

# Средства системы ГАММА-3 для синтеза и математического моделирования систем траекторного управления БПЛА в задачах дистанционного зондирования Земли

М.Ф. Степанов<sup>1</sup>, А.М. Степанов<sup>2</sup>, А.Р. Салихова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет, ул. Политехническая, 77, Саратов, Россия, 410054

<sup>2</sup>Институт проблем точной механики и управления РАН, ул. Рабочая, 24, Саратов, Россия, 410028

**Аннотация.** Разработка систем управления сложными техническими объектами предусматривает выполнение целого ряда вычислительно сложных процедур, многие из которых требуют многократного итерационного выполнения, в связи с недоопределенностью поставленной задачи, неполнотой информации об объекте управления и условиях его функционирования, недостаточной проработанностью методов теории автоматического управления в связи с её продолжающимся активным развитием. Поэтому актуальность разработки средств автоматизации решения задач управления не уменьшается. Данная работа посвящена изложению подхода к расширению классов решаемых задач многофункциональной системы ГАММА-3, особенностью которой является наличие возможностей решения задач как в традиционной процедурной, так и в непроцедурной постановке. Предлагаемый подход предусматривает вначале расширение решаемых классов процедурно поставленных задач, как наиболее формализованный процесс. Следующим этапом является формализация и обобщение накопленных процедурных знаний в новой расширенной модели предметной области, на которой допускается непроцедурная постановка задачи. Решение таких задач требует привлечения интеллектуальных компонентов системы ГАММА-3. Предлагаемый подход иллюстрируется описанием выполнения первого этапа подхода на примере разработки пакета программ системы ГАММА-3 для решения задач синтеза закона управления, построения наблюдателя и математического моделирования управления движением БПЛА по заданной траектории.

## 1. Введение

Одной из главных задач, выполняемых БПЛА, является разведка труднодоступных районов, где получение данных привычными способами затруднено или же имеется опасность жизни и здоровью людей. Актуальность задачи подтверждается многочисленными работами, посвященными вопросам построения и исследования систем управления БПЛА [1]-[8].

Разделяют плановую и перспективную аэрофотосъемку. Камера при плановой съемке направлена вертикально вниз, под прямым углом к поверхности земли. На снимках получается плоская картина (ортогональная проекция), напоминающая изображение на географических картах. При данном виде аэрофотосъемки можно определить взаиморасположение объектов на

плоскости без учета их высот. Такой вид съемки в основном используется для создания фотопланов. Аналогичную картину можно получить с использованием спутниковой и традиционной аэрофотосъемки.

При перспективной (обзорной) съемке камера направлена под углом к горизонту. Такой вид съемки невозможен для спутников и традиционной «большой авиации». При перспективной аэрофотосъемке на снимках мы видим объемную картину (аксонометрическая проекция) не только крыши сооружений, но и боковые поверхности (стены). Таким образом можно судить не только о взаиморасположении объектов на плоскости, но и об их форме. Кроме того, при перспективной съемке можно определить высоту объектов относительно друг друга.

Аэрофотосъемка бывает площадная и линейная, в площадной съемке кроме продольного перекрытия снимков еще необходимо соблюдать и поперечное перекрытие. Исходными параметрами фотосъемки при помощи беспилотного летательного аппарата являются требуемое разрешение снимка, разрешение аэрофотоаппарата, угол зрения объектива камеры, величина перекрытия кадров. Из этих данных рассчитывается высота полета, скорость беспилотного летательного аппарата и частота срабатывания затвора фотокамеры.

Использование БПЛА в качестве аэросъемочной платформы имеет большие перспективы при съемке небольших по протяженности площадных объектов и при съемке линейных объектов.

## 2. Постановка задачи и синтез закона управления

Сложность задач управления летательными аппаратами обусловила необходимость применения средств автоматизации решения задач. Несмотря на наличие разнообразных как зарубежных, так и отечественных пакетов программ, предоставляющих возможности решения ряда задач проектирования систем управления, работы по созданию новых и совершенствованию существующих продолжают развиваться. Главными целями разработчиков являются: расширение классов решаемых задач и повышение уровня автоматизации. При этом наиболее перспективными являются интеллектуальные системы автоматизации, к которым относится многофункциональная система ГАММА-3 [9]. Её отличительной особенностью является возможность решения не только традиционных процедурно поставленных задач, но и декларативно поставленных [10]. Для последних характерно отсутствие в постановке задачи указания последовательности действий по решению задачи. В связи с этим система решения задач должна обладать интеллектуальными средствами, обеспечивающими возможности построения планов (программ) решения новых (с априори неизвестным системе планом решения) задач. Очевидно, что эти возможности ограничены имеющимися в системе знаниями, доставляемыми моделью множества формализованных задач (ММФЗ) теории автоматического управления [10]. Однако её построение представляет собой непростую задачу, для решения которой необходимо привлекать экспертов из различных научных школ.

В связи с этим в системе ГАММА-3 реализуется подход [11], предусматривающий декомпозицию задачи расширения класса решаемых задач на два больших этапа. Первый этап предусматривает разработку средств, обеспечивающих автоматизацию решения новых задач в процедурной постановке. При этом разрабатываются программные реализации проектных операций, необходимых для решения новой задачи. Порядок их выполнения задаётся процедурой на специализированном языке с использованием привычных форм математической записи выражений. Второй этап включает обобщение и формализацию новых методов в концепции ММФЗ, посредством ведения в существующую модель, возможно новых видов, форм математических моделей, характеристик, свойств и признаков формализованных описаний компонентов систем управления, новых действий над ними и т.д. Поскольку такой процесс является пока недостаточно формализованным, то и построение новой формализованной модели знаний оказывается весьма непростым и длительным. В связи с этим, результаты выполнения первого этапа позволяют предоставить пользователям-проектировщикам возможности автоматизированно решать новые задачи, хотя и в процедурной постановке.

Целью данной работы является иллюстрация выполнения первого этапа расширения классов решаемых задач многофункциональной системы ГАММА-3 на примере разработки пакета программ, предоставляющего возможности решения задач синтеза закона управления, построения наблюдателя и математического моделирования систем автоматического управления движением БПЛА по заданной траектории.

Задачу траекторного движения БПЛА можно разделить на задачу программного управления и задачу стабилизации. Точность отслеживания траектории является необходимым условием получения достоверной информации.

Процесс реализации программного управления полетом подразумевает наличие точной математической модели летательного аппарата, используемой для синтеза законов управления и выбора алгоритмов формирования сигналов управления.

Задача стабилизации рассматривается относительно заданного программного движения. Стабилизация - процесс ликвидации непрерывно появляющихся в полете угловых отклонений связанной системы координат летательного аппарата от опорной системы координат. Такая система дает летательному аппарату вернуться в необходимое положение, нарушенное внутренними либо внешними возмущающими влияниями.

Так как задачи управления и наблюдения дуальны, то мы будем отдельно решать задачу управления и отдельно задачу наблюдения.

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить:

- Описание математической модели движения БПЛА;
- Разработку закона управления, обеспечивающего необходимое качество регулирования;
- Моделирование системы автоматического управления.

### 2.1. Математическая модель БПЛА

В качестве примера рассматривается модель БПЛА в виде материальной точки в нормальной системе координат:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = u_x + f_x, \\ m\ddot{y} = u_y + f_y, \\ m\ddot{z} = u_z + f_z - mg, \end{cases}$$

где  $x, y, z$  - координаты БПЛА,  $u_x, u_y, u_z$  - управления по соответствующим осям,  $f_x, f_y, f_z$  - возмущающие воздействия по соответствующим осям,  $m$  - масса БПЛА,  $g$  - ускорение свободного падения.

Введем обозначения:  $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = y, x_4 = \dot{y}, x_5 = z, x_6 = \dot{z}$

Модель объекта управления в форме Коши:

$$\dot{x} = A_o x + B_o u + M_o f,$$

$$y = C_o x,$$

где  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$ ,  $x \in R^{n_o}$  -  $n_o$ -мерный вектор состояний;  $y \in R^r$  -  $r$ -мерный вектор выходных переменных;  $u \in R^m$  -  $m$ -мерный вектор управлений;  $f \in R^\mu$  -  $\mu$ -мерный вектор внешних возмущений;  $A, B, M, C$  - числовые матрицы соответствующих размеров;

$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix}, M_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m} - 1 \end{bmatrix}, C_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

2.2. Синтез закона управления

Особое внимание уделяется разработке системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом и в частности программно-алгоритмическому обеспечению, с помощью которого можно будет обеспечить отказоустойчивость, точность и требуемое качество процессов управления. Современная САУ БПЛА представляет собой информационно-управляющий комплекс, который способен быстро обрабатывать поступающую на вход измерительную информацию, обеспечить автоматический полет по заранее заложенной программе и многое другое.

На объект управления одновременно действуют управляющее и возмущающее воздействия ( $f$  - возмущающее воздействие,  $u$  - управляющее воздействие).

В связи с тем, что измерению доступен не весь вектор состояния  $x$ , а вектор измерений  $y$ , то необходимо также построить наблюдатель. Структура системы управления представлена на рисунке 1. В связи с дуальностью задачи управления и наблюдения синтез закона управления и наблюдателя осуществляем раздельно.

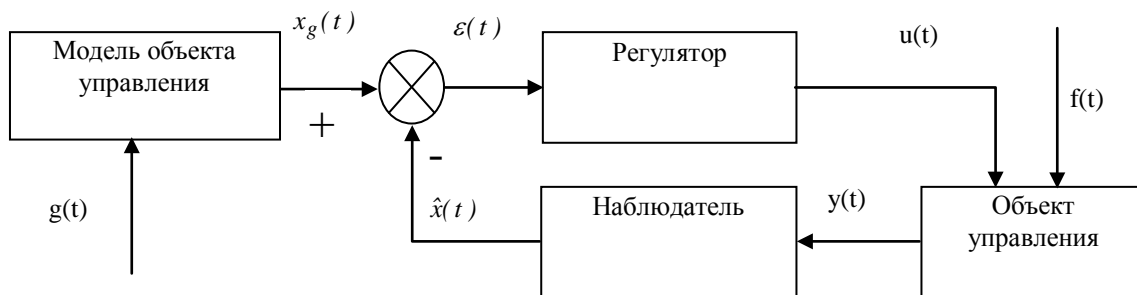


Рисунок 1. Система автоматического управления со статическим регулятором.

Составим систему уравнений, описывающих данную систему автоматического управления. Первые два уравнения описывают объект управления, следующие два – наблюдатель, далее описывается желаемое поведение объекта управления и последнее уравнение описывает закон управления.

$$\begin{cases} \dot{x}_o = A_o x_o + B_o u + M_o f, \\ y = C_o x_o + D_o u + G_o f, \\ \dot{\hat{x}} = A_o \hat{x} + B_o u + L(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C_o \hat{x}, \\ \dot{x}_g = A_g x_g + B_g g, \\ u = K(x_g - \hat{x}). \end{cases}$$

Синтез закона управления осуществляем методом АКОР (линейно-квадратической оптимизации) для функционала оптимизации вида:

$$J = \int_0^{\infty} (x' Q x + u' R u) dt$$

Численные значения элементов матриц функционала определяем в соответствии с заданными требованиями точности и качества процесса управления: установившаяся ошибка по каждому каналу не более 0,3м:

$$Q = \begin{bmatrix} 100001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5000001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1000001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Решение осуществляем с помощью пакета программ синтеза многофункциональной системы ГАММА-3 [9], поддерживающего процедурную парадигму постановки задачи. Матрица  $K$  закона управления имеет вид:

$$K = \begin{bmatrix} 316.229 & 795.273 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2236.068 & 2114.7428 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 4427.189 \end{bmatrix}$$

### 2.3. Построение наблюдателя

В связи с тем, что непосредственному измерению доступны не все компоненты вектора состояния, то необходимо построение наблюдателя. В данном случае будем использовать фильтр Калмана в качестве наблюдателя.

Для модели объекта управления в виде:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w,$$

$$y = Cx + v,$$

уравнение фильтра Калмана имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(C\hat{x} - y),$$

где  $\hat{x}$  - вектор оценок переменных состояния исходной системы,  $A, B, C$  - исходные матрицы объекта управления,  $y$  - вектор выходного сигнала,  $L$  - матрица передаточных коэффициентов наблюдателя,  $w \in R^{n_0}$  - случайные внешние возмущения,  $v \in R^r$  - случайные шумы измерительного устройства.

Функционал оптимизации имеет вид:

$$J = \int_0^{\infty} (x' Q_n x + y' R_n y) dt.$$

Численные значения элементов матриц функционала:

$$Q_n = \begin{bmatrix} 1000000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000000 \end{bmatrix}, R_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Также с помощью пакета решения задач наблюдения системы ГАММА-3 определены параметры наблюдателя:

$$L = \begin{bmatrix} 1.414 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.414 & 0 \\ 0 & 0.999 & 0 \\ 0 & 0 & 0.451 \\ 0 & 0 & 0.102 \end{bmatrix}$$

### 3. Моделирование движения БПЛА под управлением синтезированной системы управления по заданной траектории

Для моделирования движения БПЛА под управлением синтезированной системы управления по заданной траектории построим математическую модель замкнутой системы в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

$$y = Cx + Du,$$

где  $x \in R^n$  -  $n$ -мерный вектор состояний;  $y \in R^r$  -  $r$ -мерный вектор выходных переменных;  $u \in R^m$  -  $m$ -мерный вектор управлений.

Введем обозначения:  $\bar{x} = [x_o \quad \hat{x} \quad x_g]^T$ ,  $u = [f \quad g]^T$ .

Тогда:

$$A = \begin{bmatrix} A_o & -B_oK & B_oK \\ LC_o & (A_o - LC_o)K - (B_o + LD_o)K & (B_o + LD_o)K \\ 0 & 0 & A_o \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} M_o & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_g \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_o \\ 0 & -K & K \end{bmatrix},$$

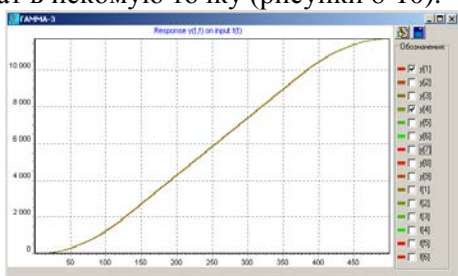
$$D = [0 \ 0 \ 0]$$

Теперь исследуем функционирование синтезированной системы управления, задавая с помощью вектора  $g = [g_x \ g_y \ g_z]$ , желаемое поведение объекта управления при внешнем возмущении  $f = [f_x \ f_y \ f_z]$  по соответствующим осям  $x, y, z$ .

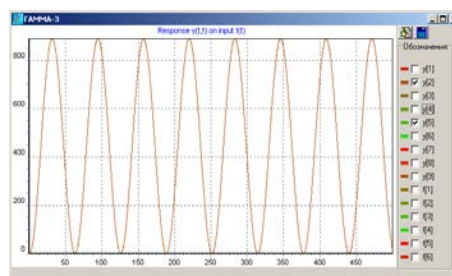
Пусть масса БПЛА  $m = 1000$  кг.

Рассмотрим несколько режимов полета:

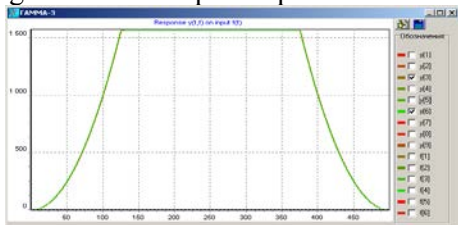
- 1) взлет, пролет и плавная посадка змейкой (рисунки 2-4);
- 2) плавный взлет по прямой, пролет по прямой, облет местности по окружности (барражирование) и возврат в исходную точку (рисунки 5-7);
- 3) взлет по спирали, пролет по прямой, облет местности по окружности (барражирование) и возврат в искомую точку (рисунки 8-10).



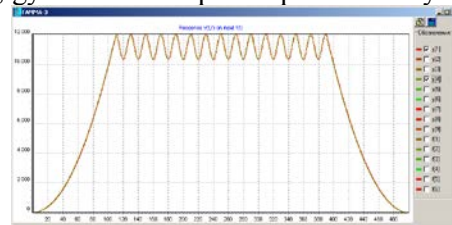
**Рисунок 2.** X-траектория полета объекта по оси x;  $g_x$ - желаемая траектории по оси x.



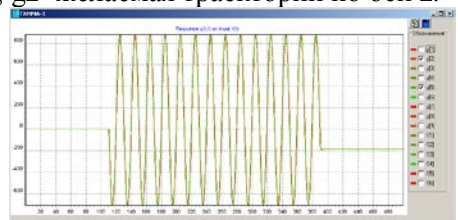
**Рисунок 3.** Y-траектория полета объекта по оси y;  $g_y$ - желаемая траектории по оси y.



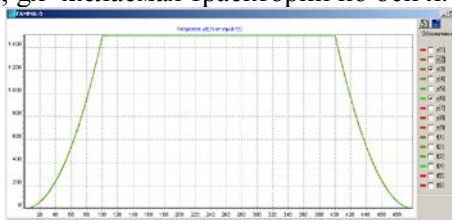
**Рисунок 4.** Z-траектория полета объекта по оси z;  $g_z$ - желаемая траектории по оси z.



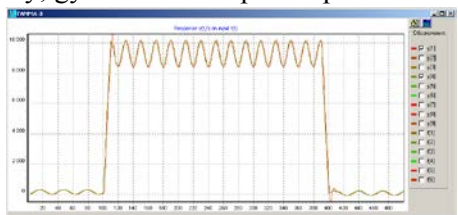
**Рисунок 5.** X-траектория полета объекта по оси x;  $g_x$ - желаемая траектории по оси x.



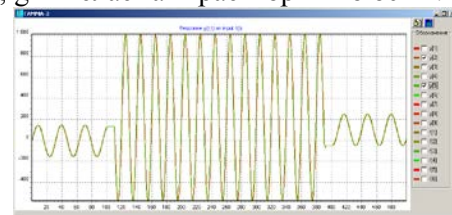
**Рисунок 6.** Y-траектория полета объекта по оси y;  $g_y$ - желаемая траектории по оси y.



**Рисунок 7.** Z-траектория полета объекта по оси z;  $g_z$ - желаемая траектории по оси z.

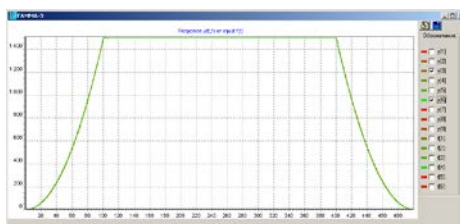


**Рисунок 8.** X-траектория полета объекта по оси x;  $g_x$ - желаемая траектории по оси x.



**Рисунок 9.** Y-траектория полета объекта по оси y;  $g_y$ - желаемая траектории по оси y.





**Рисунок 10.** Z-траектория полета объекта по оси z; gz- желаемая траектории по оси z.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили определить показатели точности и качества управления движением БПЛА по заданной траектории, представленные в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты исследования закона управления движением БПЛА.

Критерий	Значение
Перерегулирование при скачкообразном задающем воздействии по каналам	X: 20%, Y: 15%, Z: 30%
Ошибка регулирования при скачкообразном задающем воздействии по каналам	X: 0.2, Y: 0.15, Z: 0.3
Время регулирования при скачкообразном задающем воздействии	15с.
Перерегулирование при линейно-нарастающем задающем воздействии по каналам	X: 1.25%, Y: 0%, Z: 5%
Ошибка регулирования при линейно-нарастающем задающем воздействии по каналам	X: 1, Y: 0, Z: 8
Время регулирования при линейно-нарастающем задающем воздействии	2с.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования подтверждают работоспособность выбранной схемы системы автоматического управления. Использование дуальности задачи синтеза закона управления и задачи построения наблюдателя позволило успешно задачу построения систем управления. Закон управления в сочетании с наблюдателем не слишком сложен. Следовательно, его реализация возможна с использованием относительно недорогого вычислительного комплекса. Тем не менее, как показали результаты моделирования, показатели точности и качества процесса управления различны на различных этапах работы. При этом на этапе прямолинейного полета (рабочий режим) требования к точности следования по заданной траектории выполняются. На этапах взлета и снижения отклонение от желаемой траектории превышает заданные требования. Однако эти этапы являются вспомогательными. На них не ведётся исследование местности. Таким образом, в данной работе продемонстрирована работоспособность реализации в виде пакета программ многофункциональной системы ГАММА-3 проектных операций процедур синтеза закона управления, построения наблюдателя Калмана и математического моделирования систем управления БПЛА с наблюдателем в различных режимах полёта.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 15-07-99684-а).

#### 6. Литература

- [1] Антаневич, А.А. Модальное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас, А.А. Лобатый // Наука и техника. – 2010. – № 4.
- [2] Иванова, И.А. Способы организации управления беспилотными летательными аппаратами / И.А. Иванова, В.В. Никонов, А.А. Царева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – №11-1. – С. 56-63.
- [3] Кузин, А.В. Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата / А.В. Кузин, Д.В. Курмаков, А.В. Лукьянов, Д.А.

- Михайлин // Электронный журнал. Труды МАИ. – № 70. Режим доступа: <http://www.mai.ru/upload/iblock/771/771361e01ba512ffb321f28cc51fb712.pdf>.
- [4] Макаров, И.М. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – № 2. – С. 29-36.
- [5] Моисеев, В.С. Структура и функции перспективной интеллектуальной системы навигации и управления БЛА / В.С. Моисеев, И.В. Матвеев // Кибернетика и высокие технологии XXI века. Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф.– Воронеж, 2011. – Т.2. – С. 622-631.
- [6] Bouabdallah, S. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor / S. Bouabdallah, A. Noth // Proc. (IEEE) International Conference on Intelligent Robots (IROS'04), (Sendai, Japan), 2004.
- [7] Guenard, N. Control laws for the tele operation of an unmanned aerial vehicle known as an x4-flyer / N. Guenard // Proc. (IEEE) International Conference on Intelligent Robots (IROS'06), (Beijing, China), 2006.
- [8] Artale, V. Real-Time System based on a Neural Network and PID Flight Control / V. Artale, M. Collotta, C. Milazzo, G. Pau, A. Ricciardello // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2016. – Vol. 2. – P. 395-402.
- [9] Александров, А.Г. Система ГАММА-3 и ее применение / А.Г. Александров, Л.С. Михайлова, М.Ф. Степанов // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 10. – С. 19-27.
- [10] Степанов, М.Ф. Автоматическое решение формализованных задач теории автоматического управления / М.Ф. Степанов. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. – 376 с.
- [11] Stepanov, M.F. Development tools of the intellectual self-organized systems of automatic control / M.F. Stepanov, A.M. Stepanov, M.A. Pakhomov, A.P. Salikhova, L.S. Mikhailova // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 674-680. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-674-680.
- [12] Степанов, М.Ф. Математическое моделирование интеллектуальных самоорганизующихся систем: исследование механизма планирования действий / М.Ф. Степанов, А.М. Степанов // Сборник материалов Международной конференции и молодежной школы "Информационные технологии и нанотехнологии" (Конференция ИТНТ-2017) 17-19 мая 2017 года. – Самара, 2017. – С. 1419-1424.



# The means of the GAMMA-3 system for the synthesis and mathematical modeling of the UAV trajectory control systems in the Earth remote sensing problems

M.F. Stepanov<sup>1</sup>, A.M. Stepanov<sup>2</sup>, A.R. Salikhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Politechnicheskaya str., 77, Saratov, Russia, 410054

<sup>2</sup>Institute of Precision Mechanics and Control of Russian Academy of Sciences, Rabochayastr., 24, Saratov, Russia, 410028

**Abstract.** The development of control systems for complex technical plants involves the execution of a number of computationally complex procedures, many of which require multiple iterative implementation, in connection with the underdevelopment of the task, incomplete information about the control plant and the conditions of its operation, the insufficient elaboration of the methods of automatic control theory in connection with its ongoing active development. Therefore, the relevance of developing automation tools for solving control tasks is not reduced. This work is devoted to the presentation of the approach to the expansion of classes of solved problems of the multifunctional system GAMMA-3, the feature of which is the availability of problem solving capabilities in both traditional procedural and nonprocedural settings. The proposed approach involves first expanding the solved classes of procedurally assigned tasks, as the most formalized process. The next stage is the formalization and generalization of the accumulated procedural knowledge in the new extended model of the subject area, on which a non-procedural statement of the problem is allowed. The solution of such problems requires the involvement of intellectual components of the GAMMA-3 system.

**Keywords:** automatic control systems, UAV, mathematical modelling.