

УДК: 629.7.05

## **Исследование и отработка цифро-аналоговой адаптивной системы управления беспилотного летательного аппарата**

С.П. Сеница, А.В. Третьяков

### **Аннотация**

На основе сочетания методов математического (ММ) и полунатурного моделирования (ПНМ) рассмотрено поэтапное исследование бортовой системы управления беспилотного летательного аппарата (БЛА) от формирования законов управления до завершения натурных испытаний.

### **Ключевые слова**

беспилотный летательный аппарат; адаптивная система; математическое моделирование; полунатурное моделирование

### **Введение**

Понятие адаптивной системы управления определяет, что система управления автоматически изменяет значения своих параметров при изменениях внешних условий так, чтобы сохранялось заданное качество ее работы [1]. На исследуемом БЛА контур адаптации реализован в виде блока самонастройки, выходным параметром которого является сигнал, пропорциональный эффективности рулей в канале крена ( $U_y$ ).

Текущая информация об эффективности рулей используется не только в контуре стабилизации для настройки передаточных чисел, но и в контуре управления продольным движением, благодаря чему стало возможным формировать траекторию с переменным углом заданного пеленга. [2].

Структурная схема математической модели системы управления (СУ), приведена на рис. 1.

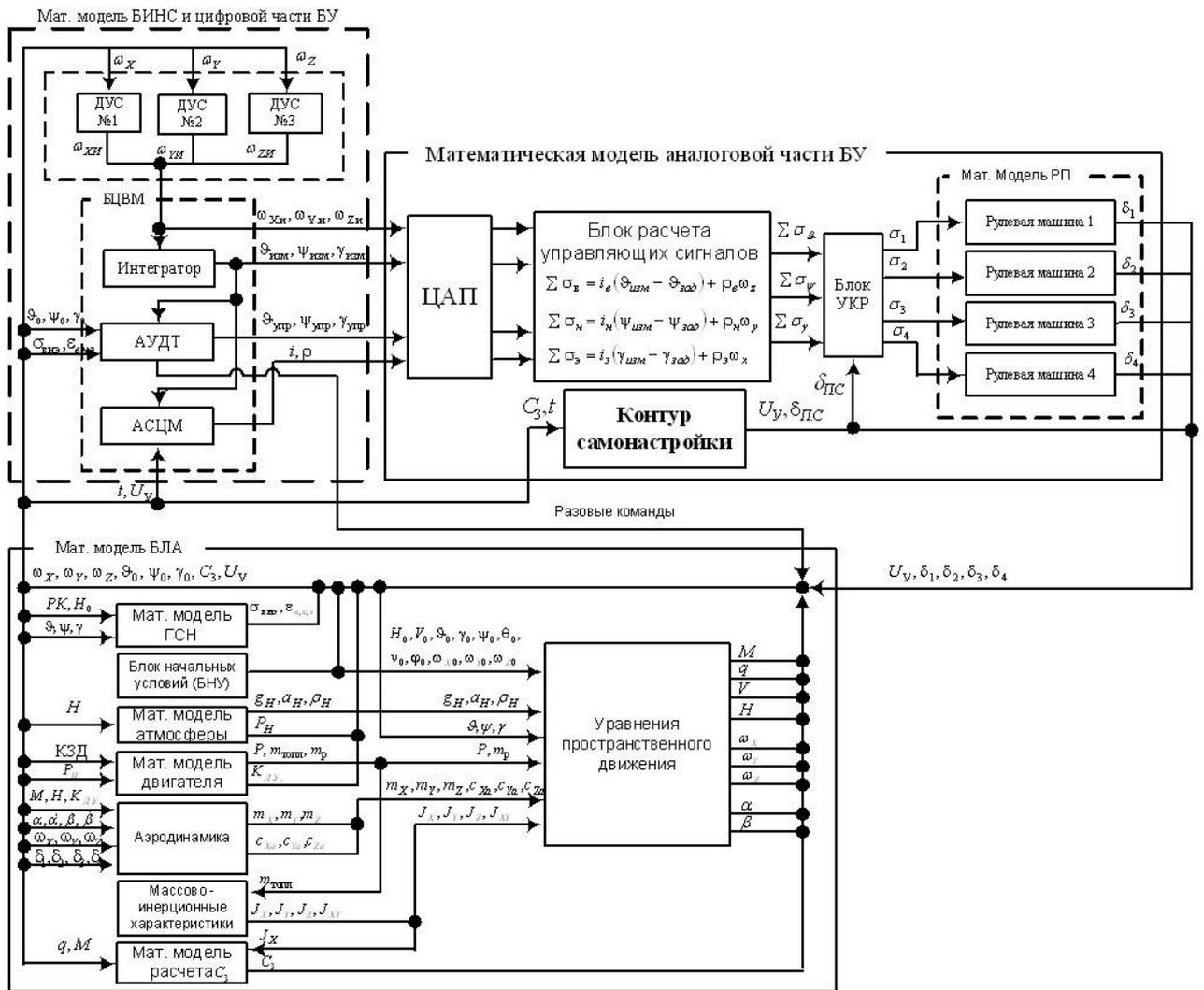


Рис. 1. Структурная схема математической модели СУ БЛА

Применение новой цифровой техники в сочетании с аналоговыми элементами и нелинейным электрофрикционным приводом, при использовании цифровых каналов интерфейсного взаимодействия потребовало специальных методов исследования. Для эффективного решения таких задач на нашем предприятии широко используются методы математического и полунатурного моделирования. Моделирование переносит центр тяжести исследований по динамике в наземные условия и осуществляется путем поэтапного перехода от моделирования отдельных элементов системы управления к комплексному полунатурному моделированию полного контура управления изделия. В этом контексте моделирование следует рассматривать не как узкое средство контроля и отработки готовой аппаратуры, а как способ проектирования больших систем управления, какими являются многоканальные системы стабилизации и управления БЛА.

Таким образом, решение задачи динамики полета БЛА начинается с составления математической модели движения БЛА, которая описывается более или менее сложными уравнениями движения.

### **Цели работы**

1. Создание модели и программы пространственного движения БЛА для математического и полунатурного моделирования.
2. Создание комплекса полунатурного моделирования (КПНМ).
3. Проведение исследований в процессе проектирования БЛА с помощью математического моделирования с целью выбора структуры и параметров системы управления, исследования законов управления, их отладки и оптимизации;
4. Проведение исследований в процессе изготовления образцов БЛА с помощью полунатурного и математического моделирования для отработки бортовой аппаратуры СУ:
  - определения характеристик элементов и подсистем управления, уточнение математических моделей элементов аппаратуры;
  - полунатурное моделирование контуров стабилизации, управления и уточнение структур и параметров этих контуров;
  - отработки и исследования процесса обмена данными между подсистемами бортовой СУ;
  - полунатурное моделирование пространственного движения БЛА;
  - отладки программ обработки телеметрической информации;
  - проведения контрольного моделирования перед началом натурных работ;
  - идентификации результатов натурных испытаний.

### **Разработка математической модели пространственного движения БЛА**

Модель создается на основе реализуемых системой физических закономерностей, данных проектирования и имеющегося опыта и состоит из математического описания параметров условий полета и БЛА как управляемой механической системы.

Математическая модель полета БЛА определяется в первую очередь поставленной задачей, в зависимости от которой исследователь выбирает ту или иную модель условий полета, модель самого аппарата, модель приложенных к нему сил и моментов.

Типовая модель движения БЛА состоит из:

- модели физической среды, которая окружает БЛА в полете (модель атмосферы, модель ветровых возмущений, модель подстилающей поверхности);

- моделей физических свойств БЛА, как физического тела (модель аэродинамических свойств, модель массово-инерционных свойств);
- моделей узлов БЛА (двигателя, головки самонаведения (ГСН), системы управления (СУ) и других агрегатов).

Для разработки и исследования проектируемой СУ авторами на основе проектной документации была разработана модель движения исследуемого БЛА. При этом были использованы следующие исходные данные:

- параметры стандартной атмосферы по ГОСТ [3];
- массово-инерционные и центровочные параметры БЛА;
- тягово-экономические характеристики двигателя БЛА;
- аппроксимации коэффициентов аэродинамических сил, действующих на БЛА;
- предварительные законы системы стабилизации, управления по траектории и наведения БЛА в заданную конечную точку (ЗКТ);
- уравнения пространственного движения и кинематических соотношений в соответствии с [4].

### **Разработка законов управления**

Принятый способ формирования траектории БЛА основан на принципе оценки текущего состояния БЛА и использования этой информации для формирования такого профиля траектории, при котором наиболее полно используются энергетические и аэродинамические возможности изделия.

Для получения максимальной дальности проводилась многопараметрическая оптимизация коэффициентов закона управления. Была попытка применить генетический алгоритм оптимизации. В результате выбор пал в пользу направленного поиска методом последовательных итераций. Для каждой комбинации начальных условий путем варьирования параметрами определялись коэффициенты в законе управления, при которых сокращалось время движения по траектории и достигалась наибольшая скорость подхода к ЗКТ, при выполнении нескольких категорий ограничений:

- аэродинамических, связанных с конструктивными особенностями планера и аэродинамической схемой БЛА;
- тактических, определяемых тактико-техническими требованиями к параметрам движения БЛА;
- физических, определяемых прочностью конструкции БЛА;

– технических, зависящих от особенностей функционирования некоторых элементов БЛА, доработка которых не предусмотрена в рамках существующей ОКР.

### Разработка программы, моделирующей пространственное движение БЛА

Для реализации созданной математической модели в компьютере, была написана программа (рис. 2). Программа построена из автономных модулей, в которые инкапсулирована математика моделей элементов СУ БЛА. Структура этих модулей отражает полную картину взаимодействия блоков реального БЛА. Такая организация программы позволяет за короткое время изменять структуру подключенных программных модулей для решения конкретной задачи: заменять типы модулей, их количество, кроме того путем активации модулей, реализующих интерфейсное взаимодействие и имитацию реального времени, можно быстро переориентировать программу на работу в составе КПНМ.

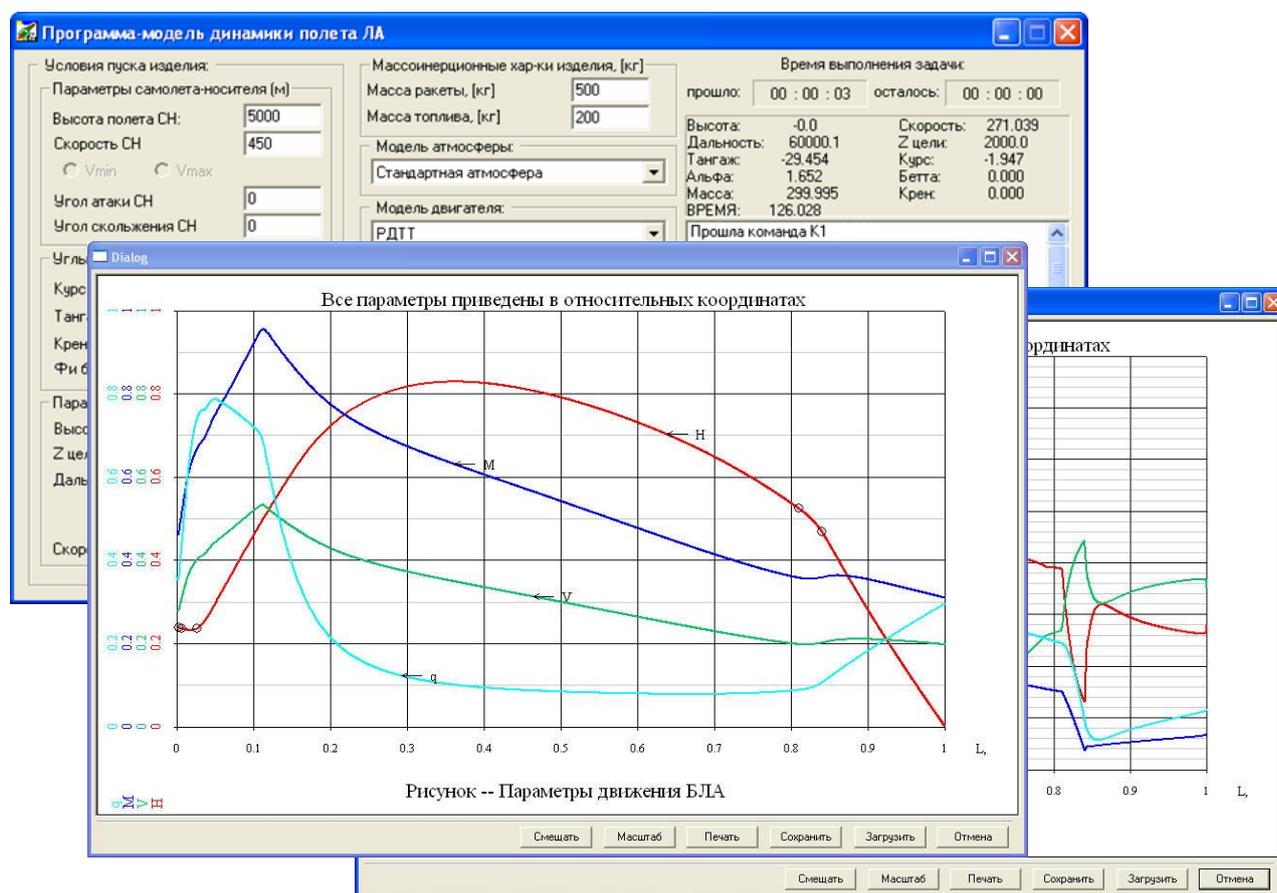


Рис. 2. Интерфейс программы, моделирующей пространственное движение БЛА и программы «Монитор».

Для осуществления математического моделирования в программу входят следующие компоненты (см. рис. 1):

- блок задания начальных условий;
- модель атмосферы;
- модель массово-инерционных свойств БЛА;

- модель двигателя БЛА;
- модель аэродинамических свойств БЛА;
- уравнения кинематических соотношений (модель ГСН);
- алгоритм стабилизации центра масс (АСЦМ);
- алгоритм управления движением по траектории (АУДТ);
- блок расчета управляющих сигналов;
- модели рулевого привода (РП) и датчиков угловых скоростей (ДУС);
- модель контура самонастройки;
- уравнения пространственного движения.

### **Методика математического моделирования**

Разработка законов управления производилась методом последовательных уточнений:

1. Первоначально были использованы законы управления изделия-прототипа (БЛА с такой же аэродинамической схемой и похожей конструкцией планера).
2. Далее в законах управления БЛА уточнялись коэффициенты с целью оптимизации времени полета и скорости, с учетом перечисленных ограничений на параметры движения.
3. Проводилось исследование области существующих скоростных напоров и чисел Маха.
4. Рассчитывались динамические коэффициенты (ДК) в точках, расположенных по границе области существующих скоростных напоров.
5. Рассчитывалась устойчивость БЛА: методом Д-разбиения, путем исследования линеаризованной системы с полученными ДК, определялись запасы устойчивости по критерию Найквиста.
6. По полученным запасам устойчивости уточнялись передаточные числа в законах управления и стабилизации.
7. Сформированные траектории с помощью математической модели проверялись на соответствие перечисленным выше ограничениям, при несоответствии процесс исследования повторялся.

В дальнейшем математическая модель уточнялась при совместном математическом и полунатурном моделировании, также ММ проводилось в сопровождение натурных испытаний.

### Комплекс полунатурного моделирования

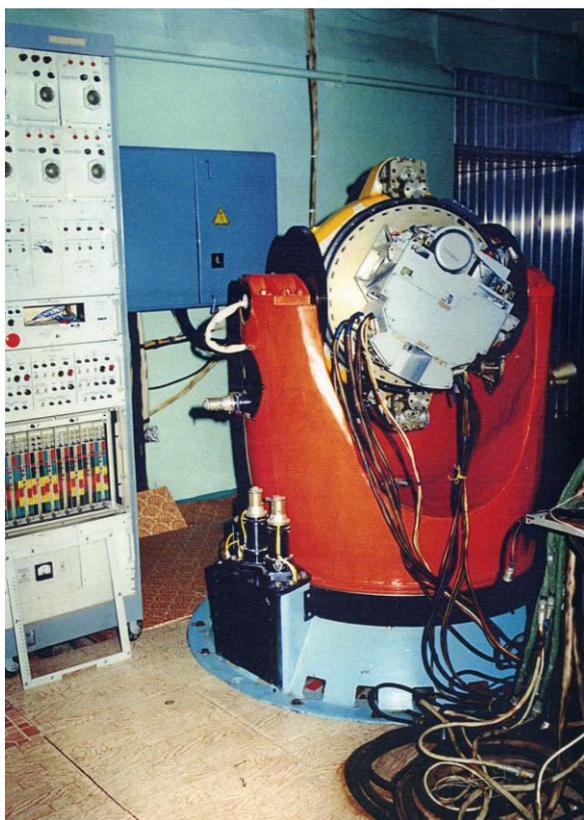


Рис. 3. Трехступенной динамический стенд

Для осуществления ПНМ полного контура управления БЛА был создан комплекс полунатурного моделирования на базе оборудования предприятия ОАО «ГосМКБ «Радуга».

Построенный на базе трехступенного динамического стенда ЗПШК (рис. 3) комплекс ПНМ включает в себя промышленные компьютеры с платами цифро-аналогового, аналого-цифрового преобразования и мультиплексного обмена, для решения задач динамики и стыковки с реальной аппаратурой.

Основу комплекса составляет стенд ЗПШК, который предназначен для имитации пространственного углового движения БЛА и представляет собой электромеханическое следящее устройство, преобразующее входное управ-

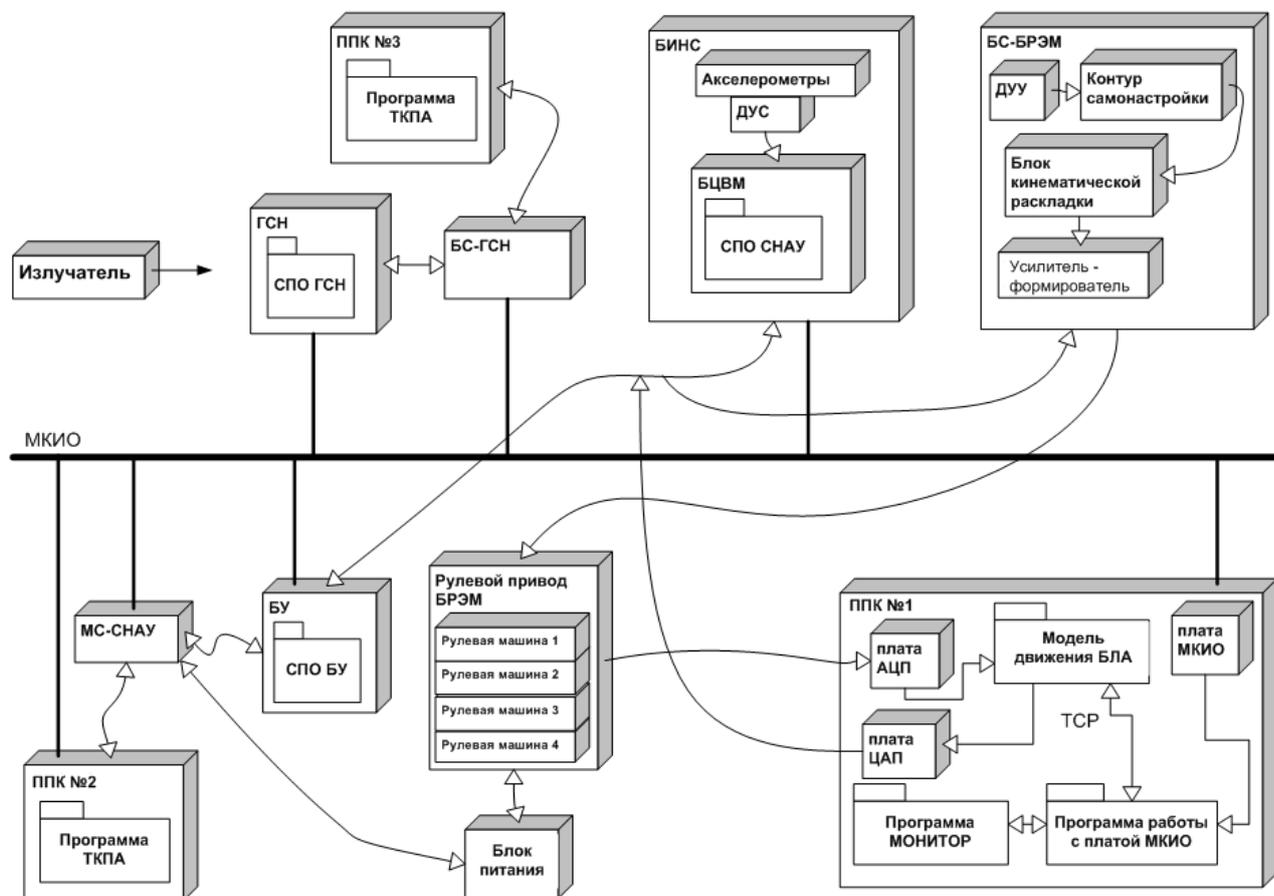
ляющее напряжение в угловое перемещение рам стенда.

Этот стенд полностью удовлетворяет требованиям моделирования БЛА, превосходя по своим возможностям динамические характеристики исследуемой системы (полоса пропускания, максимальные угловые эволюции изделия). В таблице 1 приведены основные характеристики стенда.

Таблица 1

	Рабочие углы поворота осей, °	Максимальная угловая скорость, °/с	Минимальная угловая скорость, °/с	Угловое ускорение, °/с <sup>2</sup>	Полоса пропускания по скорости при амплитуде 50°/с, Гц
Канал крена	± 175	360	0,05	8700	20
Канал курса	± 175	160	0,03	5100	10
Канал тангажа	± 175	292	0,04	6650	12

Структурная схема отработки и исследования цифро-аналоговой системы управления БЛА приведена на рисунке 4, и состоит из следующих компонентов:



**Рис. 4.** Структурная схема отработки цифро-аналоговой системы управления БЛА

- промышленного персонального компьютера (ППК №1) с загруженной программой, моделирующей пространственное движение БЛА и программой обработки телеметрической информации «Монитор»;
- ППК №2,3 с технологическим программным обеспечением (ТКПА) от разработчика аппаратуры;
- блока бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС);
- блока управления (БУ);
- блока рулевых электрофрикционных машин (БРЭМ);
- блока сопряжения БРЭМ (БС-БРЭМ);
- блока питания рабочих муфт БРЭМ;
- наведение изделия в заданную точку осуществляется с помощью ГСН и блока сопряжения (БС-ГСН).

## Методика полунатурного моделирования

Как показала практика, при проведении исследований с помощью ПНМ самой оптимальной оказалась методика поэтапного моделирования, основанная на последовательной замене элементов полной математической модели их реальными прототипами, кроме того процесс ПНМ на всех этапах активно сопровождался ММ.

Такой подход к моделированию сложной системы обеспечивает получение надежных результатов исследований и последовательное уточнение математической модели движения БЛА. Весь процесс ПНМ был разделен на несколько этапов.

*Подготовка к проведению моделирования.* На этом этапе проводились:

- подготовка математической модели движения БЛА к работе с реальной аппаратурой СУ (разработка и подключение модуля расчета реального времени и модулей, обеспечивающих интерфейсное взаимодействие блоков бортовой аппаратуры с промышленным компьютером, на котором реализована модель пространственного движения);
- доработка уже входивших в состав СУ и изготовление новых жгутов для «подыгрыша» цифровой и аналоговой информации в обход чувствительных датчиков;
- разработка и отладка программы «Монитор», для сбора с цифровой линии МКИО и представления телеметрической информации.

*Моделирование в бесстендовом варианте.* Вся аппаратура размещалась на неподвижном основании (см. рис. 5).

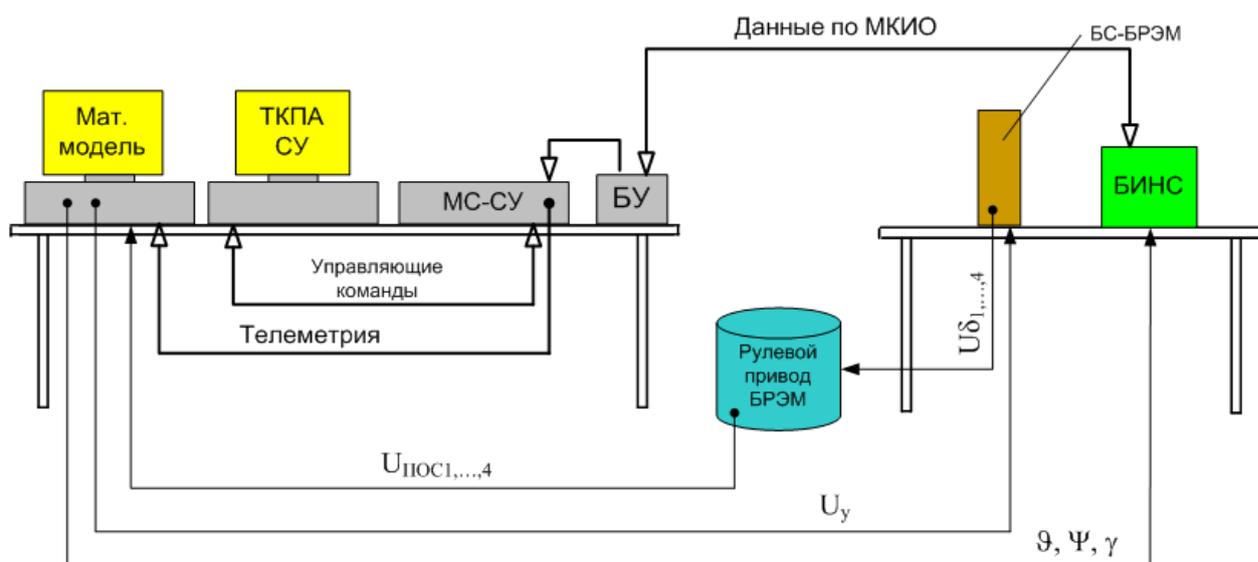


Рис. 5. Моделирование СУ в бесстендовом варианте



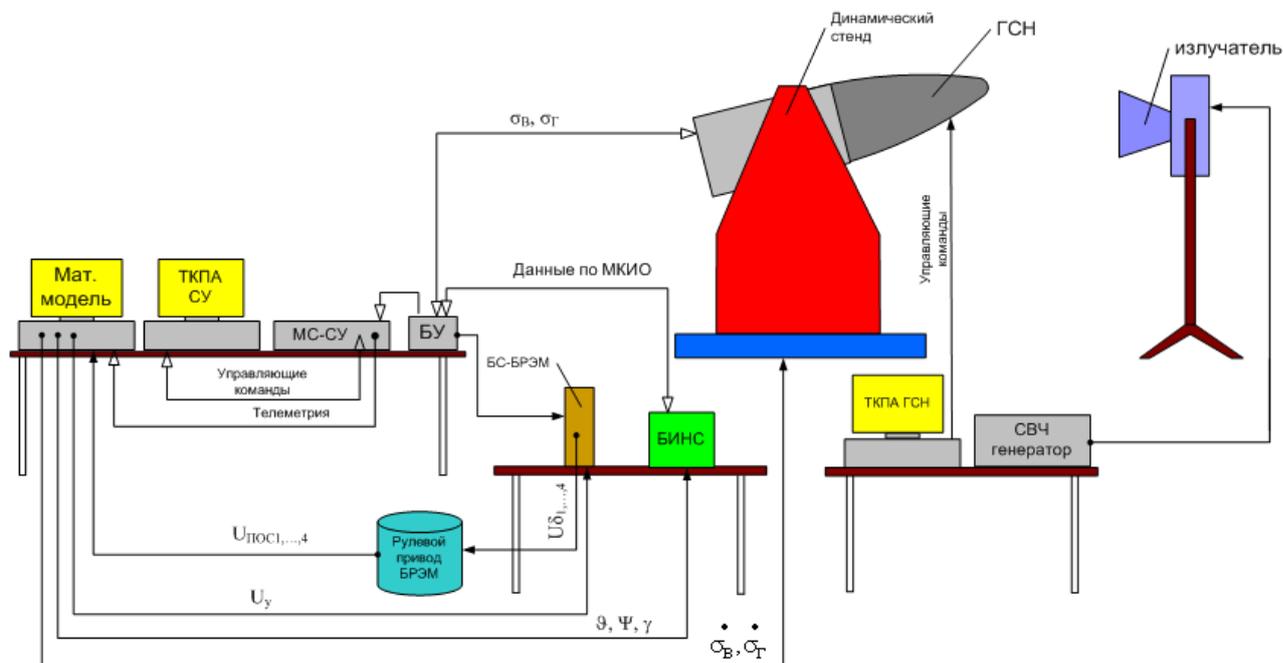


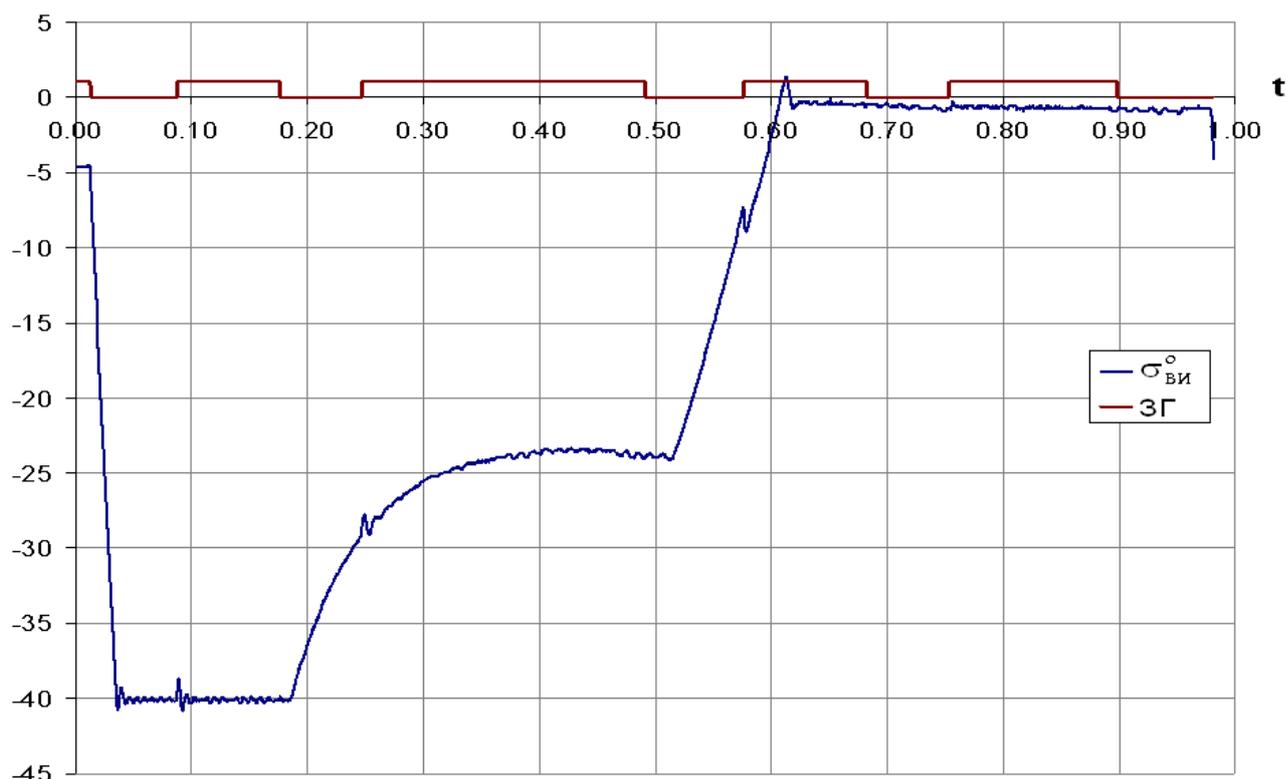
Рис. 7. Моделирование СУ и ГСН на динамическом стенде

### Исследование работы пролонгатора

Пролонгатор исследуемого БЛА представляет собой программную реализацию нелинейной астатической следящей системы с введением программного ускорения, которая формирует сигналы управления подвесом антенной платформы ГСН при сбросе захвата.

Исследование работы пролонгатора на комплексе ПНМ заключалось в периодическом включении и выключении излучателя с заданным интервалом времени при движении изделия по траектории и регистрации признака захвата. Выбранный интервал соответствует максимальному времени, в течение которого антенна ГСН не успевает выйти за ширину строба. В то же время было проведено моделирование с математической моделью пролонгатора, при котором в модели с теми же интервалами искусственно формировался признак потери захвата. Сопоставление результатов математического и полунатурного моделирования подтвердило правильную реализацию алгоритма пролонгации в аппаратуре ГСН.

На рис. 8 приведена характеристика пеленга на траектории и признак захвата/потери точки интереса.



**Рис. 8.** Исследование работы пролонгатора:  
на рисунке время (t) приведено в относительных координатах.

### Отработка систем изделия

В процессе проведения моделирования были обнаружены и устранены функциональные отклонения в работе отдельных элементов и подсистем, ошибки в алгоритмах СПО, исправление которых без полунатурного моделирования было бы возможно лишь при натуральных испытаниях.

Быстрая локализация ошибок с помощью ПНМ позволяла исправлять их в кратчайшие сроки, а благодаря применению цифровой аппаратуры СУ большая часть доработок сводилась к исправлению СПО представителями предприятия – изготовителя аппаратуры.

Также в процессе полунатурного моделирования были обнаружены значительные информационные запаздывания при выдаче управляющих команд и признаков. Выявленная задержка была минимизирована и уложена в требуемый диапазон (таблица 2).

Таблица 2

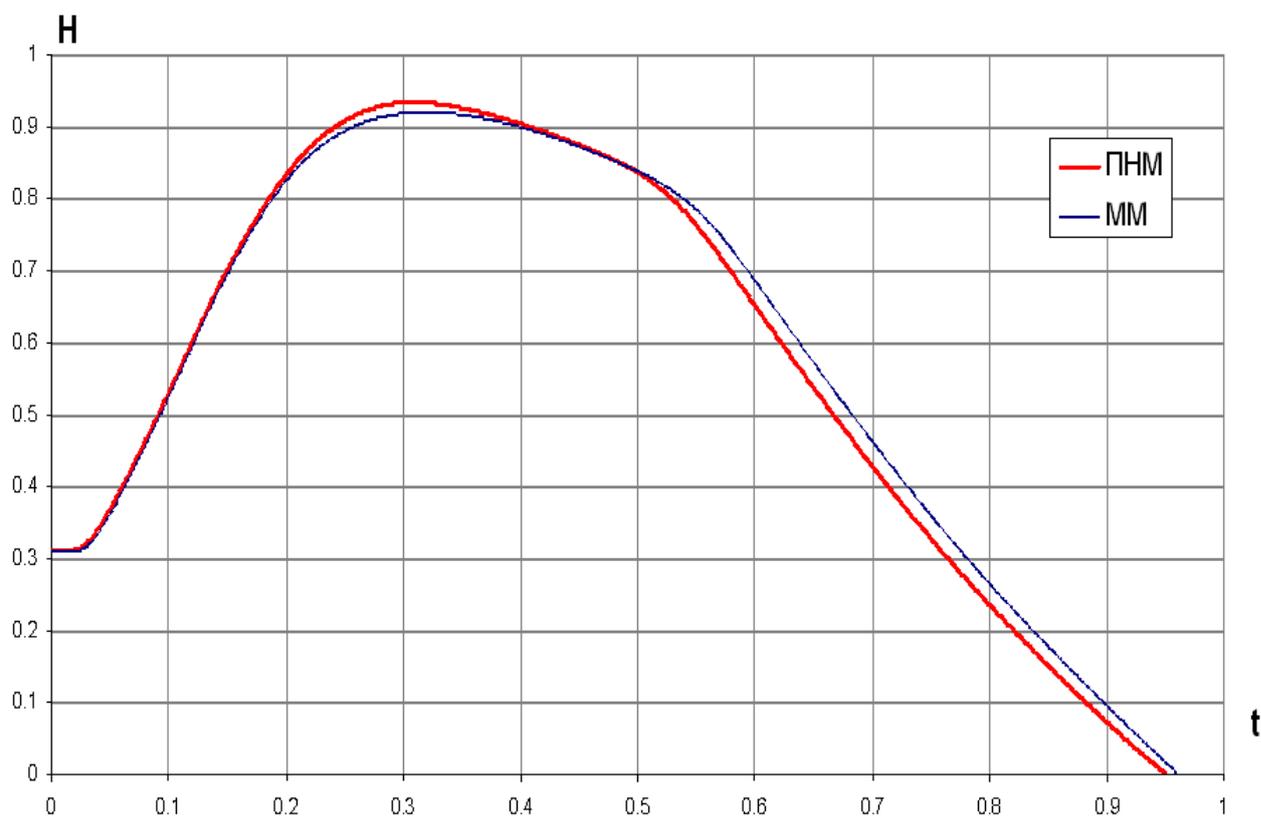
Команда	До исправления $t$ , с	После исправления $t$ , с
K01	0,12 ÷ 0,13	0,008 ÷ 0,009
K0	0,11 ÷ 0,12	0,007 ÷ 0,017
K1	0,15 ÷ 0,16	0,007 ÷ 0,008

Выявлены информационные сбои при передаче параметров в системе управления, приводящие к нештатной выдаче управляющих команд и как следствие к неправильному формированию траектории. Для исключения возникновения подобной ситуации, в алгоритмы аппаратуры была введена алгоритмическая защита (рис. 9).



**Рис. 9.** Информационные сбои при передаче параметров ГСН:  
на рисунке время ( $t$ ) приведено в относительных координатах.

При идентификации результатов натурных испытаний моделирование проводилось по траекториям, предназначенным для натурных работ. Результаты полунатурного моделирования сравнивались с результатами математического и выдавалось заключение о готовности программного обеспечения СУ к проведению следующих натурных работ. Пример сопоставления траекторий приведен на рис. 10.



**Рис. 10.** Траектория движения БЛА:  
на рисунке время (t) и высота (H) приведены в относительных координатах.

### Заключение

1. Разработана математическая модель цифро-аналоговой адаптивной системы управления БЛА, которая реализована в компьютерной программе для использования в составе с реальной аппаратурой СУ изделия;
2. Разработана методика поэтапного моделирования исследуемой системы;
3. Проведено исследование системы методами ММ и ПНМ, в процессе которого:
  - настроен контур самонастройки;
  - отработаны алгоритмы СПО;
  - исследовано аппаратно-программное взаимодействие аппаратуры СУ и ГСН;
  - проведена комплексная отработка по уменьшению запаздываний в аппаратуре СУ;
  - исследована работа пролонгатора;

Подводя итог проделанной работы, необходимо отметить о следующих важных моментах:

4. Главным результатом стали четыре успешных натурных работы с современной цифро-аналоговой системой управления;

5. Создан комплекс ПНМ, позволяющий всесторонне исследовать цифро-аналоговую систему управления;

6. Разработка системы управления изделия осуществлена в сжатые сроки, с минимальным количеством натурных работ.

### **Библиографический список**

1. Бабаков Н.А., Воронов А.А., Воронова А.А., Дидук Г.А., Дмитриева Н.Д., Ким Д.П., Менский Б.М., Попович П.Н. Теория автоматического управления: учеб. пособие для вузов в 2-х ч. Часть 1 – М.: Высшая школа, 1977. – 367 с.

2. Система управления беспилотным летательным аппаратом (варианты). Патент на полезную модель № 33658 Российская федерация, МПК7 G 05D 1/12 В 64С 13/18; №2003121198; заявл. 18.07.2003; опубл. 27.10.2003, Бюл. № 30, приоритет 18.07.2003 – 29 с.

3. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 182 с.

4. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.

### **Сведения об авторах**

Синица Сергей Петрович, инженер-конструктор ОАО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка»,

ул. Жуковского 2а, Дубна, Московская обл., 141980;

тел: +7(496)2124988\*3345; e-mail: dem20001@yandex.ru.

Третьяков Артем Владимирович, инженер-конструктор ОАО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка,

ул. Жуковского 2а, Дубна, Московская обл., 141980;

тел: +7(496)2124988\*3609, e-mail: treav@mail.ru.