

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

**А.А. Лобатый**

*Белорусский национальный технический университет,  
Беларусь, Минск, lobaty@bntu.by*

*Аннотация.* В статье проводится обзор и краткий анализ работ автора и его учеников, посвященных исследованию робототехнических и мехатронных систем применительно к беспилотным летательным аппаратам и их системам. Рассматриваются задачи анализа и синтеза интеллектуальных систем управления на основе их математических моделей с учетом наличия неопределенностей.

*Ключевые слова:* стохастическая система, управление, беспилотный летательный аппарат.

## METHODS FOR ANALYSIS AND SYNTHESIS OF ROBOTICS AND MECHATRONIC SYSTEMS

**A.A. Lobaty**

*Belarusian State Technological University,  
Belarus, Minsk, lobaty@bntu.by*

*Abstract.* The article reviews and briefly analyzes the work of the author and his students devoted to the study of robotic and mechatronic systems applied to unmanned aerial vehicles. The problems of analysis and synthesis of intelligent control systems are considered on the basis of their mathematical models, taking into account the presence of uncertainties.

*Keywords:* stochastic system, control, unmanned aerial vehicle.

Интенсивно развивающиеся информационные технологии предоставляют возможность эффективного решения задач исследования сложных динамических систем различной физической природы. При этом, как правило, отходят на второй план традиционные подходы, основанные на аналитическом решении задач анализа и синтеза математических моделей систем. В то же время современные информационные технологии позволяют значительно расширить круг задач, решаемых с помощью известных аналитических методов за счет использования систем компьютерной математики или других программных пакетов.

Одним из перспективных направлений развития техники и технологий является решение задач анализа и синтеза сложных мехатронных и робототехнических систем, к которым относится широкий класс беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на основе использования их математических моделей. Работы автора совместно с его учениками [1-27] посвящены решению этих задач.

В работах [1-4] рассматривается анализ построения и исследования математических моделей БЛА как сложных динамических стохастических систем. При этом в работе [1] аналитически получены выражения для векторов сноса и матриц диффузии подсистем сложной стохастической системы, в которых учтены составляющие, зависящие от детерминированного и случайного влияния других подсистем системы. В работе [2] рассмотрены принципы построения математических моделей беспилотных авиационных комплексов как сложных систем, состоящих из совокупности подсистем, каждая из которых рассматривается как система. При этом взаимосвязи между подсистемами описываются с помощью топологических уравнений на основе теории графов, а для составления компонентных уравнений, описывающих динамику подсистем, предлагается использовать дифференциальные уравнения разрывного типа на основе теории систем случайной структуры. В работе [3] рассматривается выбор одного объекта из нескольких, имеющихся в наличии, по критериям эффективности

их применения на основе экспертной оценки. Используется метод анализа иерархий двух уровней при трех различных альтернативах решений. Для каждого уровня иерархии получены матрицы парных сравнений, проведена их нормировка и вычислены значения комбинированных весов критериев, на основе которых принимаются решения о выборе. В работе [4] решается задача определения формы и параметров математической модели движения БЛА. Используются результаты экспериментальных исследований полета БЛА, в качестве которых рассматриваются известные значения входного и выходного сигналов при заданных условиях полета.

Работы [5-8] посвящены исследованию вопросов аналитической оценки надежности сложных динамических стохастических систем на примере БЛА. В работе [5] на основе теории марковских процессов случайной структуры решается задача вероятностного анализа граничных режимов работы стохастической динамической системы. Аналитически получены выражения для вычисления интенсивностей поглощения реализаций случайного процесса. Это позволяет по известным статистическим характеристикам фазовых координат оценивать вероятность безотказной работы системы управления. В работе [6] рассматривается задача оценки воздействия вибраций на чувствительные элементы системы. Аналитически получены зависимости интенсивности и вероятности выхода процесса, характеризующего состояние элемента системы за заданный диапазон, что позволяет оценить работоспособность и безотказность системы. В работе [7] решается задача вероятностного анализа сложной стохастической системы при случайном, скачкообразном характере изменения её состояний. Получено векторно-матричное дифференциальное уравнение для вектора вероятностей состояний подсистем, отличающееся учётом взаимосвязей подсистем между собой. В работе [8] Решается задача вероятностного анализа пересечения БЛА границы зоны, запретной для полетов. Задача решается на основе применения теории марковских процессов случайной структуры с поглощением реализаций на границе заданной области. Особенностью данного подхода является одновременное рассмотрение двух плотностей вероятности распределения фазовых координат, характеризующих граничные условия.

Работы [9-14] посвящены решению задач формирования траекторий полёта и аналитического синтеза законов управления БЛА. В работе [9] рассматривается задача синтеза закона управления БЛА на основе аппроксимации полиномом заданной траектории полета и синтеза модального регулятора, обеспечивающего требуемое расположение корней характеристического полинома замкнутой системы управления. При этом обеспечивается устойчивость и заданные характеристики переходного процесса управления летательным аппаратом. В работе [10] рассматривается задача синтеза алгоритмов управления боковым движением БЛА на основе метода модального управления. Разработана методика аналитического синтеза системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом на основе модального управления с использованием полиномов Баттерворта. Проведённое математическое моделирование процесса стабилизации БЛА показало работоспособность и эффективность данного подхода в условиях ветровых возмущений атмосферы. В работе [11] рассматривается задача аналитического синтеза программного управления беспилотным летательным аппаратом при наведении его в заданную точку пространства. Задача решена с использованием принципа максимума, учитывающего конечную цель управления и интегральные затраты на него, аналитически получен оптимальный закон изменения управляющей перегрузки летательного аппарата. В работе [12] решается задача аналитического синтеза управления БЛА при наведении его по траектории, заданной опорными точками в инерциальной системе координат, и заданном критерии оптимизацию. Приводится пример, иллюстрирующий работоспособность предложенных теоретических положений. В работе [13] решается задача исследования применения в системе управления нечеткого регулятора, основанного на использовании теории нечетких множеств, и показано, что при решении задачи обеспечения требуемых динамических свойств системы в регуляторе происходит автоматическая подстройка коэффициентов усиления параметров, используемых для управления. В работе [14] проводится аналитический синтез закона управления для беспилотного летательного ап-

парата в случае, когда происходит наведение его по траектории, которая задана опорными точками пространства в инерциальной системе отсчета. Для достижения поставленной цели траектория полета рассматривается состоящей из отдельных интервалов, на каждом из которых решается задача оптимизации управления.

Работы [15-21] посвящены вопросам оценивания параметров, используемых для управления БЛА. В работе [15] решается задача определения функции принадлежности выходных сигналов стохастической нелинейной системы на основе ее вероятностного анализа при использовании метода статистической линеаризации нелинейностей. Получено векторно-матричное дифференциальное уравнение для вектора вероятностей состояний системы и дифференциальные уравнения для вероятностных моментов. В работе [16] на основе теории оптимальной фильтрации проводится анализ методических ошибок, которые возможны при применении алгоритма оптимальной оценки фазовых координат стохастической системы. Проводится исследование этих ошибок путём моделирования конкретного примера. В работе [17] на основе теории систем случайной структуры рассматривается задача комплексирования в БЛА инерциальной навигационной системы и спутниковой навигационной системы с идентификацией режимов работы и оптимальной оценкой выходных сигналов измерителей. В работе [18] решается задача комплексирования измерителей случайных процессов и фильтров их оценки с помощью алгоритмов нечеткой логики. В работе [19] рассматривается задача получения уравнения для апостериорной плотности вероятности стохастического марковского процесса при линейной модели измерений. В отличие от распространенных подходов, основанных на рассмотрении в качестве критерия оптимизации минимума среднего квадрата ошибки оценивания, в данном случае в качестве критерия оптимизации рассматривается максимум апостериорной плотности вероятности оцениваемого процесса. В работе [20] рассматривается задача оценивания информации, содержащейся в случайных сигналах, поступающих от различных источников – измерителей. Для повышения точности оценивания предлагается применять комплексирование всех возможных измерителей с введением дополнительной априорной информации с помощью системы нечеткой логики. В работе [21] рассмотрена задача комплексирования измерителей случайного процесса в общей постановке на основе предложенного нового критерия максимума апостериорного правдоподобия, объединяющего критерий максимума правдоподобия и критерий максимума апостериорной вероятности, на основе чего разработана общая методика комплексирования.

В работах [22-27] решаются задачи разработки математических моделей и законов управления гибридными непрерывно-дискретными электротехническими системами, применяемыми в качестве приводов управляющих элементов БЛА. В работе [22] рассмотрено моделирование гибридной электротехнической системы с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. Получено векторно-матричное стохастическое уравнение, описывающее динамику процессов, в котором представлена как непрерывная составляющая, так и дискретная составляющая, характеризующая амплитудную модуляцию сигналов. На основе математической модели гибридной системы получено уравнение для плотности вероятности распределения фазовых координат системы. В работе [23] рассматриваются особенности математического моделирования гибридной электротехнической системы, к классу которых относятся системы, содержащие в своем составе как непрерывные, так и дискретные элементы. Предлагается решать задачу оптимального управления гибридной системой на основе формирования такого сигнала управления на выходе контроллера (регулятора), который минимизирует заданный интегральный функционал качества, в качестве которого рассматривается линейный квадратичный функционал. В работе [24] рассматривается задача определения параметров системы (объекта идентификации), заданной стохастической математической моделью, включающей в себя случайные функции времени. Предложен алгоритм идентификации параметров математической модели стохастической системы неградиентным случайным поиском, особенностью которого является его применимость к математическим моделям практически любого вида, так как примененный алгоритм не зависит от линеаризации и дифференцируемости функций, входящих в математическую модель системы. В рабо-

те [25] рассматривается задача параметрической идентификации математической модели технического устройства, в качестве которого рассматривается электропривод системы мониторинга, установленной на БЛА. Предлагается решать задачу путем применения поискового градиентного алгоритма идентификации при заданной целевой функции невязки в виде квадрата разности выходного сигнала идентифицируемого элемента системы и его модели. При решении задачи учитывается случайный характер процессов, происходящих в системе и на выходе измерителя выходного сигнала. В работе [26] рассматривается задача демпфирования случайных воздействий на подвижную платформу с размещенной на ней системой мониторинга земной поверхности, установленную на БЛА. Предлагается методика построения робастной системы фазового управления с применением анизотропийного регулятора. Путем математического моделирования получены коэффициенты оптимального регулятора. В работе [27] рассматривается задача аналитического синтеза управляющего сигнала электроприводом. В качестве критерия оптимизации предлагается рассматривать время перехода системы из начального состояния в заданное конечное состояние при заданных ограничениях. Получены выражения для матрицы переходов системы и управляющего сигнала в векторном виде.

#### Список литературы:

1. Лобатый, А.А. Локальные характеристики сложной стохастической системы / А.А. Лобатый // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 1-3. – С. 4-8.
2. Лобатый, А.А. Беспилотный авиационный комплекс как сложная мультиструктурная система / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 1. – С. 4-9.
3. Лобатый, А.А. Принятие решений при выборе объектов по критериям эффективности / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 4. – С. 36-39.
4. Лобатый, А.А. Идентификация упрощенной математической модели беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Яцына, С.С. Прохорович, Е.А. Хвилько // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 2(26). – С. 26-33.
5. Лобатый, А.А. Аналитическое моделирование граничных режимов работы стохастической системы / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Доклады БГУИР. – 2009. – № 4 (42). – С. 17-23.
6. Лобатый, А.А. Вероятностная оценка влияния вибраций на чувствительные элементы системы / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 34-37.
7. Лобатый, А.А. Анализ надёжности сложной системы с помощью топологических (56) . – С. 90-95.
8. Лобатый, А.А. Вероятностный анализ попадания беспилотного летательного аппарата в запретную зону / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Яцына, В.Ю. Степанов, А.Ю. Бумай // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 4. – С. 46-54.
9. Лобатый, А.А. Аналитический синтез управления беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Сборник статей ВА РБ. – 2009. – № 17. – С. 62-66.
10. Лобатый, А.А. Модальное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 37-40.
11. Лобатый, А.А. Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Наука и техника. – 2012. – № 3. – С. 17-20.
12. Лобатый, А.А. Интервально-оптимальное программное управление летательным аппаратом / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 25-29.
13. Лобатый, А.А. Обеспечение требуемых динамических свойств системы с помощью нечеткого регулятора / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Наука и техника. – 2014. – № 3. – С. 7-11.

14. Лобатый, А.А. Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай, Ду Цзюнь. // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7-8. – С. 50-57.
15. Лобатый, А.А. Фаззификация сигналов нелинейной стохастической системы / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Наука и техника. – 2013 № 2. – С. 28-32.
16. Лобатый, А.А. Особенности применения фильтров Калмана-Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А.А. Лобатый, А.С. Бенкафо // Доклады БГУИР. – 2013. – № 5(75). – С. 67-71.
17. Лобатый, А.А. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многорежимности / А.А. Лобатый, А.С. Бенкафо // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4(82) . – С. 52-58.
18. Лобатый, А.А. Структурно-параметрическая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации / А.А. Лобатый, А.С. Бенкафо, А.С. Абуфанас // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4. – С. 4-8.
19. Лобатый, А.А. Оптимальное оценивание случайного процесса по критерию максимума апостериорной вероятности / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Яцына, Н.Н. Арефьев // Системный анализ и прикладная информатика, 2016. № 1. С. 35-41.
20. Лобатый, А.А. Пошаговая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации случайных сигналов / А.А. Лобатый, А.С. Радкевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 1. – С. 35-40.
21. Лобатый, А.А. Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов / А.А. Лобатый, А.Ю. Бумай // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 1. – С. 24-31.
22. Лобатый, А.А. Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А.А. Лобатый, Ю.Н. Петренко, И. Эльзейн, А.А. Абуфанас // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 322-328.
23. Лобатый, А.А. Импульсное управление гибридной электротехнической системой / А.А. Лобатый, Ю.Н. Петренко, И. Эльзейн, А.А. Абуфанас // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 4(12). – С. 46-
24. Лобатый, А.А. Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском / А.А. Лобатый, В.Ю. Степанов // Наука и техника. – 2017. – № 3. – С. 256-261.
25. Лобатый, А.А. Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас, А.Г. Шведко // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 2(14). – С. 39-45.
26. Лобатый, А.А. Анизотропный регулятор демпфирования случайных колебаний подвижной платформы беспилотного летательного аппарата / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас, Ю.Ф. Яцына // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 3. – С. 13-19.
27. Лобатый, А.А. Аналитический синтез форсированного импульсного управления электроприводом системы слежения / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас, Ю.Ф. Яцына. // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 4. – С. 16-19.