

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

**А.А. Лобатый**

*Белорусский национальный технический университет,  
Беларусь, Минск, lobaty@tut.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. 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.

## ANALYTICAL ANALYSIS AND SYNTHESIS OF ROBOTOTECHNICAL MECHATRON SYSTEMS

**A.A. Lobaty**

*Belarusian State Technological University,  
Belarus, Minsk, lobaty@tut.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 дают возможность 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 систем.

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 [1-21] посвящены решению этих задач.

В работах [1-3] 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 получе-

ны матрицы парных сравнений, проведена их нормировка и вычислены значения комбинированных весов критериев, на основе которых принимаются решения о выборе.

Работы [4-6] посвящены исследованию вопросов аналитической оценки надежности сложных динамических стохастических систем на примере БЛА. В работе [4] 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 [5] 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 [6] 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.

Работы [7-11] посвящены решению задач формирования траекторий полёта и аналитического синтеза законов управления БЛА. В работе [7] 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 [8] 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 [9] 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 [10] 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 [11] 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.

Работы [12-16] посвящены вопросам оценивания параметров, используемых для управления БЛА. В работе [12] 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 [13] 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 [14] 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 [15] решается задача комплексирования измерителей случайных процессов и фильтров их оценки с помощью алгоритмов нечеткой логики. В работе [16] 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 работах [17-21] решаются задачи разработки математических моделей и законов управления гибридными непрерывно-дискретными электротехническими системами, применяемыми в качестве приводов управляющих элементов БЛА. В работе [17] 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 [18] 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 [19] 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 работе [20] 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 [21] 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.

#### Библиографический список

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. Аналитическое моделирование граничных режимов работы стохастической системы / А.А. Лобатый, Ж.М. Саид // Доклады БГУИР. – 2009. – № 4 (42). – С. 17-23.

5. Лобатый, А.А. Вероятностная оценка влияния вибраций на чувствительные элементы системы / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 34-37.
6. Лобатый, А.А. Анализ надёжности сложной системы с помощью топологических уравнений / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Доклады БГУИР. – 2011. – № 2 (56) . – С. 90-95.
7. 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.
8. Лобатый, А.А. Модальное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 37-40.
9. Лобатый, А.А. Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Наука и техника. – 2012. – № 3. – С. 17-20.
10. Лобатый, А.А. Интервально-оптимальное программное управление летательным аппаратом / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 25-29.
11. 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.
12. Лобатый, А.А. Фаззификация сигналов нелинейной стохастической системы / А.А. Лобатый, М.А. Аль-Машхадани // Наука и техника. – 2013 № 2. – С. 28-32.
13. 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.
14. Лобатый, А.А. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многоорежимности / А.А. Лобатый, А.С. Бенкафо // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4(82) . – С. 52-58.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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-
19. Лобатый, А.А. Параметрическая идентификация стохастической системы неградиентным случайным поиском / А.А. Лобатый, В.Ю. Степанов // Наука и техника. – 2017. – № 3. – С. 256-261.
20. 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.
21. 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.