

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 629.735.33

ИКУАС
Юсиф Ф. Мабрук

**СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск, 2012

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

- Научный руководитель: Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета
- Официальные оппоненты: Кулаков Геннадий Тихонович, доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета;
- Стрижнев Александр Гаврилович, кандидат технических наук, доцент начальник сектора СКБ-4 (Научно- производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»)
- Оппонирующая организация: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, тел. (017) 293-95-64, E-mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

Н.Н. Гурский

© Икуас Юсиф Ф.Мабрук, 2012
© Белорусский национальный
технический университет, 2012

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Благодаря революционному развитию ряда технических направлений, беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для решения широкого спектра задач военного и гражданского характера. Исследованию БЛА посвящен ряд работ, в которых рассматриваются вопросы анализа и синтеза, оценки точности систем и эффективности применения. Однако развитие науки и техники, в первую очередь – информационных технологий, повышает требования к результатам научных исследований, ставит новые задачи, к которым в частности относится оптимальная обработка информации при наличии неопределённостей, оптимизация параметров, оценка и прогноз технического состояния БЛА. Достижения в области технологий микроэлектроники, информатики, делают возможным решение задач по созданию БЛА различного назначения и конструктивной компоновки. Поэтому важным является разработка современных теоретических методов по обоснованию и синтезу систем управления БЛА как сложных динамических систем.

В диссертации рассмотрены вопросы анализа и оценки состояния системы управления БЛА на основе теории динамических систем случайной структуры, разработаны законы управления БЛА, позволяющие учесть ряд специфических свойств БЛА, решать прикладные задачи. Приводимые методики и алгоритмы основаны на математических моделях, учитывающих как динамические свойства систем, так и дискретный характер изменения их структуры.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю доктору технических наук, профессору Лобатому Александру Александровичу, а также всему коллективу кафедры «Информационные системы и технологии» БНТУ за оказанную помощь и поддержку при работе над диссертацией.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема работы соответствует научному направлению кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Работа проводилась в рамках научно-технической работы ГБ №10-114 «Математическое и программное обеспечение систем обработки информации в образовании и автоматизированных системах управления техническими объектами», проводимой Белорусским национальным техническим университетом, а также в рамках научных программ Ливии.

Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка алгоритмов управления и синтез методик оценки эффективности применения и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ БЛА, их математических моделей и параметрических неопределённостей, оказывающих влияние на точность и работоспособность систем управления БЛА.
2. Разработать методику аналитического моделирования граничных режимов работы подсистем системы управления БЛА.
3. Разработать методики и алгоритмы синтеза оптимальных законов управления БЛА для различных условий применения.
4. Разработать методики и алгоритмы оценки надёжности и диагностики отказов БЛА с помощью топологических уравнений и теории динамических систем случайной структуры.

Объектом исследования являются системы управления беспилотного летательного аппарата. Предметом исследования являются характеристики параметров управления БЛА, а также способы и алгоритмы, позволяющие повысить эффективность применения БЛА.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика аналитического моделирования граничных режимов работы подсистем беспилотного летательного аппарата, позволяющая на основе заданных математических моделей неопределённостей и ограничений на изменение параметров системы производить вычисление интенсивностей смены состояний подсистем и оценивать характеристики надёжности БЛА как сложной динамической системы.
2. Методики и алгоритмы аналитического синтеза оптимальных по заданному критерию законов управления БЛА для режимов вывода в заданную точку пространства и полёта по заданному маршруту, учитывающие конструктивные характеристики БЛА и обеспечивающие заданный характер переходных процессов в системе управления.
3. Методики и алгоритмы аналитической оценки и прогноза технического состояния подсистем БЛА, основанные на комплексном использовании математических моделей БЛА в виде стохастических дифференциальных уравнений разрывного типа и математических моделей априорных неопределённостей.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены лично автором. Научный руководитель принимал участие в постановке задач, определении возможных путей их решения, предварительном анализе, обсуждении результатов исследований, проведённых автором. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками диссертационной работы.

Автор самостоятельно получил основные результаты диссертационной работы. Общая концепция исследований и отдельные теоретические методы разработаны совместно с научным руководителем.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании» (Гомель, 2010), «XVII Туполевские чтения» (Казань, 2010), «XIX Международная научно-практическая конференция» (Харьков, 2011), седьмой, восьмой и девятой международных научно-технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» 2009 – 2011 гг. Результаты диссертации также докладывались на научных семинарах кафедры «Информационные системы и технологии» и кафедры «Информационные технологии в управлении» Белорусского национального технического университета.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 5 научных статей в рецензируемых журналах согласно перечня ВАК Республики Беларусь общим объёмом 2.1 авторских листа и 8 тезисов докладов на научных конференциях. Количество и объём публикаций по теме диссертации соответствуют пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трёх глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и девяти приложений.

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, даётся обоснование круга рассмотренных вопросов. В первой главе проведён анализ БЛА и их математических моделей, обоснованы подходы к моделированию с учётом граничных режимов. Во второй главе решаются задачи синтеза оптимальных законов управления БЛА для различных условий применения. В третьей главе проводится оценка эксплуатационных характеристик системы

управления БЛА при неопределённостях исходной информации, исследуются алгоритмы технической диагностики отказов и прогноза технического состояния подсистем БЛА.

В приложениях приведены графики, таблицы, схемы и математические выкладки, уточняющие и поясняющие некоторые вопросы диссертационной работы, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

Общий объём диссертации составляет 117 страниц. В том числе: 83 страницы основного текста, 31 рисунок, расположенный в тексте диссертации, список использованных источников, насчитывающий 114 наименований и список публикаций автора по теме диссертации на 9 страницах, а также приложения на 21 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, обоснована необходимость проведения работы по анализу и аналитическому синтезу построенных на новых принципах систем управления беспилотных летательных аппаратов, показана практическая значимость работы.

В первой главе рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, проводится анализ научно-технической литературы по БЛА и их математическим моделям, обоснована структура математической модели для имитационного и аналитического моделирования функционирования подсистем БЛА. Главное требование к математической модели, предназначенной для исследования динамического объекта, состоит в необходимости выделения главных сторон рассматриваемого явления. При этом в ряде случаев оправдан отказ от изучения второстепенных факторов и связей. В соответствии с этим проведено обоснование математической модели для исследования БЛА.

Анализ математических моделей и неопределённостей БЛА позволяет сделать вывод о том, что математическая модель БЛА и влияющие на неё внешние факторы могут быть представлены совокупностью стохастических дифференциальных уравнений в форме Коши. Так как состояние БЛА (вид уравнений) может изменяться скачкообразно в случайные моменты времени, то математическую модель для исследования БЛА можно рассматривать как марковский процесс случайной структуры. Векторно-матричное уравнение такого процесса имеет вид

$$\dot{X}^{\epsilon}(t) = D(t)\varphi^{\epsilon}(X, t) + W^{\epsilon}(X, t)U(t) + H^{\epsilon}(X, t)\xi(t), X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $\dot{X}^{\epsilon}(t)$ – в общем случае n -мерный случайный вектор; $D(t)$ – матрица детерминированных параметров; $\varphi^{\epsilon}(X, t)$ – векторная; $W^{\epsilon}(X, t)$, $H^{\epsilon}(X, t)$ –

матричные нелинейные функции; $U(t)$ – векторная функция управления; $\xi(t)$ – вектор центрированного гауссова белого шума с матрицей интенсивностей $G(t)$. $S(t) = \{s, t\}$ – индекс структуры системы.

Для каждой подсистемы БЛА марковскому процессу, описываемому уравнением (1), соответствует обобщенное уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова относительно плотности вероятности $f_i^{(s)}(X_i, t)$ не поглощенных реализаций s -й структуры.

$$\frac{\partial f_i^{(s)}(X_i, t)}{\partial t} = -\text{div} \pi_i^{(s)}(X_i, t) - \beta_i(X, s, t) + \gamma_i(X, s, t), \quad f_i^{(s)}(X_i, t_0) = f_{i0}^{(s)}(X_{i0}), \quad (2)$$

где $\pi_i^{(s)}(X_i, t)$ – вектор плотности потока вероятности; $\beta_i^{(sr)}, \gamma_i^{(rs)}$ – функции поглощения и восстановления реализаций фазовых координат s -й структуры, которые определяются граничными режимами работы БЛА.

Воздействие на БЛА случайных факторов (турбулентность атмосферы, работа двигательной установки) приводит к появлению вибрационных явлений в элементах конструкции БЛА, что особенно вредно для чувствительных датчиков, информация с которых используется для управления БЛА с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Вибрации являются случайным процессом $X(t)$, корреляционная функция которого, как правило, аппроксимируется выражением

$$R_x(\tau) = D_x e^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau + \gamma \sin \omega_0 |\tau|, \quad (3)$$

где D_x – дисперсия процесса $X(t)$, γ – параметр, показывающий, что преобладает в корреляционной функции (1.51) убывание по экспоненциальному закону или периодические колебания с частотой ω_0 . В общем случае $|\gamma| \leq \frac{\alpha}{\omega_0}$. α –

параметр затухания, $\alpha = \frac{1}{\vartheta}$, ϑ – постоянная времени.

Отрицательное влияние процесса $X(t)$ (вибраций) проявляется в превышении им некоторого допустимого уровня C , определённого для конкретного элемента системы (выброс случайного процесса). Среднее число положительных выбросов $X(t)$ за уровень C на интервале $[0, T]$ случайно и определяется следующим выражением

$$N_C(T) = \int_0^T \dot{X}(t) \delta[X(t) - C] 1[\dot{X}(t)] dt. \quad (4)$$

Для гауссова случайного процесса вибраций аналитически получено выражение для определения интенсивности числа выбросов [2]

$$\lambda_c(T) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\dot{X}}{\sqrt{D_x D_{\dot{x}}(1-r^2)}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(X-m_x)^2}{D_x} - \frac{2r(X-m_x)(\dot{X}-m_{\dot{x}})}{\sqrt{D_x D_{\dot{x}}}} + \frac{(\dot{X}-m_{\dot{x}})^2}{D_{\dot{x}}} \right]\right) d\dot{X} \quad (5)$$

Для процесса, описываемого уравнениями типа (1), получены дифференциальные уравнения для математических ожиданий и корреляционных моментов системы, подверженной действию вибраций. Выражение (5) позволяет исследовать надёжность системы как вероятности отсутствия выбросов P_0 и вероятность хотя бы одного выброса P_1 на интервале $[0,t] \subset T$ и оценить вероятностные характеристики случайного процесса с корреляционной функцией вида (3).

На рисунке 1 представлена зависимость интенсивности выбросов λ_c (1/с) от текущего времени t_c (с), полученная в среде Mathcad для заданных параметров вибраций элемента БЛА.

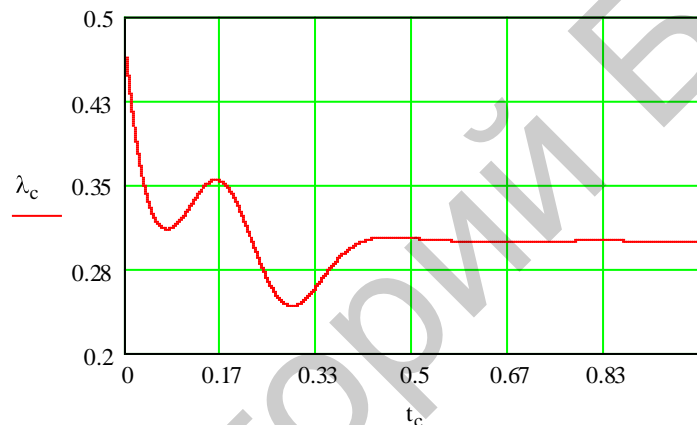


Рисунок 1 – Изменение интенсивности выбросов в переходном режиме

Предлагаемый подход аналитического определения интенсивностей смены структуры (интенсивностей выбросов) позволяет на основе экспериментально определённых статистических характеристиках внешних воздействий и заданных эксплуатационных параметрах элементов системы, подверженных воздействию вибраций, определить диапазон работоспособности и вероятностные характеристики безотказной работы системы.

Во второй главе рассмотрены вопросы аналитического синтеза законов управления БЛА. Задачи оптимизации системы управления (СУ) БЛА предлагается решать в два этапа: аналитический синтез управлений для упрощённой математической модели – на первом этапе и решение задачи синтеза регулятора для полной математической модели СУ БЛА – на втором этапе.

На основе анализа полётных заданий, выполняемых БЛА в зависимости от траектории полёта, для математических моделей процесса наведения БЛА, представленных в виде векторно-матричных уравнений в форме Коши, проведено обоснование критериев оптимизации, определяющих цель управления и ограничения, в виде функционалов, зависящих от траектории движения БЛА и

управляющих воздействий. Разработан алгоритм оптимального программного управления БЛА для случая, когда необходимо перевести БЛА из заданной точки x_0 в некоторую конечную x_K по оптимальной траектории с обеспечением минимума потерь на управление. В общем случае координата x_K может изменяться в процессе полёта БЛА при изменении полётного задания.

Обосновано, что целесообразнее решить задачу поиска оптимального управления для простой модели, что позволяет получить точный результат, а затем использовать полученное решение в алгоритмах, разработанных на основе многомерной модели процесса наведения БЛА с учетом ограничений. Рассматривается кинематическая схема наведения БЛА в плоскости маневра, что позволяет на этапе аналитического решения оптимизационной задачи не учитывать нелинейности, обусловленные преобразованием координат и свести нелинейную, в общем случае, математическую модель к линейной.

Модель процесса наведения БЛА при данной постановке задачи имеет вид

$$\dot{\omega} + \frac{2\dot{D}}{D} \omega = \frac{1}{D} a, \quad \omega(t_0) = \omega_0, \quad (6)$$

где D – модуль вектора \vec{D} , соединяющего БЛА и точку x_K , \dot{D} – скорость сближения БЛА и точки x_K , $a = a(t)$ – нормальное (управляющее) ускорение БЛА, ω и $\dot{\omega}$ – угловая скорость и ускорение вращения вектора \vec{D} , соответственно.

Минимизируемый функционал качества задан в квадратичной форме – стандартной для задач такого класса

$$J_0 = K_1 \omega^2(t_K) + \int_{t_0}^{t_K} K_2 a^2 dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Аналитически полученный закон изменения потребной управляющей перегрузки БЛА имеет вид [5]

$$a^* = 4\dot{D} \omega_K e^{\frac{-2\dot{D}}{D}(t_K-t)}. \quad (8)$$

Оптимальный закон изменения ω имеет вид

$$\omega^* = \frac{1}{A} \left[(A_0 \omega_0 + B_0 a_0^*) e^{At} - B a^* \right]. \quad (9)$$

Оптимальное время наведения БЛА определяется выражением

$$t_K = t_K^* = \frac{1}{A_K} \ln \left[\frac{A_K \omega_K^* + B_K a^*}{A_0 \omega_0 + B_0 a_0^*} \right]. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрено применение полученных законов a^* и ω^* в типовой ситуации наведения БЛА, при следующих условиях применения: $\dot{D} = -50 \text{ м/с}$, $D_0 = 10000 \text{ м}$, $\omega_0 = 0$, $\omega_K = -0.01^{1/с}$. На рисунке 2 представлены графики изменения a^* и ω^* .

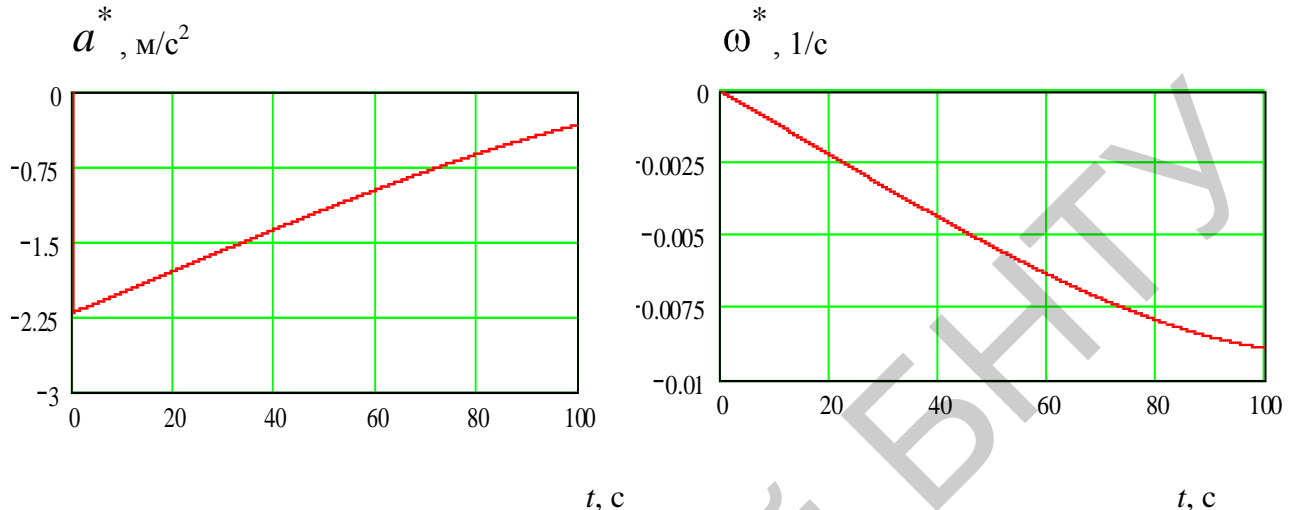


Рисунок 2 – Оптимальные параметры наведения БЛА

Решена задача аналитического синтеза модального управления БЛА при полете по заданному маршруту. Уравнения движения БЛА рассматриваются для симметричной аэродинамической схемы в горизонтальной плоскости в связанной системе координат при постоянной скорости полета. Коэффициенты уравнений математической модели вычислялись для конкретного БЛА нормальной аэродинамической схемы при высоте полета 2000 м, $V=50 \text{ м/с}$, $m=50 \text{ кг}$, $I_{yy}=15 \text{ кг м}^2$, $S_a=1 \text{ м}^2$, $l_a=1 \text{ м}$, $P=100\text{Н}$.

Синтезирован для заданной системы управления БЛА модальный регулятор, обеспечивающий замкнутой системе желаемый спектр (набор корней матрицы A) $\Lambda^* = (-3,5 \pm 3,57j)$, соответствующий постоянной времени БЛА $T=0,2 \text{ с}$ и коэффициенту демпфирования (декременту затухания) $\zeta=0,7$.

Аналитически получен закон управления БЛА, вида [2]

$$\delta = -0,0019a_z - 0,068\omega_y. \quad (11)$$

Данный закон уравнения обеспечивает устойчивость БЛА и необходимую точность обработки потребной перегрузки БЛА, обеспечивающей полет БЛА по заданному маршруту. При использовании пространственных моделей наведения БЛА более высокой размерности приведенная выше методика остается справедливой. При этом отличия будут состоять в определении желаемого спектра (характеристического полинома) замкнутой системы.

В связи с тем, что в процессе полёта, как правило, не предусмотрено энергичное маневрирование БЛА и фазовые координаты его при этом не достигают наложенных на них ограничений, то, используя методы линеаризации относительно опорной траектории, математическую модель динамики БЛА можно описать линейным векторно-матричным дифференциальным уравнением. Для задания приемлемых значений коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы управления БЛА использованы полиномы Баттерворта.

Управление БЛА определяется в виде

$$U = -KX, \quad (12)$$

где K – матрица коэффициентов управления, размерности $m \times n$.

Математическая модель замкнутой системы управления БЛА имеет вид

$$\dot{X} = (A - BK)X. \quad (13)$$

Устойчивость замкнутой системы и заданные показатели ее качества достигаются за счет совпадения корней замкнутой системы (13) с корнями эталонной системы, описываемой уравнением

$$\dot{Y} = CY, \quad (14)$$

где Y – n -мерный вектор состояния; C – заданная матрица коэффициентов размерности $n \times n$.

Для вычисления передаточных чисел матрицы K матрица эталонной модели четвертого порядка C_4 задана в виде

$$C_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2.61 & 3.41 & 2.61 \end{bmatrix} \quad (15)$$

согласно полиному Баттерворта, представленному в следующем виде:

$$s^4 + 2.61\omega_0 s^3 + 3.41\omega_0^2 s^2 + 2.61\omega_0^3 s + \omega_0^4, \quad (16)$$

где ω_0 – число, определяющее ширину полосы пропускания СУ.

При исследовании системы пятого порядка матрица эталонной модели и соответствующий ей полином примут вид

$$C_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 3.24 & 5.24 & 5.24 & 3.24 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$s^5 + 3.24\omega_0 s^4 + 5.24\omega_0^2 s^3 + 5.24\omega_0^3 s^2 + 3.24\omega_0^4 s + \omega_0^5. \quad (18)$$

Полученные передаточные числа обеспечивают точное совпадение корней замкнутой системы управления БЛА с корнями заданной эталонной модели.

Для исследования работоспособности разработанной методики синтеза модального управления БЛА использовалась математическая модель бокового движения гипотетического БЛА с векторами состояния $X = [\omega_x, \gamma, \psi, Z]^T$ и $X = [\omega_x, \gamma, \psi, Z, \int Z]^T$. Здесь ω_x – угловая скорость вращения БЛА относительно продольной оси; γ – угол крена; ψ – угол рыскания; Z – боковая координата (боковое отклонение БЛА от заданной траектории); δ_δ – отклонение органов управления боковым движением БЛА (элеронов); β_B – ветровое возмущение атмосферы. $\int Z = \int Z dt$ – интегральный член, введение которого в вектор состояния обусловлено необходимостью обеспечения астатического регулирования боковой координаты при действии возмущений со стороны атмосферы.

На рисунках 3 и 4 представлены графики изменения параметров бокового движения БЛА: $\omega_x, \gamma, \psi, Z, \delta_\delta, \beta_B$ для данного закона управления [3].

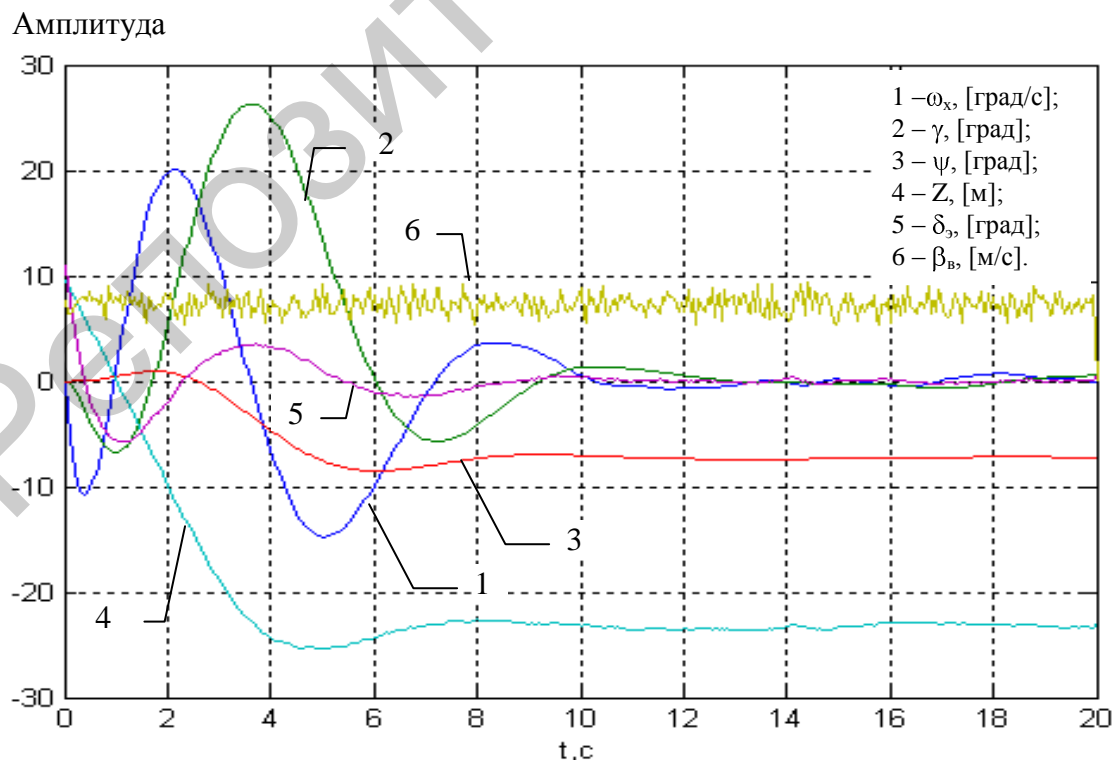


Рисунок 3 – Стабилизация БЛА при действии ветра

(закон управления без интегрального члена)

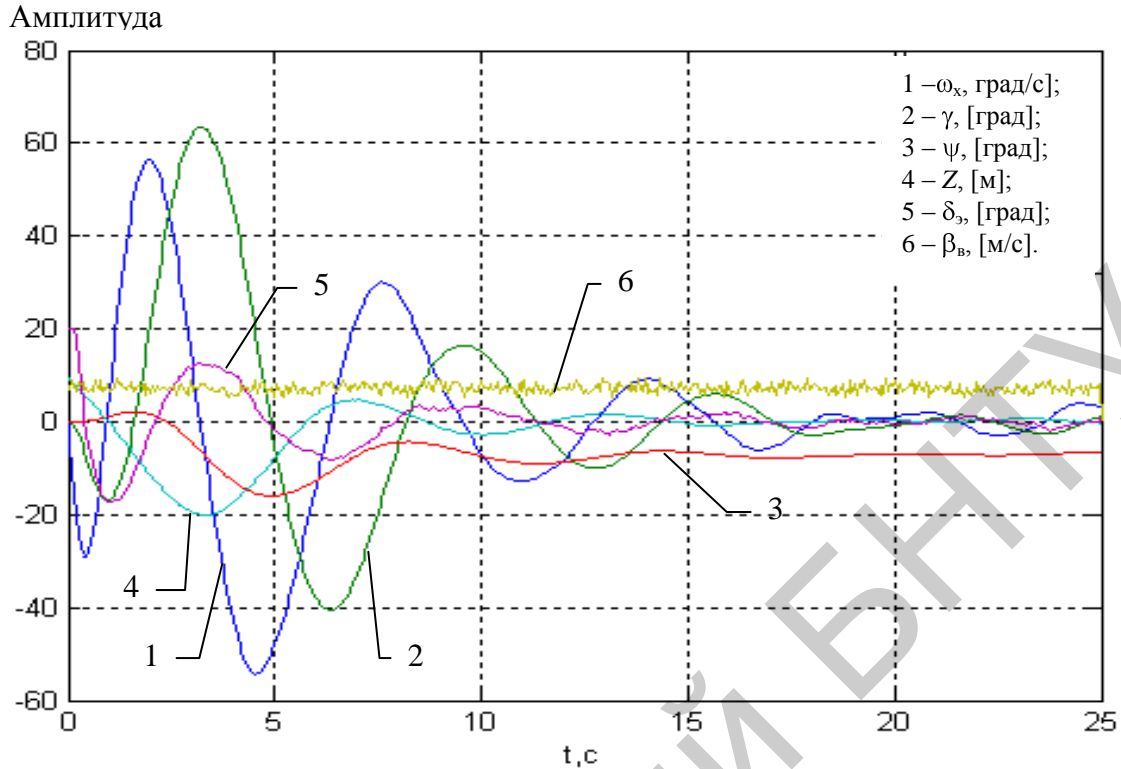


Рисунок 4 – Стабилизация БЛА при действии ветра (закон управления с интегральным членом)

Реакция системы БЛА+СУ на действие ветрового возмущения β_v исследовалась путём моделирования в среде MatLab процесса полёта БЛА. Результаты моделирования показали, что замкнутая система БЛА+СУ является устойчивой, переходной процесс соответствует предъявленным требованиям. При этом применение закона управления БЛА с интегральным членом (система пятого порядка) позволяет при действии ветрового возмущения стабилизировать боковую координату Z без установившейся ошибки.

Разработан алгоритм компенсации влияния на чувствительные элементы бесплатформенной инерциальной навигационной системы БЛА вибраций, вызванных работой двигательной установки БЛА, основанный на апостериорной обработке имеющейся информации и использовании математических моделей процессов, происходящих при полёте БЛА. Математическая модель неопределённостей представлена уравнением вида

$$\ddot{X}(t) + 2\vartheta\omega_0\dot{X} + \omega_0^2 X = \xi, \quad X(t_0) = X_0, \quad \dot{X}(t_0) = \dot{X}_0. \quad (19)$$

На рисунке 4 представлены графики процесса $X(t) = X_1(t)$ и его оптимальной оценки $\hat{X}_1(t)$, полученные интегрированием апостериорных уравнений для вероятностных моментов.

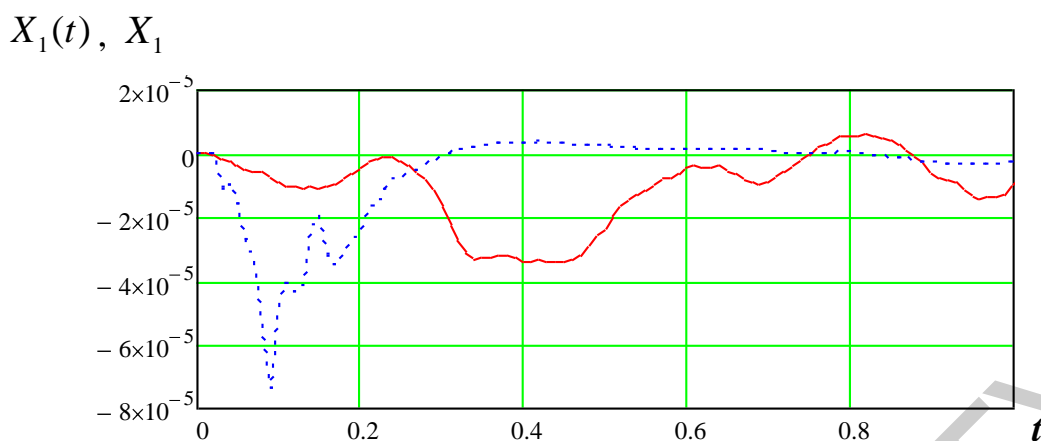


Рисунок 5 – Графики процесса $X_1(t)$ и его оптимальной оценки X_1

Третья глава посвящена разработке методик оценки эксплуатационных характеристик БЛА. Выделены эксплуатационные характеристики БЛА, которые определяют их свойства при подготовке к применению и во многом - влияют на эффективность БАК в целом. Обоснован принцип построения системы контроля БЛА на основе полунатурной модели функционирования и структура построения системы контроля, основанная на комплексном одновременном решении задач оценки параметров объекта контроля, оценки точности и идентификации его состояния. Показано, что при контроле технического состояния отдельной подсистемы БЛА влияние неопределённостей проявляется в виде неучтенных сигналов (шумов), действующих на эту подсистему со стороны других подсистем.

Предложен и исследован алгоритм технической диагностики БЛА как решения задачи идентификации (распознавания) структуры контролируемой системы, включающий оценивание параметров, характеризующих вектор состояния системы, и распознавание событий, представляющих собой наличие того или иного отказа в системе.

В соответствии с теоретическими положениями теории динамических систем со случайно изменяющейся структурой построен алгоритм фильтрации для оценивания фазовых координат системы управления БЛА в каждом из возможных состояний, в которых она может находиться.

$$\left. \begin{aligned}
 \tilde{X}_k^{(l)} &= A_{k-1,k}^{(l)} X_{k-1}^{(l)} + L_{k-1,k}^{(l)} U_{k-1}, \\
 X_k^{(l)} &= \tilde{X}_k^{(l)} + B_k^{(l)} [Z_k - C_k^{(l)} \tilde{X}_k^{(l)} - K_k^{(l)} U_k], \\
 B_k^{(l)} &= \tilde{R}_k^{(l)} C_k^{(l)T} [C_k^{(l)} \tilde{R}_k^{(l)} C_k^{(l)T} + Q_k]^{-1}, \\
 \tilde{R}_k^{(l)} &= A_{k-1,k}^{(l)} R_{k-1}^{(l)} A_{k-1,k}^{(l)T} + H_{k-1,k}^{(l)} G_k^{(l)} H_{k-1,k}^{(l)T}, \\
 R_k^{(l)} &= (I - B_k^{(l)} C_k^{(l)}) \tilde{R}_{k-1}^{(l)},
 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где $\tilde{X}_k^{(l)}$, $X_k^{(l)}$ – априорная и апостериорная оценки вектора состояния на k -м шаге; $\tilde{R}_k^{(l)}$, $R_k^{(l)}$ – априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок оценивания; I – единичная матрица. A , L , C , K – матрицы коэффициентов математической модели системы управления БЛА.

Для определения вероятности l -й структуры использован байесовский алгоритм определения апостериорной вероятности состояния системы при допущении о том, что в процессе контроля переход из одной структуры в другую практически невозможен и априорная вероятность на k -м шаге равна апостериорной вероятности на предыдущем шаге:

$$P_k^{(l)} = \frac{\tilde{P}_k^{(l)} |\tilde{D}_k^{(l)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(l)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(l)}, \tilde{R}_k^{(l)})]}{\sum_{i=1}^{n_l-1} P_k^{(i)} |\tilde{D}_k^{(i)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(i)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(i)}, \tilde{R}_k^{(i)})]}, \quad (21)$$

где $\tilde{P}_k^{(l)} = P_{k-1}^{(l)}$, $\tilde{D}_k^{(l)} = C_k^{(l)} \tilde{R}_k^{(l)} C_k^{(l)T} + Q_k^{(l)}$,

$$\tilde{h}^{(l)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(l)}, \tilde{R}_k^{(l)}) = \frac{1}{2} (Z_k - C_k^{(l)} \tilde{X}_k^{(l)} - K_k^{(l)} U_k)^T (\tilde{D}_k^{(l)})^{-1} (Z_k - C_k^{(l)} \tilde{X}_k^{(l)} - K_k^{(l)} U_k).$$

$\tilde{P}_k^{(l)}$ и $P_{k-1}^{(l)}$ – априорная и апостериорная вероятности l -й структуры на k -м шаге.

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма диагностирования была использована математическая модель автопилота БЛА. В процессе исследования была проверена работоспособность алгоритма при совместном распознавании и оценивании для двух возможных структурных состояний системы. Рассматривались следующие возможные структуры системы: $l=1$ – отказов нет (все параметры равны номинальным); $l=2$ – отказ: $K_{\phi} = 0$ (обрыв в цепи обратной связи по угловому ускорению).

На рисунке 5 приведены зависимости от текущего момента времени t_k (с) апостериорных вероятностей ($P1_k$ и $P2_k$) рассматриваемых в данном примере структур автопилота (среда Mathcad).

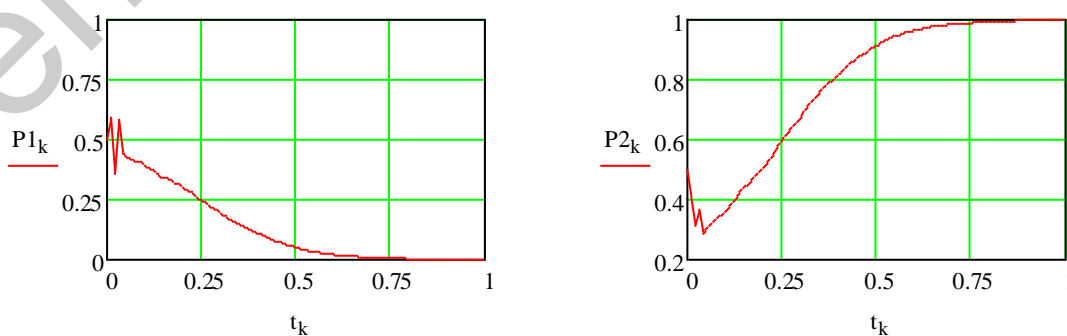


Рисунок 6 – Вероятности возможных структур автопилота

Анализ результатов моделирования показал, что предлагаемые алгоритмы позволяют с высокой степенью достоверности определить структуру (со-

стояние), в которой находится исследуемая динамическая система. Время, необходимое для оценки структуры системы в данном примере, составило менее одной секунды. При этом количество состояний идентифицируемых с помощью рассматриваемого алгоритма диагностики практически не ограничено и зависит от адекватности математических моделей системы, находящейся в том или ином состоянии.

Разработан и исследован алгоритм оценки технического состояния БЛА при неопределённости исходной информации, основанный на использовании традиционных измерительных средств и апостериорной обработке информации с использованием аппарата нечёткой логики.

С помощью пакета нечёткой логики «Fuzzy Logic Toolbox» системы компьютерной математики Matlab было проведено исследование разработанной системы и получены результаты моделирования, отражающие влияние измененного значения контролируемого параметра (обобщённого коэффициента усиления системы управления БЛА) на вероятность нахождения БЛА в работоспособном состоянии.

Разработанная в первой главе диссертации методика аналитического определения интенсивностей изменения параметров БЛА позволяет использовать топологические уравнения системы для вероятностного анализа надёжности БЛА как сложной динамической системы [4].

В качестве примера рассмотрена модель БЛА, представленная структурной схемой, для которой рассматривается два состояния системы: работоспособное и неработоспособное. Результаты проведённых исследований позволили получить конкретные количественные характеристики надёжности БЛА при заданных характеристиках надёжности подсистем, показали влияние иерархического уровня каждой подсистемы а также – влияние на неё других подсистем. Данный подход, основанный на использовании векторно-матричного аппарата, удобен при математическом моделировании сложных систем с большим числом элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведённый анализ принципов построения и основных структурных схем систем управления беспилотных летательных аппаратов выявил общие закономерности их математического описания, характер неопределённостей математических моделей БЛА и случайных процессов, протекающих в системе, позволил обосновать целесообразность использования математической модели

БЛА в классе динамических систем случайной структуры в виде векторно-матричного стохастического уравнения разрывного типа.

Обосновано, что для оценки состояния БЛА и входящих в его состав подсистем, необходимо решать задачи оценки перехода системы из одного состояния в другое при достижении одной или несколькими фазовыми координатами определенных границ, называемых границами поглощения и восстановления реализаций. Это в первую очередь задачи оценки надёжности систем, так как выход параметров системы (подсистемы) за пределы заданного диапазона может приводить к потере системой работоспособности (выходу системы из строя) [1, 2].

2. Разработана методика аналитического определения интенсивностей смены структуры (интенсивностей выбросов) параметров системы [2], позволяющая на основе заранее известных или экспериментально определённых статистических характеристиках внешних воздействий и заданных эксплуатационных параметрах элементов системы, подверженных воздействию вибраций или других случайных факторов, определить диапазон работоспособности и вероятностные характеристики безотказной работы БЛА.

Разработан алгоритм компенсации влияния на чувствительные элементы инерциальной навигационной системы БЛА вибраций, вызванных работой двигательной установки БЛА, позволяющий повысить точность определения параметров управления БЛА, основанный на апостериорной обработке имеющейся информации и использовании математических моделей процессов, происходящих при полёте БЛА.

3. На основе анализа полётных заданий, выполняемых БЛА, в зависимости от траектории полёта для математических моделей процесса наведения БЛА, представленных в виде векторно-матричных уравнений в форме Коши, проведено обоснование критериев оптимизации, определяющих цель управления и ограничения, в виде функционалов, зависящих от траектории движения БЛА и управляющих воздействий. Обосновано, что эти критерии могут быть формализованы в виде задачи Больца и квадратичного функционала качества.

Разработана методика аналитического синтеза оптимального программного управления БЛА на этапе предварительного синтеза системы управления БЛА, основанная на использовании принципа максимума Понтрягина, позволяющая получить оптимальный закон управления для заданного критерия качества при наведении БЛА в заданную точку пространства [5].

4. Разработана методика аналитического синтеза системы управления БЛА 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. Полученные результаты показали, что за-

мкнутая система управления БЛА является устойчивой, переходной процесс соответствует предъявленным требованиям [1, 3].

5. Предложенная методика аналитической оценки характеристик граничных режимов работы БЛА позволяет на основе экспериментально или аналитически определённых статистических характеристик исследуемого процесса и заданных эксплуатационных параметров элементов БЛА (границ работоспособности), определить диапазон работоспособности и случайные параметры, необходимые для вероятностного анализа БЛА как сложной динамической системы с учётом как топологических свойств системы (взаимное влияние подсистем), так и динамических свойств отдельных подсистем. При этом математическая модель БЛА должна включать в себя совокупность топологических уравнений, составленных на основе теории графов и совокупность компонентных уравнений подсистем, в качестве которых целесообразно использовать дифференциальные уравнения разрывного типа в векторно-матричной форме.

Реализация разработанных на основе предложенной методики алгоритмов контроля технического состояния БЛА, позволяет получить более полную информацию о степени взаимного влияния подсистем друг на друга. Результаты, полученные при исследовании методики прогноза технического состояния БЛА, показывают необходимость учёта топологических факторов, которые проявляются в виде влияния на безотказную работу системы смежных с ней систем [2, 4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученную в диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического исследования систем управления беспилотных летательных аппаратов, в том числе применительно к решению вопросов вероятностного анализа, направленных на определение оптимальных эксплуатационных характеристик БЛА по различным критериям качества.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в организациях занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами, а также – в учебном процессе учреждений образования Республики Беларусь и Ливии.

Работа выполнена на действующих основных фондах и не требует дополнительных капитальных вложений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Икуас Ю.Ф. Аналитический синтез управления беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Сборник статей ВА Респ. Беларусь – 2009. – № 17. – С. 62–66.
2. Икуас Ю.Ф. Вероятностная оценка влияния вибраций на чувствительные элементы системы / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 34–37.
3. Икуас Ю.Ф. Модальное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, А.А. Антаневич, Ю.Ф. Икуас // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 37–40.
4. Икуас Ю.Ф. Анализ надёжности сложной системы с помощью топологических уравнений / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Доклады БГУИР. – 2011. – № 2 (56). – С. 90–95.
5. Икуас Ю.Ф. Оптимальное программное управление беспилотным летательным аппаратом / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас // Наука и техника. – 2012. – № 3. – С. 17–20.

Материалы конференций и тезисы докладов

6. Икуас Ю.Ф. Моделирование граничных режимов работы электронно-механических систем / Ю.Ф. Икуас // Материалы Седьмой Международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2009. – С. 153.
- 7-. Икуас Ю.Ф. Аналитическая оценка вероятностных характеристик вибраций системы / Ю.Ф. Икуас // Материалы республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 2009. – С. 402–405.
8. Икуас Ю.Ф. Топологические уравнения для вероятностей состояний / Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы Восьмой Международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2010. – С. 236–237.
9. Икуас Ю.Ф. Обоснование критериев оптимизации систем управления беспилотных летательных аппаратов / Ю.Ф. Икуас // Материалы Восьмой Международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2010. – С. 239.
10. Икуас Ю.Ф. Оценка взаимного влияния подсистем сложной системы. / Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 2010. – С. 22–23.
11. Икуас Ю.Ф. Синтез управления беспилотным летательным аппаратом / Ю.Ф. Икуас // XVII Туполевские чтения: материалы конференции, Казань, 2010. – С. 585–586.

12. Икуас Ю.Ф. Оценка состояния подсистем сложной динамической системы / А.А. Лобатый, Ю.Ф. Икуас, Ж.М. Саид // Материалы Девятой Международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2011. – С. 231.

13. Икуас Ю.Ф. Оценка надёжности системы с помощью топологических уравнений / Ю.Ф. Икуас, А.А. Лобатый // Тезисы докладов XIX Международной научно-практической конференции, Харьков, 2011. – С. 47.

Репозиторий БНТУ

РЭЗІЮМЭ

Ікуас Юсіф Ф. Мабрук Сінтэз кіравання і ацэнка тэхнічнага стану беспілотнага лятальнага апарата

Ключавыя словы: сістэма кіравання, матэматычная мадэль, гранічныя рэжымы, тэхнічны стан.

Мэтай работы з'яўляецца аналіз, распрацоўка, даследаванне і стварэнне метадаў, алгарытмаў і сродкаў павышэння эфектыўнасці прымянення і эксплуатацыі беспілотных лятальных апаратаў (БЛА).

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца сістэмы кіравання беспілотнага лятальнага апарата. Прадметам даследавання з'яўляюцца характарыстыкі параметраў кіравання БЛА, а таксама спосабы і алгарытмы, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць прымянення БЛА.

Распрацаваны новыя метадыкі аналітычнага мадэліравання гранічных рэжымаў работы падсістэм беспілотнага лятальнага апарата, якія дазваляюць на аснове зададзеных матэматычных мадэляў недакладнасцей і абмежаванняў на змяненне параметраў сістэмы рабіць вылічэнне інтэнсіўнасцяў змены станаў падсістэм і ацаніць характарыстыкі надзейнасці БЛА як складанай дынамічнай сістэмы.

Аналітычна атрыманы аптымальныя по зададзенаму крытэрыю законы кіравання БЛА для рэжымаў вываду ў зададзены пункт прасторы і палётупа зададзеным маршруце, якія ўлічваюць конструктыўныя характарыстыкі БЛА і забяспечваюць зададзены характар пераходных процэсаў у сістэме кіравання.

Распрацаваны метадыкі і алгарытмы аналітычнай ацэнкі і прагнозу тэхнічнага стану падсістэм БЛА, заснаваныя на комплексным выкарыстанні матэматычных мадэляў БЛА ў выглядзе стахастычных дыференцыяльных ураўненняў разрыўнага тыпу і матэматычных мадэляў апрыёрных недакладнасцей.

Атрыманая ў дысертацыйнай рабоце сукупнасць навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым накірункам у галіне задач аналізу і аналітычнага сінтэзу сістэм кіравання БЛА, які забяспечвае павышэнне эфектыўнасці іх прымянення.

РЕЗЮМЕ

Икуас Юсиф Ф. Мабрук

Синтез управления и оценка технического состояния беспилотного летательного аппарата

Ключевые слова: система управления, математическая модель, граничные режимы, техническое состояние.

Целью работы является анализ, разработка, исследование и создание методов, алгоритмов и средств повышения эффективности применения и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Объектом исследования являются системы управления беспилотного летательного аппарата. Предметом исследования являются характеристики параметров управления БЛА, а также способы и алгоритмы, позволяющие повысить эффективность применения БЛА.

Разработаны новые методики аналитического моделирования граничных режимов работы подсистем беспилотного летательного аппарата, позволяющие на основе заданных математических моделей неопределённостей и ограничений на изменение параметров системы производить вычисление интенсивностей смены состояний подсистем и оценивать характеристики надёжности БЛА как сложной динамической системы.

Аналитически получены оптимальные по заданному критерию законы управления БЛА для режимов вывода в заданную точку пространства и полёта по заданному маршруту, учитывающие конструктивные характеристики БЛА и обеспечивающие заданный характер переходных процессов в системе управления.

Разработаны методики и алгоритмы аналитической оценки и прогноза технического состояния подсистем БЛА, основанные на комплексном использовании математических моделей БЛА в виде стохастических дифференциальных уравнений разрывного типа и математических моделей априорных неопределённостей.

Полученная в диссертационной работе совокупность научных результатов является возможным направлением в области задач анализа и аналитического синтеза систем управления БЛА, обеспечивающим повышение эффективности их применения.

SUMMARY

Ikwas Yousef F. Mabrouk

Synthesis of management and estimation of a technical condition Pilotless flying machine

Keywords: a control system, mathematical model, boundary modes, and the technical condition.

The purpose of the work is to analysis, working out the research and creation of methods algorithms that means increase the efficiency of application and operation of pilotless flying machines (PFM).

The Object of research is to control systems of a pilotless flying machine. The object of research is to characterize the parameters of management PFM, and also ways and algorithms allowing raising the efficiency of application PFM.

New techniques of analytical modeling of boundary operating modes the sub-systems of the pilotless flying machine are developed, allowing on the basis of the set mathematical models of indeterminacy and restrictions on change of parameters of system to make calculation of the intensive changes of conditions of subsystems and to estimate characteristics of reliability PFM as difficult dynamic system.

Laws of management PFM for conclusion modes in the set point of space and flight on the set route, considering constructive characteristics PFM and providing the set character of transients in the control system are analytically received optimum by the set criterion.

Techniques and algorithms of an analytical estimation and the forecast of a technical condition of subsystems PFM, based on complex use of mathematical models PFM in the form of the stochastic differential equations of explosive type and mathematical models aprioristic indeterminacies are developed.

The set of scientific results received in dissertational work is a possible direction in the field of problems of the analysis and analytical synthesis of control systems of the PFM ensuring the effectiveness of their use.

Научное издание

ИКУАС
Юсиф Ф. Мабрук

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Подписано в печать 21.11.2012. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 1506.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, Минск.