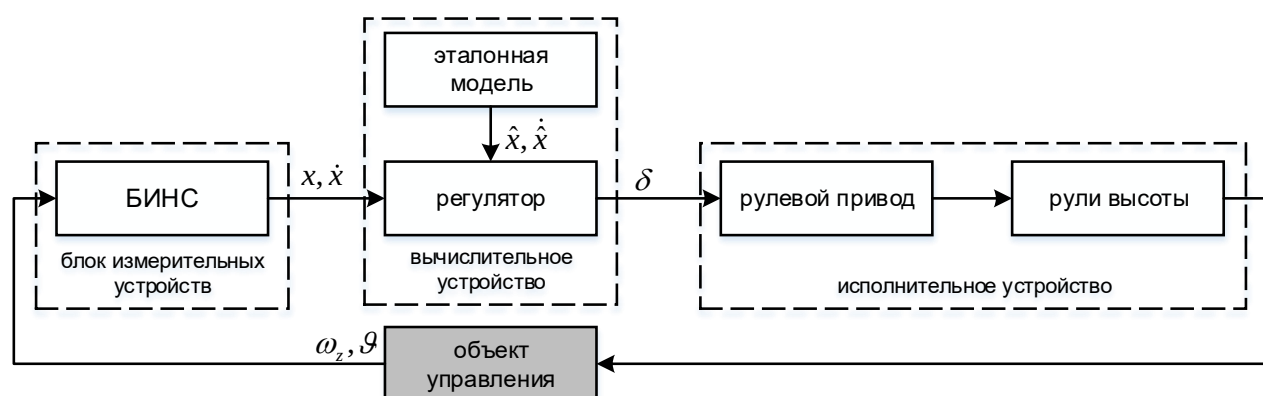


Рисунок 1 - Функциональная схема адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью

Разработанная система автоматического управления представляет собой совокупность нескольких функциональных блоков:

- блок измерительных устройств;
- вычислительное устройство;
- исполнительное устройство.

Данные о текущих состояниях объекта управления (данные о текущих значениях угловой скорости по оси Z и о текущем угле тангажа, формируемые в БИНС) передаются в вычислительное устройство. Вычислительное устройство представляет собой два микропроцессора, один из которых на каждом такте вычисляет текущие состояния эталонной модели, а второй на каждом такте производит вычисление управляющего воздействия по закону управления,

разработанном в [7]. Из вычислительного устройства управляющее воздействие передается на исполнительное устройство, которое представляет собой совокупность рулевого привода и рулей высоты, отклонение которых обеспечивает изменение угла тангажа.

Математическая модель объекта

Рассматриваемый в настоящем исследовании объект управления представляет собой идеальную модель короткопериодического движения беспилотного аппарата самолетного типа в канале угла тангажа (рисунок2).

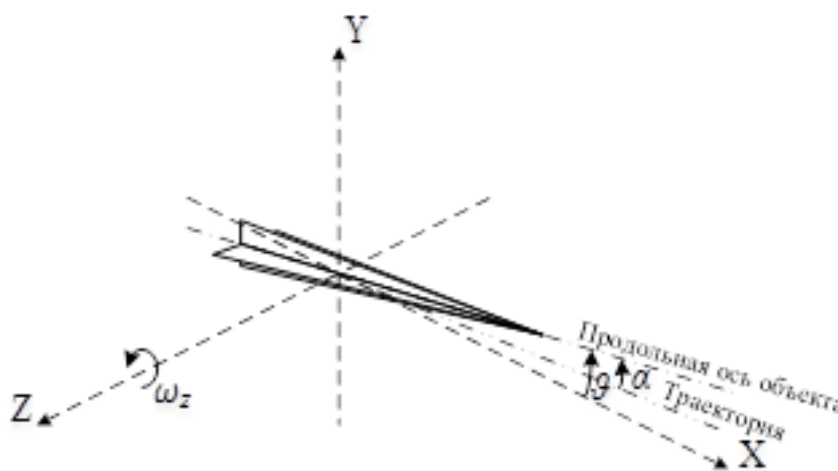


Рисунок 2 - Схема движения беспилотного аппарата в канале угла тангажа

Объект управления, согласно [5], описывается системой дифференциальных уравнений вида:

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

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

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

Номинальные значения динамических параметров представлены в таблице 1. Параметры известны с точностью $\pm 20\%$.

Требования, предъявляемые к переходному процессу по углу тангажа:

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

Таблица 1

Значения динамических параметров ОУ

Параметр	a1	a2	a3	a4	a5
Значение	0.4	10	-5	21	1

Цифровая система автоматического управления

Для того, чтобы сформировать цифровую систему, представим функциональную схему, изображенную на рисунке 1 с указанием цифровой и аналоговой частей. Функциональная схема цифровой адаптивной системы автоматического управления представлена на рисунке 3.

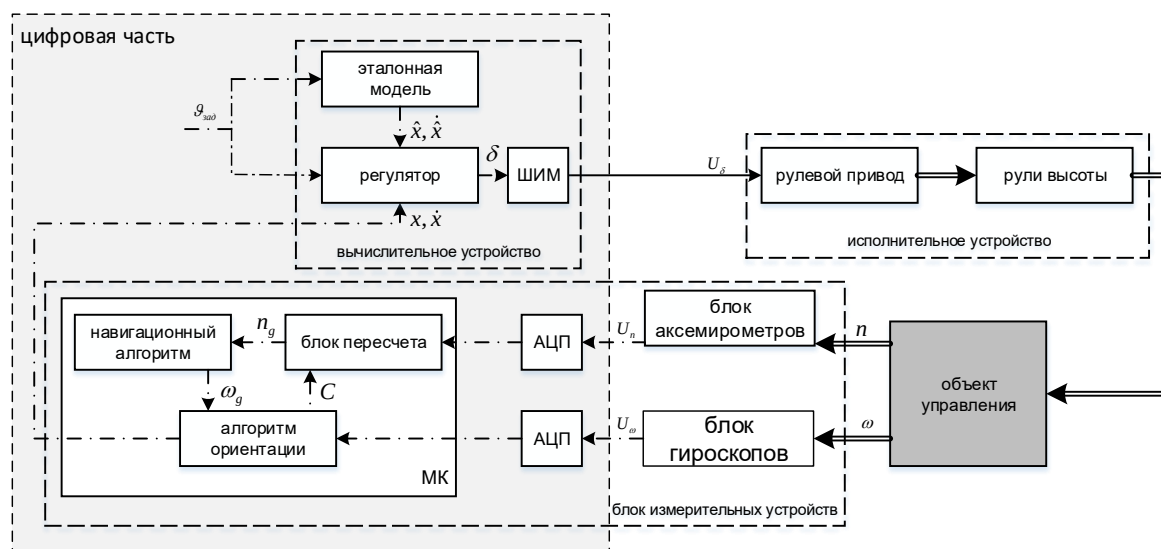


Рисунок 3 - Функциональная схема цифровой адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью

Цифровая часть включает в себя блок измерительных устройств и вычислительное устройство. В блоке вычислительных устройств физические значения ускорений и угловых скоростей измеряются с помощью акселерометров и гироскопов, значения с которых преобразуются в цифровой код, а затем, в

микроконтроллере БИНС, на их основе вычисляются соответствующие значения угла тангажа и угловой скорости по оси Z. Далее, цифровой код передается в микроконтроллер блока «регулятор», совместно с цифровым кодом, соответствующим расчетным состояниям эталонной модели в текущий момент времени, вычисленным в микроконтроллере блока «эталонная модель». На основании полученных данных, вычисляется цифровой код, соответствующий управляющему воздействию, который через ШИМ преобразуется в управляющее напряжение. Управляющее напряжение передается на рулевой привод, откуда механически передает сигнал на рули высоты, что, в свою очередь, формирует управление углом тангажа.

Итак, синтезированная система является достаточно сложной структурой, включающей в себя несколько цифровых блоков. Соответственно, их оцифровка должна производиться отдельно. Задачу оцифровки разработанной системы можно свести к выбору периода дискретизации.

При моделировании, блок вычислительных устройств можно представить следующим образом: АЦП, установленные на каналы угловой скорости по оси Z и угла тангажа объекта управления.

Чтобы свести возникающие при погрешности в работе цифровой системы к минимуму, необходимо выбрать достаточно малый период дискретизации. Для его определения можно воспользоваться теоремой Шеннона-Котельникова [1]: 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:
 $20\lg(\omega_{\text{гп}}) \leq -20\text{Дб}.$

Цифровое исполнение блока «Эталонная модель». Состояния эталонной модели в каждый момент времени вычисляются в блоке «Эталонная модель». Структура эталонной модели для рассматриваемого объекта задается следующим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{\hat{x}} + a_2^m \dot{\hat{x}} + a_1^m \hat{x} + a_0^m \hat{x} = b^m \vartheta_{зад} \quad (2)$$

где a_2^m, a_1^m, a_0^m, b^m – динамические коэффициенты эталонной модели, $\hat{x}$ – текущее состояние эталонной модели, а $\vartheta_{зад}$ – требуемое состояние эталонной модели.

Определим период дискретизации блока «Эталонная модель». Для этого необходимо построить ЛАЧХ разомкнутой системы с использованием средств пакета Linear Analysis Simulink. Полученная ЛАЧХ представлена на рис. 4.

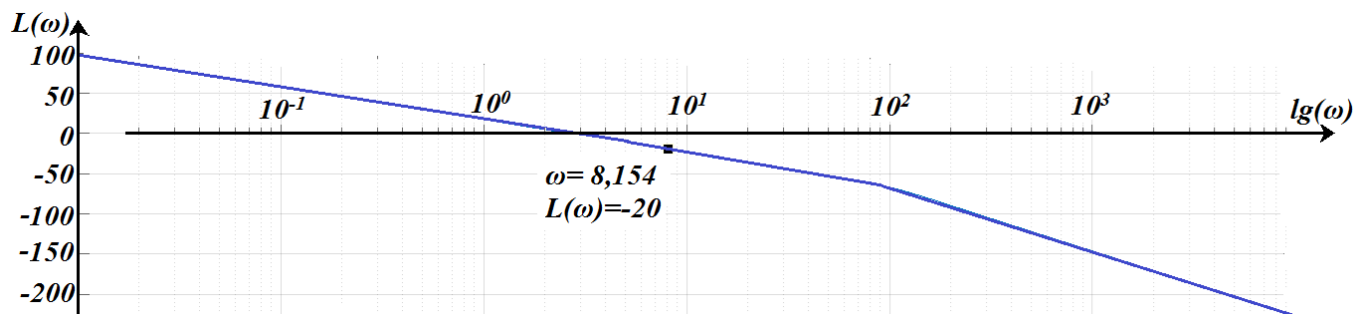


Рисунок – 4 ЛАЧХ разомкнутой системы

Из ЛАЧХ следует, что граничная частота $\omega_{гр} = 8.154 \text{ рад/с}$, соответственно максимально допустимый период дискретизации должен быть равен $T_0 = 0,193 \text{ с}$. В то же время, слишком малый период дискретизации может привести к повышению нагрузки на вычислительные мощности. При слишком малом периоде дискретизации, микроконтроллеры могут не успевать производить все необходимые вычисления, что приведет к ошибкам. При моделировании примем $T_0 = 0,1 \text{ с}$.

Для того, чтобы провести моделирование работы системы в цифровом исполнении, необходимо определить Z-передаточную функцию эталонной модели. Проведем билинейное преобразование [3]. Для этого необходимо представить в виде передаточной функции:

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

Для выполнения билинейного преобразования необходимо подставить следующее выражение в

$$s = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1} \quad (4)$$

Итак, Z-передаточная функция цифровой эталонной модели примет следующий вид:

$$W_{\mathcal{M}}^u(z) = \frac{z^3 b_3^u + z^2 b_2^u + z b_1^u + b_0^u}{z^3 + z^2 a_2^u + z a_1^u + a_0^u} \quad (5)$$

$$b_3^u = \frac{b^m T_0^3}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (6)$$

$$b_2^u = \frac{3b^m T_0^3}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (7)$$

$$b_1^u = \frac{3b^m T_0^3}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (8)$$

$$b_0^u = \frac{b^m T_0^3}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (9)$$

$$a_2^u = \frac{3a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 - a_2^m 4T_0 - 24}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (10)$$

$$a_1^u = \frac{3a_0^m T_0^3 - a_1^m 2T_0^2 - a_2^m 4T_0 + 24}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (11)$$

$$a_0^u = \frac{a_0^m T_0^3 - a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T_0 - 8}{a_0^m T_0^3 + a_1^m 2T_0^2 + a_2^m 4T + 8} \quad (12)$$

Динамика эталонных моделей в аналоговом и цифровом исполнениях представлены на рисунке 5.

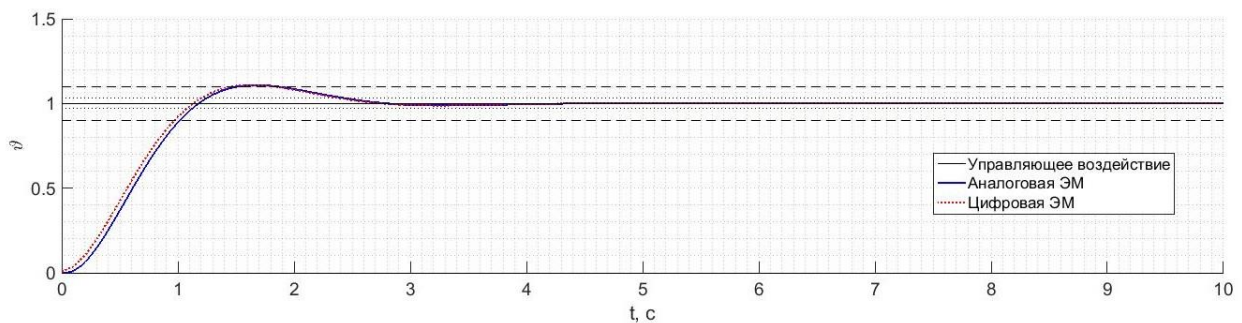


Рисунок 5 - Результаты моделирования динамики аналоговой и цифровой эталонных моделей

Цифровое исполнение блока «Регулятор»

Блок «Регулятор» содержит адаптивный закон управления:

$$\delta = \lambda \left(a_2^m \dot{e} + a_1^m e + a_0^m \int e dt \right) \left(\mathcal{G}_{\text{зад}}^2 + \dot{x}^2 + x^2 \right) \quad (13)$$

где, $\lambda = \text{const} > 0$ – это скорость подстройки коэффициентов, $x = \vartheta$ – текущий угол тангажа, $\dot{x} = \omega_z$ – угловая скорость по оси Z.

Итак, закон управления является произведением суммы входных сигналов на сумму произведений динамических коэффициентов эталонной модели на рассогласования между входными сигналами с ОУ и ЭМ. Соответственно, в цифровом виде при моделировании следует заменить только элемент интегратора на цифровой интегратор:

$$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T_0}{z-1} \quad (14)$$

Моделирование

Моделирование производилось в среде Simulink. Структурная схема модели представлена на рисунок 6.

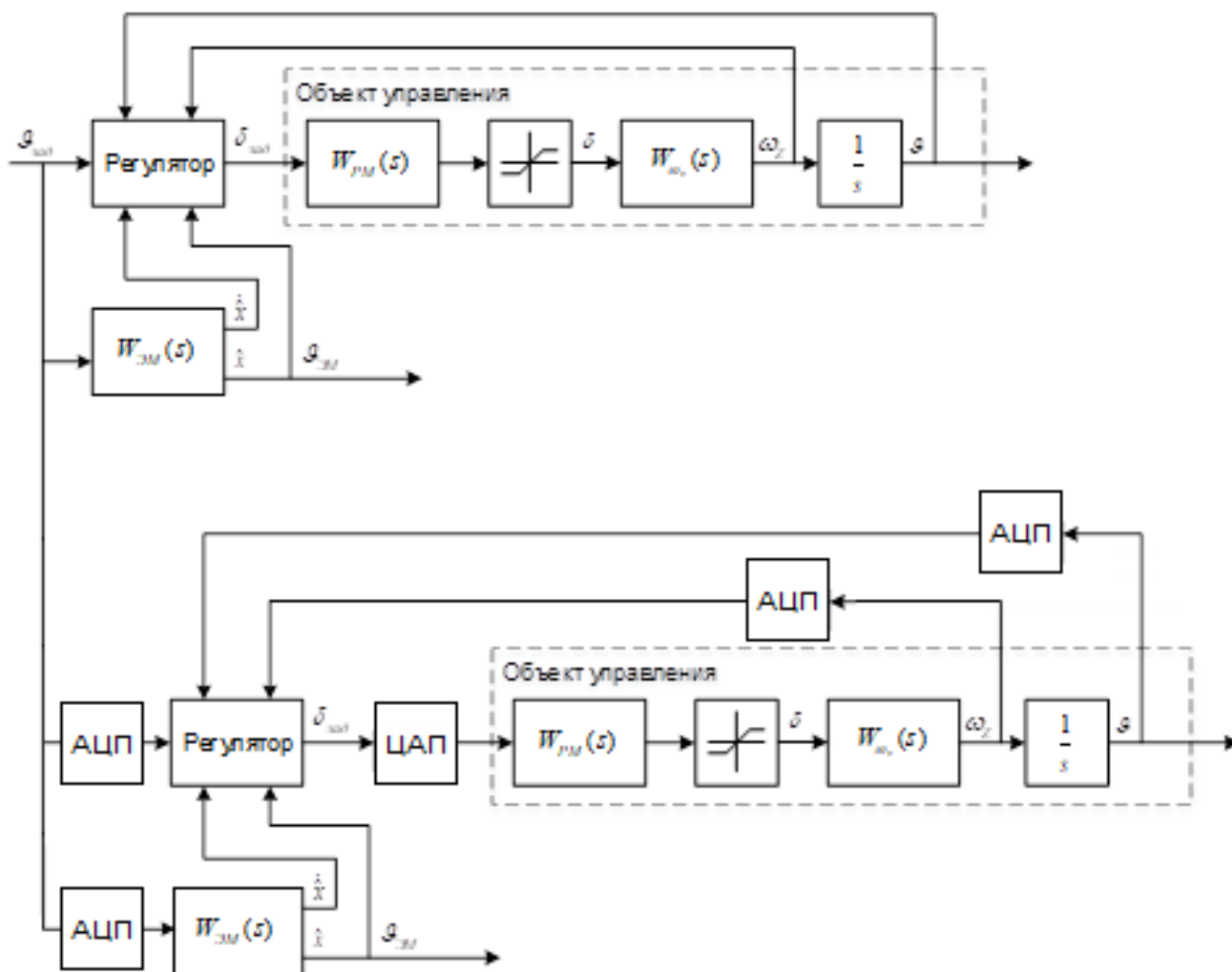


Рисунок 6 - Структурная схема модели цифровой адаптивной системы автоматического управления

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, для оценки ее влияния на динамику системы. Передаточная функция рулевой машины имеет следующий вид:

$$W_{PM}(s) = \frac{\delta}{\delta_{за\delta}} = \frac{1}{T_{PM}^2 s^2 + T_{PM} \xi_{PM} s + 1} \quad (15)$$

В блоке $W_{ЭМ}(s)$ реализована эталонная модель (3) в аналоговом исполнении и (5) в цифровом исполнении. В блоке «Регулятор», производится вычисление управляющего воздействия, согласно (13).

Внешнее воздействие моделировалось аналогично рассматриваемому в [7]. В качестве внешнего воздействия рассматривался порыв штормового ветра. Структурная схема блока $W_{\omega_z}(s)$ представлена на рисунке 7.

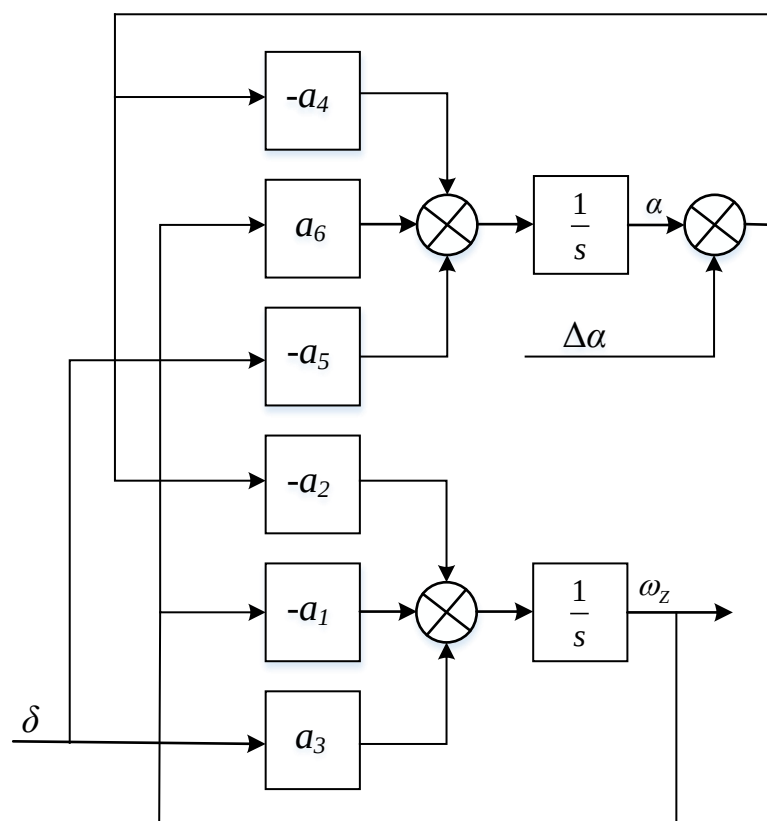


Рисунок 7 - Структурная схема блока $W_{\omega_z}(s)$

Отклонение угла атаки при ветровом возмущении вычислялось по формуле:

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

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

Проводилось моделирование работы синтезированной адаптивной системы автоматического управления при заданном угле тангажа $\vartheta_{зад}=1^\circ$, при скоростях подстройки коэффициентов $\lambda=0.05$ для аналогового контура и $\lambda=0.01$, $\lambda=0.015$ и $\lambda=0.03$. Также проводилось моделирование работы указанных систем для случая, если реальные динамические параметры объекта управления отличаются от вычисленных (примененных в эталонной модели) на $\pm 20\%$. Результаты моделирования представлены в таблице 2 и на рисунках 8 – 13.

Таблица 2

Результаты моделирования работы цифровой адаптивной системы управления

№ рисунка		8	9	10	11	12	13
λ		0.01	0.015	0.03	0.01	0.015	0.03
Диапазон отклонения динамических параметров, %		± 0	± 0	± 0	± 20	± 20	± 20
Время переходного процесса, с	Аналоговая система	1	1	1	1	1	1
	Цифровая система	0.9	0.95	1	0.9	0.9	0.98
Отклонение угла тангажа при внешнем воздействии, °	Аналоговая система	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	Цифровая система	0.8	0.5	0.2	1.3	0.8	0.4
Перерегулирование (σ), %	Аналоговая система	10	10	10	10	10	10
	Цифровая система	16	13	10	25	16	10
Наличие колебательности и выходов на предельные значения при отклонении рулей высоты		нет	нет	есть	нет	нет	нет

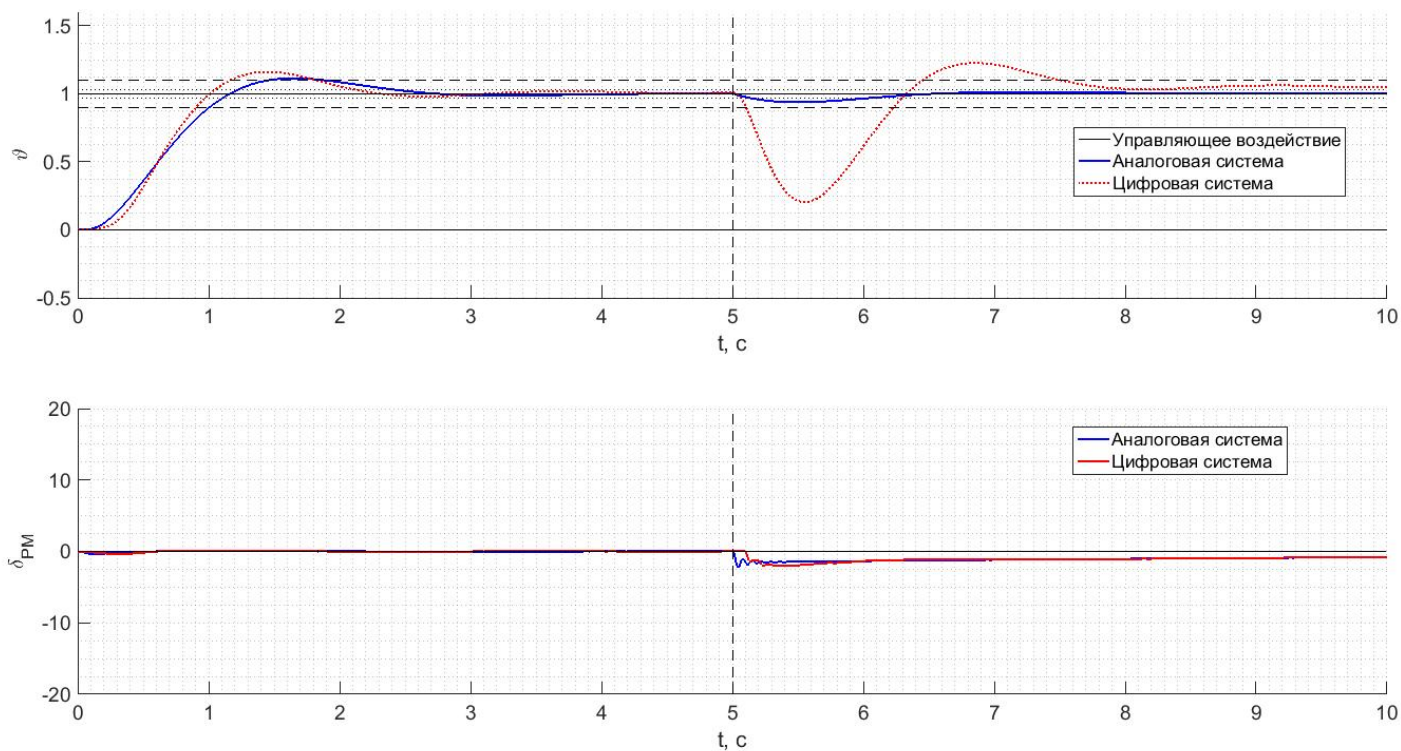


Рисунок 8 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1, при $\lambda = 0.01$

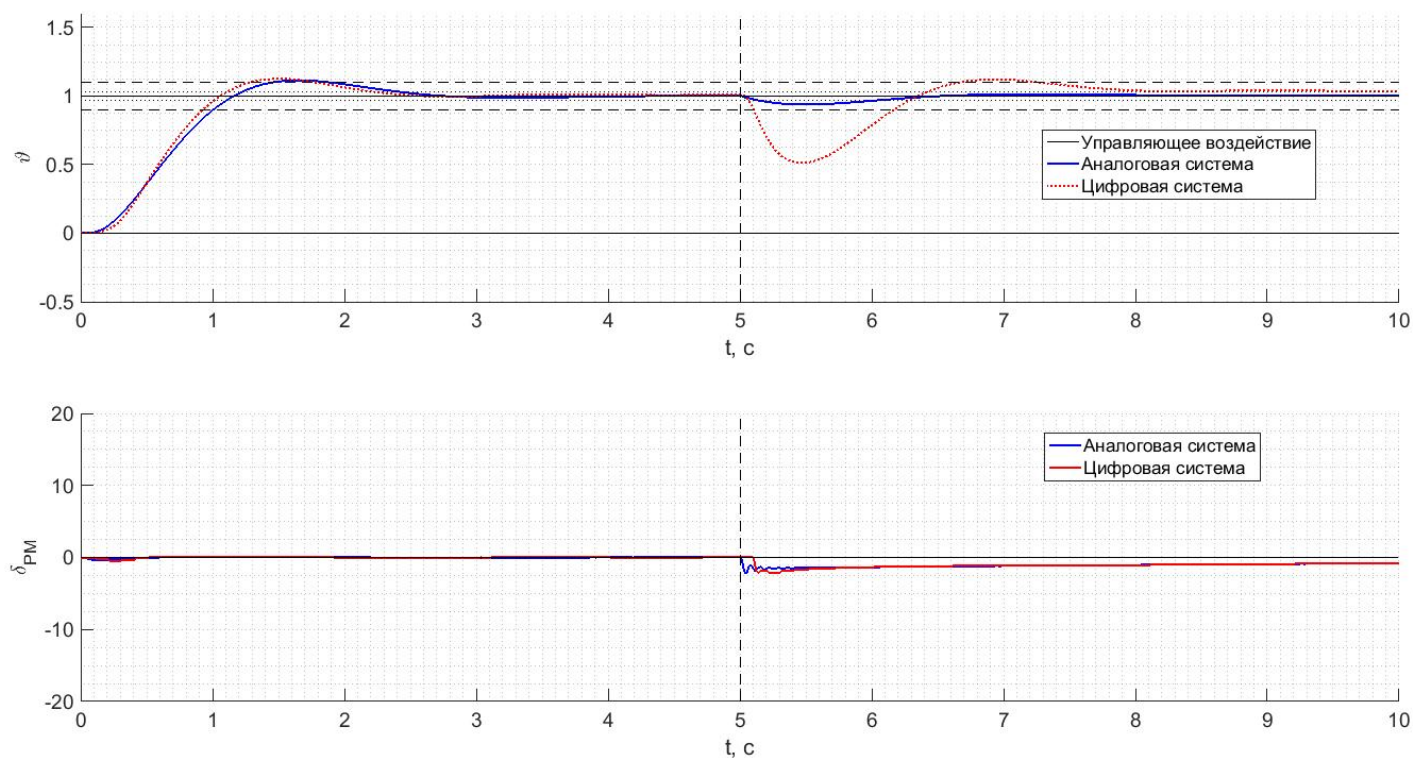


Рисунок 9 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1, при $\lambda = 0.015$

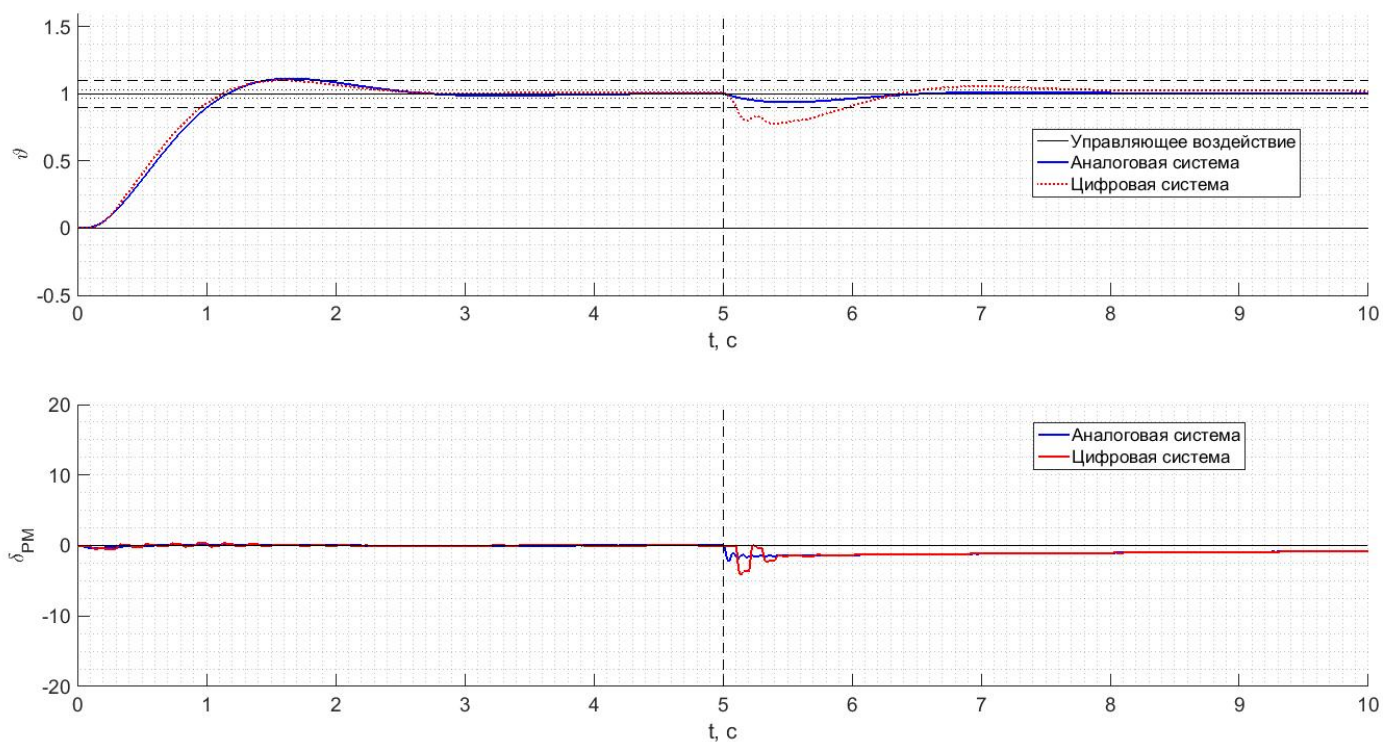


Рисунок 10 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1, при $\lambda = 0.03$

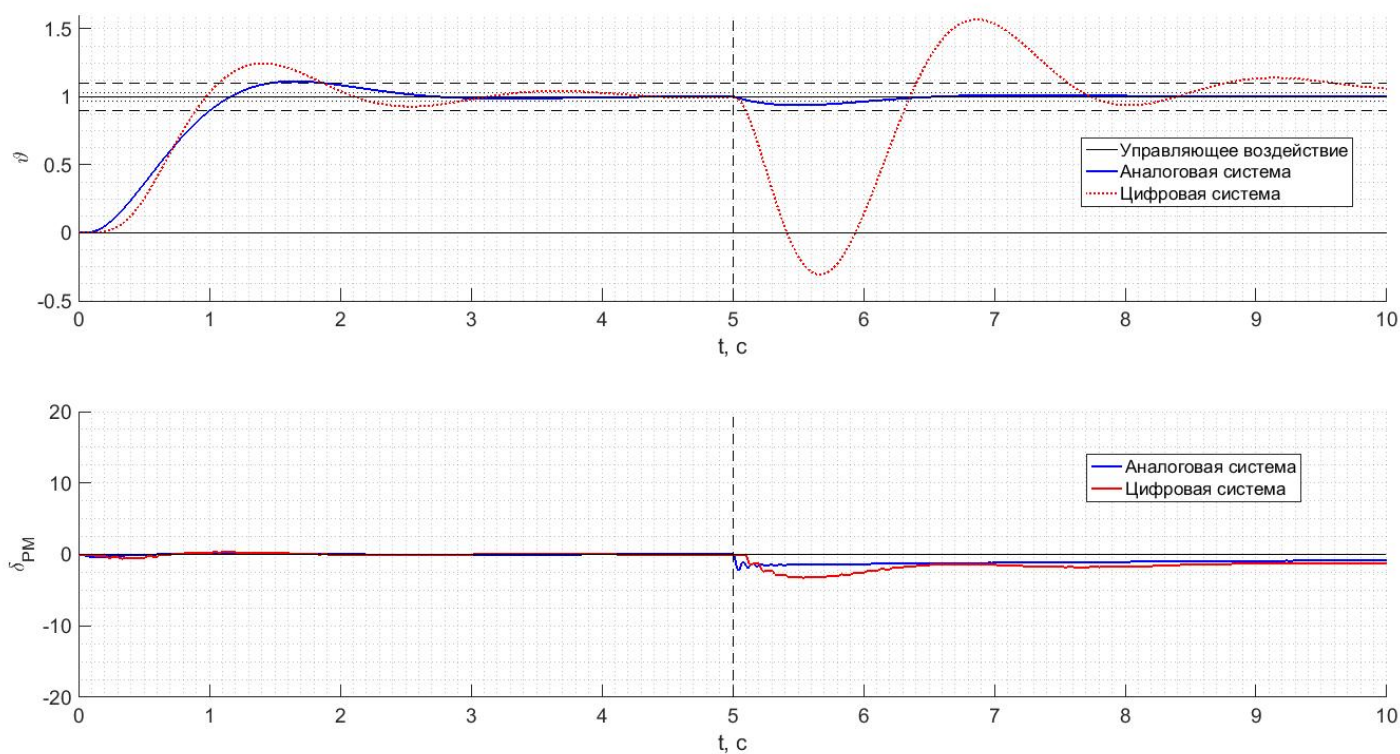


Рисунок 11 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1 для объекта, динамические параметры которого отклоняются от эталонного значения на $\pm 20\%$, при $\lambda = 0.01$

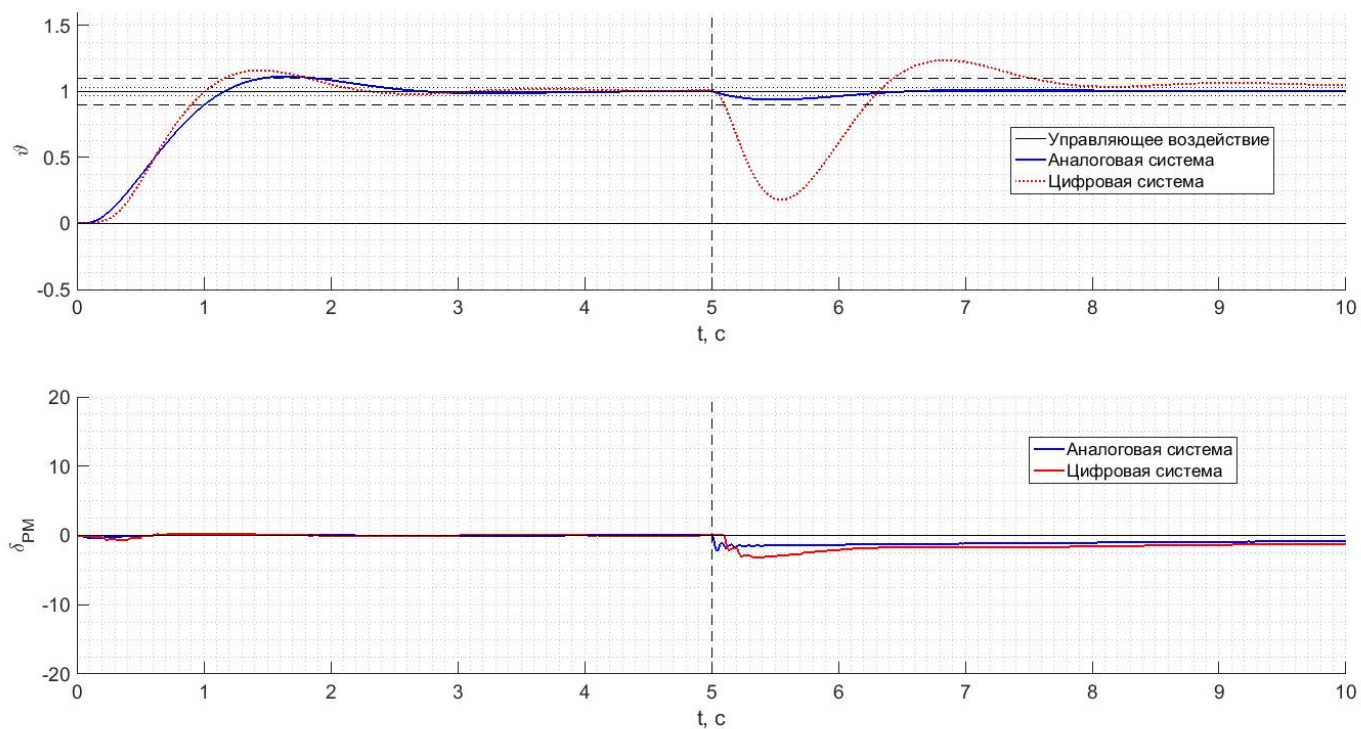


Рисунок 12 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1 для объекта, динамические параметры которого отклоняются от эталонного значения на $\pm 20\%$, при $\lambda = 0.015$

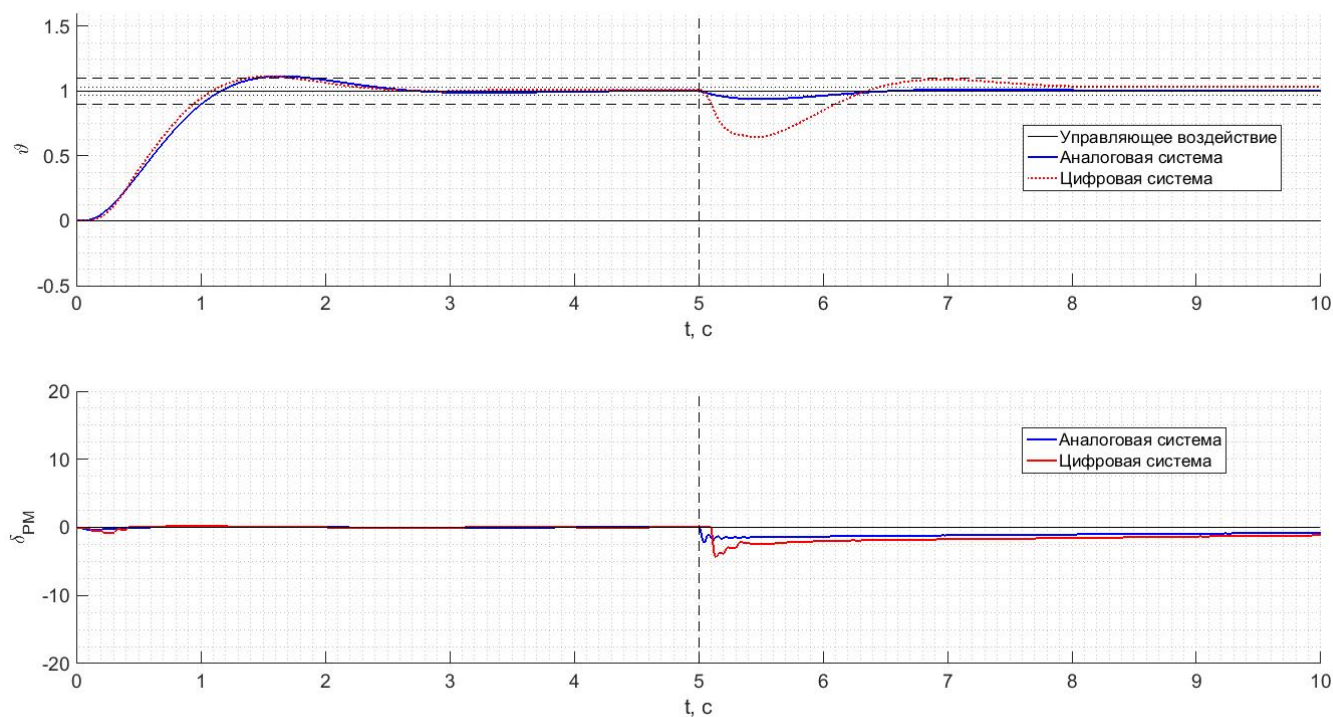


Рисунок 13 - Результаты моделирования работы аналоговой и цифровой систем при порыве штормового ветра и управляющем воздействии, равном 1 для объекта, динамические параметры которого отклоняются от эталонного значения на $\pm 20\%$, при $\lambda = 0.03$

Как видно из обобщенных в таблице 1 результатов моделирования, применение цифрового контура адаптации, при правильном выборе коэффициента скорости адаптации (по результатам моделирования понятно, что оптимальным является $\lambda = 0.03$, т.к. меньшее значение хуже справляется с внешними возмущениями, а при большем значении возникают нежелательные колебания при отклонении рулей высоты), практически не влияет на динамику разработанной системы автоматического управления. Показатели перерегулирования и времени переходного процесса остаются практически неизменными относительно аналогового исполнения. Кроме того, было установлено что цифровое исполнение не влияет на чувствительность системы к некорректно измеренным динамическим параметрам объекта управления. Система в независимости от реальных динамических параметров объекта приводит переходный процесс изменения состояния объекта управления к заданному в эталонной модели.

По результатам моделирования было установлено, что цифровая система хуже, чем аналоговая справляется с внешними возмущениями. При аналоговом контуре адаптации отклонение угла тангажа при внешнем воздействии составляет 0.06° , а при цифровом контуре адаптации – 0.4° . Однако в [7] было показано, что система с ПИД-регулятором подавляет воздействие порыва штормового ветра в течении 6 с, в то время как контур адаптации (в любом исполнении) позволяет сократить время подавления внешнего воздействия до 1 с.

Заключение

Автором статьи проведено исследование работы цифрового исполнения адаптивной системы автоматического управления.

Было установлено, что цифровой контур, в отличие от аналогового, хуже справляется с внешними воздействиями. Это связано с тем, что для цифровой системы требуется меньший коэффициент скорости подстройки коэффициентов управления по сравнению с аналоговым. Таким образом, система медленнее реагирует на текущее рассогласование между состояниями реального объекта управления и эталонной модели, что ведет к тому, что при внешнем воздействии

реальное состояние успевает отклониться от требуемого больше, чем в аналоговом исполнении. Однако скорость нивелирования отклонения, вызванного внешним воздействием, одинакова в обоих исполнениях.

Также было установлено, что показатели качества переходного процесса цифровой системы совпадают с аналоговой.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. 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.
2. Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н. Теория электрической связи. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 384 с.
3. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: учебное пособие для высших учебных заведений / А.А. Бобцов, В.О. Никифоров, А.А. Пыркин, О.В. Слита, А.В. Ушаков. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 277 с.
4. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Модификация метода билинейного преобразования для синтеза цифровых фильтров // Т-Comm. 2019. №1. С. 4–9.
5. Овчаренко В.Н. Идентификация аэродинамических характеристик воздушных судов по полетным данным. М.: Изд-во МАИ, 2017. 182 с.
6. Ремень – Сафи // Большая советская энциклопедия: в 30 т. Т. 22 / под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1975. 628 с.
7. Селезнева А.Е., Неретин Е.С. Адаптивная система автоматического управления мультисред-ным объектом // Управление большими системами. 2024. № 109. С. 41–66.

8. Barkana I. Adaptive control? But is so Simple! // Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, no. 83. P. 3–34.
9. Crespo L., Matisutani M., Annaswamy A. Design of a model reference adaptive controller for an unmanned air vehicle // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2010. P. 8049.
10. Dydek Z.T., Annaswamy A.M., Lavretsky E. Adaptive control of quadrotor UAVs: A design trade study with flight evaluations // IEE Transactions on Control Systems Technology. 2013. Vol. 21, iss. 4. P. 1400–1406.
11. Gibson T.E., Annaswamy A. M., Lavretsky E. On adaptive control with closed-loop reference models: transients, oscillations, and peaking // IEE Access. 2013. Vol. 1. P. 703–717.
12. Iwai Z., Mizumoto I. Realization of simple adaptive control by using parallel feedforward compensator // International Journal of Control. 1994. Vol. 59, iss. 6. P. 1543–1565.
13. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. Direct adaptive control algorithms. N.Y.: Springer-Verlag, 1994. xxi, 370 p.
14. Shin Y., Calise A. Motter M. Adaptive autopilot designs for an unmanned aerial vehicle // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2005. P. 6166.
15. Whitehead B., Bieniawski S. Model reference adaptive control of a quadrotor UAV // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2010. P. 8148.
16. Wise K.A., Lavretsky E., Hovakimyan N. Adaptive control of flight: theory, applications, and open problems // 2006 American Control Conference IEEE 2006. P. 5966–5971.

References

1. Bezyaev V.S., Makarychev P.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii re-gion. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 1 (53), pp. 19–27.
2. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Teoriya ehlektricheskoi svyazi* [Theory of electrical communication], Moscow, Izdatel'skii tsentr “Akademiya”, 2010, 384 p.
3. Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Pyrkin A.A., Slita O.V., Ushakov A.V. *Metody adap-tivnogo i robustnogo upravleniya nelineinymi ob"ektami v pribo-rostroenii*

- [Methods of adaptive and robust control of nonlinear objects in instrument engineering], a text-book for higher educational institutions, St. Petersburg, NIU ITMO, 2013. 277 p.
4. Kreindelin V.B., Grigorieva E.D. *T-Comm*, 2019, no. 1, pp. 4–9.
 5. Ovcharenko V.N. *Identifikatsiya aehrodinamicheskikh kharakteristik vozdushnykh sudov po poletnym dannym* [Identification of aerodynamic characteristics of aircraft based on flight data], Moscow, Izd-vo MAI, 2017, 182 p.
 6. Remen' – Safi. *Bol'shaya sovetskaya ehntsiklopediya* [The Great Soviet Encyclopedia]. Vol. 22, ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya ehntsiklopediya, 1975, 628 p.
 7. Selezneva A.E., Neretin E.S. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2024, no. 109. pp. 41–66.
 8. Barkana I. Adaptive control? But is so Simple! *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2016, no. 83. P. 3–34.
 9. Crespo L., Matisutani M., Annaswamy A. Design of a model reference adaptive controller for an unmanned air vehicle. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010, pp. 8049.
 10. Dydek Z.T., Annaswamy A.M., Lavretsky E. Adaptive control of quadrotor UAVs: A design trade study with flight evaluations. *IEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, vol. 21, iss. 4, pp. 1400–1406.
 11. Gibson T.E., Annaswamy A, M., Lavretsky E. *On adaptive control with closed-loop reference models: transients, oscillations, and peaking. IEE Access*, 2013, vol. 1. pp. 703–717
 12. Iwai Z., Mizumoto I. Realization of simple adaptive control by using parallel feedforward compensator. *International Journal of Control*, 1994, vol. 59, iss. 6, pp. 1543–1565.
 13. Kaufman H., Barkana I., Sobel K. *Direct adaptive control algorithms*. N.Y., Springer–Verlag, 1994. xxi, 370 p.
 14. Shin Y., Calise A. Motter M. Adaptive autopilot designs for an unmanned aerial vehicle. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2005, pp. 6166.
 15. Whitehead B., Bieniawski S. Model reference adaptive control of a quadrotor UAV. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010, pp. 8148.

16. Wise K.A., Lavretsky E., Hovakimyan N. Adaptive control of flight: theory, applications, and open problems. *2006 American Control Conference IEEE 2006*, pp. 5966–5971.

Информация об авторах

Анна Евгеньевна Селезнева, Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», г. Москва, Россия; e-mail: seleznevaae@yandex.ru

Information about the authors

Anna E. Selezneva, Joint-Stock Company «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, Russia; e-mail: seleznevaae@yandex.ru

Получено 03 апреля 2026 ● Принято к публикации 27 мая 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 03 April 2026 ● Accepted 27 May 2026 ● Published 25 June 2026
