

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 629.735.33

**АБУФАНАС**  
**Альседык Салем Ахмед**

**СИНТЕЗ АДАПТИВНО-РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМОЙ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (промышленность)

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

**ЛОБАТЫЙ Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, за-  
ведующий кафедрой «Информационные  
системы и технологии» Белорусского  
национального технического университета

Официальные оппоненты:

**ТАТУР Михаил Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор ка-  
федры электронных вычислительных ма-  
шин УО «Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлек-  
троники»;

**СТРИЖНЕВ Александр Гаврилович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник (научно-  
производственное общество с ограничен-  
ной ответственностью «ОКБ ТСП»)

Оппонирующая организация

УО «Белорусский государственный тех-  
нологический университет»

Защита состоится «10» января 2019 г. в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (+375 17) 293-95-64, e-mail: ngursky@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2018 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент

Гурский Н. Н.

© Абуфанас А. С. А., 2018  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## **ВВЕДЕНИЕ**

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются эффективным средством для решения широкого круга различных задач, как военного, так и народнохозяйственного характера. БЛА имеют большую перспективу применения в тех областях, где отсутствие пилота на борту позволяет сделать летательный аппарат более компактным и дешевым, а также при выполнении работ, связанных с риском для жизни и здоровья человека. Главной составляющей системы мониторинга земной поверхности является установленная на борту БЛА специальная аппаратура. Для обзора земной поверхности в нужном диапазоне волн устанавливается видеокамера или другая система (тепловизионная, радиотехническая), выходной информацией которой является изображение объектов, находящихся на земле. Данная аппаратура мониторинга размещается в кардановом подвесе (на подвижной платформе), имеющем две степени свободы относительно корпуса БЛА. Для управления угловым положением видеокамеры (или другой аппаратуры) применяется электропривод, изменяющий угловое положение видеокамеры в двух плоскостях относительно корпуса БЛА. В зависимости от задач, выполняемых системой мониторинга, управление такими приводами заключается в том, что по определенному закону изменяются параметры управляющего сигнала, представляющего собой, как правило, последовательность импульсов, поступающих на вход привода.

В диссертации рассмотрены вопросы обоснования принципов интеллектуальной поддержки при разработке технологии синтеза алгоритмов управления подвижной платформой БЛА и при принятии решений по выбору элементов БЛА по критерию эффективности на этапе предварительного проектирования БЛА. Приводимые в диссертации методики и алгоритмы основаны на известных математических моделях БЛА, учитывающих как стохастические и динамические свойства подсистем, так и случайный характер изменения режимов работы системы управления БЛА.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами, темами**

Тема диссертационной работы соответствует перечню приоритетных направлений, определенных Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 (№166) «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы» (направление «Информационно-коммуникационные и авиакосмические технологии: технологии развития информационного общества»).

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 БНТУ, а также в рамках научных программ Ливии.

#### **Цель и задачи исследований**

Целью работы является разработка методик и алгоритмов обработки информации для управления подвижной платформой беспилотного летательного аппарата и принятия решений при синтезе его подсистем. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ принципов построения математических моделей подсистем БЛА и разработать методику параметрической идентификации привода подвижной платформы БЛА.

2. Обосновать принципы построения алгоритмов управления гибридными непрерывно-дискретными системами применительно к электрическим приводам БЛА.

3. Разработать законы дискретного управления подвижной платформой БЛА и демпфирования её случайных колебаний.

4. Разработать методику и алгоритмы фильтрации управляющих сигналов при наличии неопределенностей и принятия решений при синтезе подсистем БЛА.

#### **Научная новизна**

1. Предложен общий методологический подход при разработке математических моделей динамических систем, основанный на рассмотрении топологических уравнений сложных систем и компонентных уравнений, входящих в них подсистем, что позволяет проводить их параметрическую идентификацию в условиях наличия неопределенностей и изменения режимов работы подсистем БЛА.

2. Обоснованы принципы построения алгоритмов управления гибридными непрерывно-дискретными системами БЛА, на основе которых разработаны законы дискретного управления и демпфирования случайных колебаний подвижной платформы БЛА при использовании электрического привода.

3. Обоснован общий подход к синтезу алгоритмов фильтрации управляющих сигналов и принятия решений при синтезе подсистем БЛА на основе оценки его эффективности, учитывающий стохастическую постановку задачи и позволяющий на этапе предварительного проектирования обосновать выбор основных требований к элементам системы управления БЛА.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика разработки и параметрической градиентной идентификации математических моделей сложных динамических систем, применительно к системе управления подвижной платформой БЛА, учитывающая случайный характер факторов, оказывающих влияние на работу системы.

2. Методика и алгоритм форсированного управления гибридной электротехнической системой, позволяющие синтезировать закон управления вентильным электрическим приводом подвижной платформы БЛА в виде последовательности импульсов постоянной амплитуды и переменной скважности.

3. Алгоритм применения анизотропийного регулятора для демпфирования случайных колебаний подвижной платформы БЛА, позволяющий не менее, чем в два раза уменьшить угловую ошибку ориентации подвижной платформы, вызванную воздействием на БЛА случайной турбулентности атмосферы.

4. Методика принятия решений при синтезе и выборе подсистем БЛА, основанная на оценке его эффективности, учитывающая стохастическую постановку задачи, многокритериальность и наличие неопределенностей, позволяющая на этапе предварительного проектирования БЛА обосновать основные требования к его элементам.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

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, проведенных 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 диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на двенадцатой, тринадцатой, четырнадцатой и пятнадцатой международных научно-технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» 2014–2017 гг., международной научно-практической конференции молодых исследователей «Наука и молодежь: новые идеи и решения» в г. Волгограде, международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» в г. Воронеже, международных ин-

тернет-конференциях. Результаты диссертации также докладывались на научных семинарах кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» и кафедры «Информационные системы и технологии» БНТУ.

### **Опубликование результатов диссертации**

По теме диссертации опубликованы 8 научных статей в рецензируемых журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь общим объёмом 3.7 авторских листов, и 12 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, четырёх глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения.

Общий объём диссертации составляет 117 страниц. В том числе: 95 страниц основного текста, 58 рисунков, расположенных в тексте диссертации, список использованных источников, насчитывающий 104 наименования и список публикаций автора по теме диссертации на 10 страницах, а также приложения на 7 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

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

В **первой главе** рассматривается современное состояние изучаемого вопроса, проводится анализ принципов построения систем управления БЛА, рассмотрены вопросы разработки математических моделей и их параметрической идентификации. В качестве объекта для проведения теоретических исследований рассматриваются основные типы БЛА серийно выпускаемые в Республике Беларусь, которые по своим характеристикам близки к аналогичным БЛА, выпускаемым в других странах мира. Это беспилотные авиационные комплексы класса «мини» для видеомониторинга местности и объектов с радиусом действия от 20 до 50 км семейства «Бусел» и его модификации «Бусел М» и «Бусел М50».

Для решения задачи синтеза системы управления мониторингом обоснованы принципы построения математических моделей подсистем БЛА, к которым относится система мониторинга. Показано, что для изучения

структуры связей между подсистемами, а также входными и выходными контактами элементов сложной системы целесообразно использовать методы дискретной математики, а для описания работы подсистем – компонентные дифференциальные уравнения разрывного типа в форме Ланжевена вида

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

где  $X(t)$  в общем случае  $n$  – мерный случайный вектор;  $D(t)$  – матрица порядка  $n \times n$  детерминированных параметров с компонентами  $d_{kr}$ ;  $\varphi(X, t)$  – векторная,  $w(X, t)$ ,  $H(X, t)$  – матричные нелинейные функции;  $U(t)$  –  $r$ –мерная ( $r < n$ ) векторная функция управления;  $\xi$  –  $n$ –мерный вектор централизованного белого шума с матрицей интенсивностей  $G(t)$ .  $S(t) = \{s, t\}$  – индекс структуры системы.

Рассмотрен алгоритм параметрической идентификации элемента системы управления для настройки параметров математической модели, на основе которой производится анализ или синтез данного элемента. В качестве объекта идентификации рассматривается модель привода подвижной платформы БЛА. Обоснована целесообразность применения поискового алгоритма идентификации элемента системы с активным поиском и испытаниями адаптивной модели по параметрическим каналам на основе измерений входных и выходных сигналов объекта идентификации. При этом учитываются границы работоспособности системы.

Подсистема БЛА и его модель описываются следующими уравнениями состояния

$$\dot{Y} = F(Y, X, A, t) + \xi, \quad Z = h(Y, X, t) + \zeta, \quad (2)$$

$$\dot{Y}_M = F_M(Y_M, X, A_M, t), \quad Z_M = h_M(Y_M, X_M, t), \quad (3)$$

где  $A = [a_1, a_2 \dots a_n]$  – вектор параметров,  $X \in R^n$ ,  $Z \in R^l$ ,  $Z_M \in R^l$ ,  $Y \in R^m$ ,  $Y_M \in R^m$ ,  $A \in R^p$ ,  $A_M \in R^p$  – векторы состояний входа ( $X$ ), выхода и параметров объекта ( $Y, A$ ), измерителя ( $Z$ ), модели ( $Y_M, Z_M, A_M$ ) соответственно;  $\xi$  – вектор входных возмущений,  $\zeta$  – вектор помех измерений;  $R^n$ ,  $R^m$ ,  $R^l$ ,  $R^p$  – евклидовы пространства. Целью идентификации является минимизация целевой функции  $q(E)$  невязки  $E = Z - Z_M$ . Предполагается, что  $q(E)$  – выпуклая, положительно определенная функция и известны текущие значения переменных  $Y_M, Z_M, A_M$ , характеризующих состояние настраиваемой модели.

Настройка параметров модели осуществляется в направлении антиградиента целевой функции, чтобы выполнялось

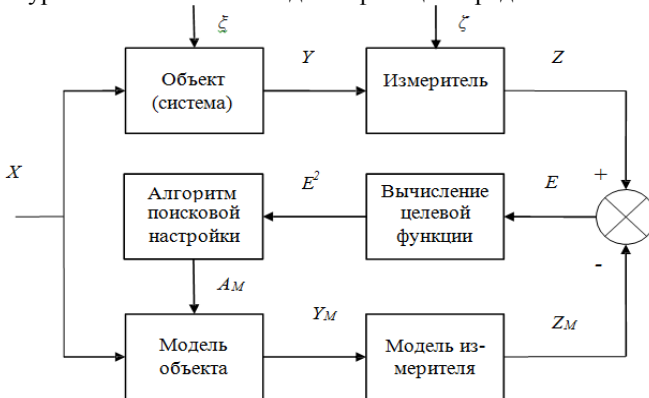
$$\dot{A}_M = -\Gamma \nabla_{A_M} q(E), \quad A_M(t_0) = A_0, \quad (4)$$

где  $\Gamma$  матрица коэффициентов усиления, размерности  $p \times p$ ;  $\nabla_{A_M} q(E) = \left[ \frac{\partial q(E)}{\partial A_M} \right]^T$  – градиент целевой функции по параметрам модели.

Общий алгоритм настройки параметров имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{A}_M &= -\Gamma \nabla_{A_M} q(E) = \Gamma \left[ \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial F_M}{\partial A_M} \right) \right]^T = \\ &= \Gamma \cdot \left\langle \left[ \delta A_M (\delta A_M)^T \right]^{-1} \right\rangle \cdot \left\langle \delta A_M (\delta Y_M)^T \right\rangle \left( \frac{\partial q}{\partial E} \frac{\partial h_M}{\partial Y_M} \right)^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Структурная схема системы идентификации представлена на рисунке 1.

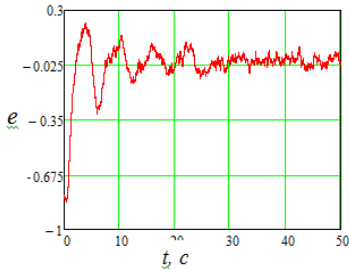


**Рисунок 1. – Структурная схема поисковой системы идентификации с градиентным алгоритмом**

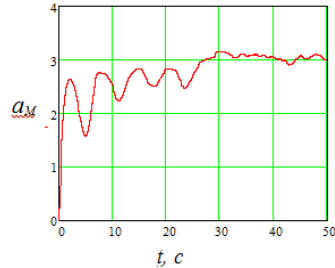
В качестве примера рассмотрена задача идентификации электропривода, описываемого упрощенной математической моделью (рисунки 2–3). На рисунке 2 приведены графики изменения во времени рассогласования  $e$  между выходами объекта идентификации и настраиваемой модели. На рисунке 3 – графики изменения настраиваемого параметра  $a_m$ . В приведенном примере процесс идентификации параметра  $a_m$  составляет около тридцати секунд. Результаты моделирования показывают, что в данном



случае обеспечивается точность идентификации, определяемая функцией невязки, а также – сходимость алгоритма настройки модели.



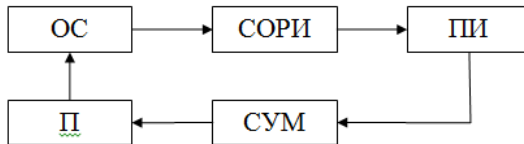
**Рисунок 2.** – График изменения рассогласования  $e$



**Рисунок 3.** – График изменения настраиваемого параметра  $a_M$

Во **второй** главе разработаны принципы построения алгоритмов управления гибридными непрерывно-дискретными системами беспилотного летательного аппарата, к которым относится система мониторинга, так как математические модели таких систем представляют собой совокупность дифференциальных и разностных уравнений или дифференциальных уравнений, включающих специальные функции, учитывающие дискретность.

Для управления угловым положением видеокамеры (или другой аппаратуры), применяемой для мониторинга земной поверхности с помощью БЛА, применяется привод, изменяющий угловое положение оптической системы в двух плоскостях относительно корпуса БЛА. Такой привод работает в двух режимах: режиме поиска наземного объекта и режиме слежения за данным объектом. Функциональная схема установленной на борту БЛА системы мониторинга в упрощенной форме представлена на рисунке 4, где обозначено: ОС – оптическая система, П – привод, СОРИ – система обработки и распознавания изображений, ПИ – потребитель информации, СУМ – система управления мониторингом.



**Рисунок 4.** – Функциональная схема системы мониторинга

Поведение компонент вектора фазовых координат системы  $X = [x_1, \dots, x_n]^T$  гибридной электротехнической системы в общем случае предлагается описать стохастическими дифференциальными уравнениями вида

$$\dot{x}_i(t) = a_i(X, t) + \sum_{j=1}^n b_{ij}(X, t) \cdot v_j(X, t) + \sum_{j=1}^n h_{ij}(t) \cdot \xi_j(t), \quad (i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

где  $a_i, b_{ij}, h_{ij}$  – в общем случае нелинейные функции;  $\xi_j(t)$  – случайные функции времени (шумы);  $v_j(X, t)$  – последовательность  $\delta$ – функций, моменты времени появления которых  $t_{ik}$  зависят от  $X$ .

Компоненты векторно-матричного уравнения (6) описывают кусочно-непрерывные марковские процессы со скачком в моменты времени  $t_k$ . Для исследования таких процессов предлагается использовать уравнение для плотности вероятности распределения фазовых координат, которое как при амплитудной, так и при частотной модуляции имеет вид

$$\dot{f}(X, t) = -\nabla_x^T \pi(X, t) - v(X, t) f(X, t) + \sum_{j=1}^n v_j [w_j(X, t)] \left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right| f(w_j(X, t)). \quad (7)$$

Здесь  $v(X, t) = \sum_{j=1}^n v_j(X, t)$  – суммарная интенсивность (частота) квантования,  $v_j$  – интенсивность квантования в потоках входных дискретных воздействий.  $w_j(X, t) = X(t) - b_j(X, t)$ , где  $b_j(X, t)$  – совокупность векторных функций, столбец с индексом  $j$  матрицы  $B(t)$  ( $j = \overline{1, n}$ ). Таким образом, матричная функция  $B(X, t)$  с элементами  $b_{ij}(X, t)$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ) разбита на совокупность векторных функций  $b_j(X, t) \cdot \left| \frac{\partial w_j(X, t)}{\partial X} \right|$  – якобиан функции  $w_j(X, t)$ .

На основе уравнения (7) получены уравнения для вероятностных моментов первого и второго порядков, решая которые с заданными начальными условиями можно определить математические ожидания и корреляционные моменты гибридной системы.

В качестве примера гибридной системы рассматривается вентиляльный электропривод системы мониторинга БЛА. Решается задача оптимизации управления электродвигателем по заданному критерию, учитывающему как точность перевода рабочего органа в течение некоторого конечного времени  $t_k - t_0$  из начального положения в конечное, так и интегральные

потери на управление в течение времени  $t_k - t_0$ . Минимизируемый функционал качества представлен в виде

$$J_0 = d_1 \varphi^2(t_k) + d_2 \omega^2(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} [q_1 \varphi^2(t) + q_2 \omega^2(t) + pu^2(t)] dt, \quad (8)$$

где  $\varphi$  и  $\omega$  – угол поворота и угловая скорость ротора, соответственно,  $u(t) = U_{cp}$  – искомое среднее значение управляющего напряжения. Коэффициенты функционала (8) выбираются из условий нормировки возможными максимальными значениями соответствующих переменных:  $d_1 = 1/\varphi_{\max}^2$ ,  $d_2 = 1/\omega_{\max}^2$ ,  $q_1 = 1/(t_k - t_0)\varphi_{\max}^2$ ,  $q_2 = 1/(t_k - t_0)\omega_{\max}^2$ ,  $p = 1/(t_k - t_0)u_{\max}^2$ .

В данном случае выражение для оптимального управления имеет вид

$$u_{\text{опт}} = -p^{-1}b(\Lambda_{12}\varphi + \Lambda_{22}\omega), \quad (9)$$

где обозначено  $b = K_d / T_d$ ,  $K_d$  и  $T_d$  – обобщенный коэффициент усиления и постоянная времени электропривода соответственно. Коэффициенты  $\Lambda_{12}$  и  $\Lambda_{22}$  – определяются путем решения дифференциальных уравнений типа Риккати, для которых заданы конечные условия. При заданной постоянной амплитуде управляющего сигнала  $A_u = U_{cp}$  длительность управляющего импульса предлагается вычислять по формуле

$$t_u = \frac{1}{A_u} \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt. \quad (10)$$

Путем математического моделирования гипотетического электропривода для функционала качества (8) проведено исследование оптимального управления (9). На рисунке 5 представлены графики изменения  $u(t) = u_k(t)$  и  $\omega(t) = \omega_k(t_k)$ .

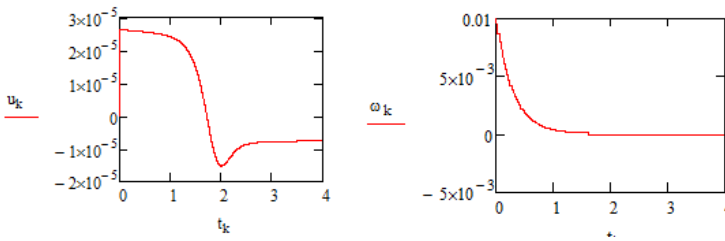
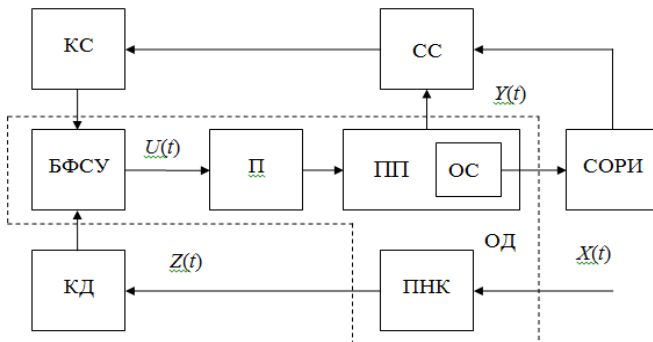


Рисунок 5. – Графики изменения  $u(t) = u_k(t)$  и  $\omega(t) = \omega_k(t_k)$

Управление электродвигателем осуществляется в данном случае последовательностью прямоугольных импульсов с постоянными амплитудой и периодом следования, но с переменной длительностью, зависящей от величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления.

**Третья глава** посвящена разработке законов управления подвижной платформой БЛА. Обоснованы задачи управления подвижной платформой и сформулированы основные принципы синтеза законов управления.

Структурная схема системы управления подвижной платформой системы мониторинга БЛА представлена в виде, изображенном на рисунке 6, где введены следующие обозначения: ПП – подвижная платформа БЛА, на которой установлена оптическая система ОС; СОРИ – система обработки и распознавания изображения; СС – система слежения за наземными объектами; КС – канал (регулятор) слежения; КД – канал (регулятор) демпфирования; ПНК – пилотажно-навигационный комплекс; БФСУ – блок формирования сигналов управления; П – электрический привод платформы;  $U(t)$  – сигнал управления;  $Y(t)$  – выходной сигнал системы; ОД – приведенный объект демпфирования, объединяющий БФСУ, П, ПП и ПНК.



**Рисунок 6. – Система управления подвижной платформой БЛА**

Особенностью рассматриваемой системы является то, что она представляет собой гибридную (непрерывно-дискретную) систему. Решается задача формирования последовательности импульсов для оптимального управления электрическим приводом, применяемым в системе мониторинга БЛА. Решение данной задачи получено с помощью аналитического синтеза управления по критерию максимального быстродействия (форсированное управление).

Рассматривается общая математическая постановка задачи. Объект управления описывается векторным линейным уравнением в канониче-

ской форме. На конечное состояние объекта управления наложено ограничение  $X(t_k) = X_k$ . Определяется вектор оптимального управления  $U(t)$ , обеспечивающий перевод объекта управления из начального состояния  $X_0$  в конечное состояние  $X_k$  за минимальное время  $t_k - t_0$  с учетом того, что максимальные значения компонент вектора управлений ограничены значениями  $U_{i\max}$  ( $i = \overline{1, m}$ ).

В данной постановке задача решается на основе использования принципа максимума Понтрягина. Определяется оптимальное управление применительно к математической модели электродвигателя, которая описывается известной системой дифференциальных уравнений. Оптимальное форсированное управление в данном случае вычисляется по формуле

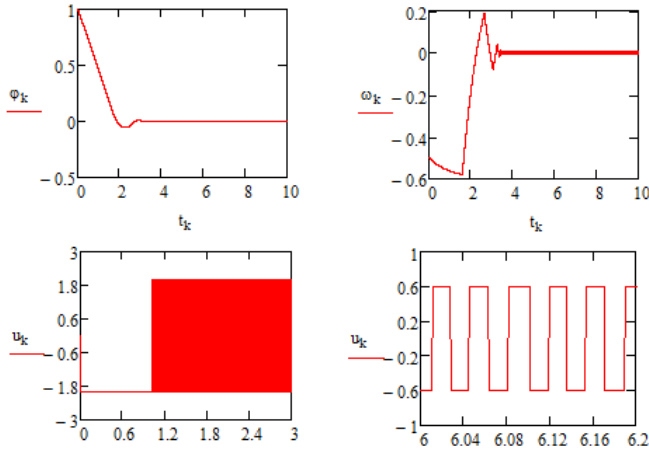
$$u(t) = -U_{\max} \operatorname{sign} \left[ \varphi(t) + \frac{1}{\alpha} \omega(t) - \left\{ \frac{\operatorname{sign}[\omega(t)]}{\alpha^2} \right\} \left\{ \ln[1 + \alpha|\omega(t)|] \right\} \right]. \quad (11)$$

На рисунке 7 представлены результаты моделирования в пакете Mathcad форсированного управления подвижной платформой БЛА – графики изменения  $\varphi(t) = \varphi_k(t_k)$ ,  $\omega(t) = \omega_k(t_k)$ ,  $u(t) = u_k(t_k)$ . Из рисунка 7 видно, что, не смотря на скачкообразное изменение управляющего сигнала  $u(t)$ , выходной сигнал  $\varphi(t)$  не претерпевает резких изменений по причине инерционности системы, обусловленной её конструктивными особенностями. Путем изменения постоянной времени привода  $T_n$ , характеризуемой коэффициентом  $\alpha = 1/T_n$ , или напряжения питания  $U_{\max}$  можно получить необходимые характеристики переходных процессов конкретной гибридной системы управления.

Результаты математического моделирования показывают, что управляющий сигнал представляет собой последовательность прямоугольных импульсов переменной полярности с заданной амплитудой и переменной длительностью. Это может быть использовано при управлении вентилями электродвигателями постоянного тока, применяемыми в различных системах слежения.

Так как среди внешних факторов, оказывающих нежелательное воздействие на работу размещенной на борту БЛА системы мониторинга основным является влияние турбулентности атмосферы, то необходимо применять дополнительные устройства или управляющие сигналы, компенсирующие (демпфирующие) это влияние. В качестве критерия оптимальности канала (регулятора) демпфирования предлагается рассматривать  $N_{\infty}$  – норму многомерной передаточной функции замкнутой системы,

представляющей собой энергию выхода системы при подаче на вход сигнала с единичной энергией.



**Рисунок 7. – Графики функций, характеризующих процесс управления**

Так как информация на борту БЛА обрабатывается в бортовом процессоре в дискретной форме, то система управления подвижной платформой в общем случае описывается разностными уравнениями вида

$$\begin{cases} X_{k+1} = AX_k + B_1 V_k + B_2 U_k, \\ Y_{k+1} = C_1 X_k + D_{11} V_k + D_{12} U_k, \\ Z_{k+1} = C_2 X_k + D_{21} V_k, \end{cases} \quad (12)$$

где  $X_k$  –  $n$ -мерный вектор состояния объекта демпфирования;  $V_k$  –  $m$ -мерный вектор случайного процесса, характеризующего турбулентность;  $Y_k$  –  $p$ -мерный вектор выходного сигнала подсистемы демпфирования;  $Z_k$  –  $q$ -мерный вектор наблюдения;  $U_k$  –  $l$ -мерный вектор управления (демпфирования),  $A$ ,  $B_i$ ,  $C_j$ ,  $D_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, 2}$ ) – постоянные матрицы соответствующих размерностей. В соответствии с рисунком 6 система демпфирования с анизотропийным регулятором представлена на рисунке 8, где обозначено:  $W_{од}$  – передаточная функция приведенного объекта управления (подвижной платформы),  $W_{кд}$  – передаточная функция анизотропийного регулятора (канала) демпфирования.  $Z_k$  – вектор навигационных параметров, поступающих с ПНК, включающих линейные и угловые составляющие вектора скорости БЛА, а также случайные помехи, вызванные турбулентностью атмосферы.  $Y_k$  – вектор выходных сигналов подсистемы демпфирования.

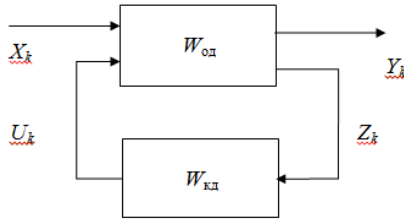


Рисунок 8. – Система демпфирования подвижной платформы БЛА

Считаем, что регулятор демпфирования  $W_{кд}$  имеет  $h$ -мерное внутреннее состояние (матрицу  $H$ ), связанное с сигналами наблюдения  $Z_k$  и управления  $U_k$  рекуррентными формулами

$$\begin{cases} H_{k+1} = \hat{A}H_k + \hat{B}Z_k, \\ U_k = \hat{C}H_k, \end{cases} \quad (13)$$

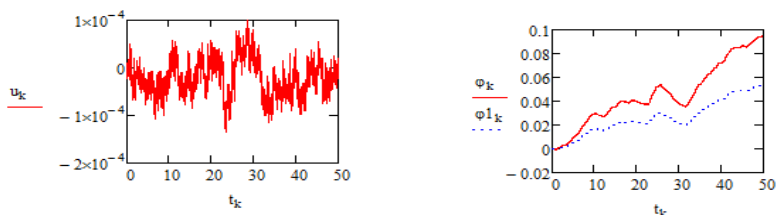
где  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$  – неизвестные постоянные матрицы соответствующих размерностей. В данном случае искомые матрицы  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$  оптимального анизотропийного  $H_\infty$  – регулятора вычисляются по формулам

$$\begin{cases} \hat{A} = A + B_2N - \Lambda C_2, \\ \hat{B} = \Lambda, \\ \hat{C} = N, \end{cases} \quad (14)$$

Матрицы  $A$ ,  $\Lambda$ ,  $N$ ,  $B_2$ ,  $C_2$  вычисляются на основе решения соответствующих алгебраических матричных уравнений Риккати.

На рисунке 9 представлены результаты математического моделирования анизотропийного регулятора системы демпфирования подвижной платформы БЛА – график изменения управляющего сигнала демпфирования  $u_k(t_k)$  и график изменения ошибки определения угловой ориентации подвижной платформы без регулятора демпфирования  $\varphi_k(t_k)$  и с регулятором  $\phi 1_k(t_k)$ , соответственно.

Результаты математического моделирования показывают, что применение таких регуляторов позволяет в конкретных условиях существенно уменьшить ошибку определения угловой ориентации подвижной платформы, что в свою очередь повысит эффективность работы системы мониторинга, установленной на БЛА.



**Рисунок 9. – Графики изменения управляющего сигнала демпфирования и ошибки определения ориентации подвижной платформы**

В **четвертой главе** предложена методика фильтрации управляющих сигналов и принятия решений при синтезе подсистем беспилотного летательного аппарата. На основе анализа различных подходов к решению данной проблемы предлагается использовать fuzzy–коррекцию для компенсации неопределенностей, имеющихся в математических моделях процесса и измерителя фильтра Калмана при наличии дополнительного измерителя. При такой постановке задачи используются более одного измерителя оцениваемого процесса и соответственно несколько параллельно включенных фильтров.

Так как решение уравнений оптимальной фильтрации позволяет получить вектор апостериорных математических ожиданий и матрицу апостериорных корреляционных моментов, то этого вполне достаточно для определения плотности вероятности оцениваемого процесса. Переход от плотности вероятности к функции принадлежности предлагается производить путем нормирования плотности вероятности. Результаты моделирования показали перспективность данного подхода, особенно с учетом того, что в данном случае имеется возможность в алгоритме нечеткой логики учесть априорный опыт эксперта, не поддающийся формализованному описанию.

Исследование точности решения задачи мониторинга на этапе предварительного проектирования БЛА предлагается проводить с помощью уравнений в вариациях, представляющих собой линеаризованные уравнения первого приближения относительно входных ошибок системы. Линеаризованная модель позволяет представить математическую модель ошибок системы в канонической форме и использовать известные методики оценки эффективности БЛА, что позволяет выдать рекомендации по обоснованию конструктивного облика БЛА и тем самым снизить затраты на его разработку. На основе анализа методик оценки эффективности применения БЛА предложена методика принятия решений при создании подсистемы БЛА, в том числе – подсистемы мониторинга. Так как в данном случае выбор решения зависит от многих факторов и критериев, а альтер-



нативные решения связаны между собой детерминированными линейными функциями, то предлагается применить метод анализа иерархий. Кроме априорно известной, рассчитанной аналитически эффективности применения БЛА при принятии решения о создании или закупке подсистемы (элемента) необходимо учитывать также такие критерии как стоимость подсистемы БЛА при закупке или разработке, затраты на эксплуатацию и некоторые другие факторы, которые могут быть непосредственно учтены в аналитических моделях, используемых для оценки различных показателей эффективности БЛА. В качестве примера рассматривается выбор одного из трех вариантов подсистемы БЛА при учете различных критериев. В качестве критериев первого уровня выбраны мнения двух независимых экспертов. В качестве критериев второго уровня предлагается использовать априорно рассчитанные или полученные экспериментально значения эффективности применения подсистемы БЛА. Структура задачи принятия решения о выборе варианта по критериям эффективности подсистемы БЛА в данном случае представлена в виде иерархической схемы, на которой в качестве примера представлен вариант, при котором рассматривается для приобретения один из трех возможных типов подсистемы БЛА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ математических моделей беспилотных авиационных комплексов и их составляющих, которые представляют собой совокупность топологических и компонентных уравнений. Топологические уравнения БЛА, характеризующие взаимосвязи и взаимное влияние подсистем, составляются на основе использования теории множеств и теории графов. Для составления компонентных уравнений БЛА, описывающих динамику подсистем, обосновано применение теории динамических систем случайно изменяющейся структуры, наиболее полно отражающая случайный скачкообразный характер воздействий, которым подвержена система [2, 11, 12, 14].

2. Обосновано, что при неполной структурной адекватности математической модели и реального объекта, расхождениях в начальных значениях параметров объекта и модели целесообразно применять поисковый алгоритм идентификации элемента системы с активным поиском и испытаниями адаптивной модели по параметрическим каналам на основе измерений входных и выходных сигналов объекта идентификации с учетом границ работоспособности системы. Результаты математического моделирования алгоритма идентификации привода подвижной платформы БЛА показывают, что в данной постановке задачи обеспечивается необходимая точность идентификации, определяемая функцией невязки, и сходимость алгоритма настройки модели с использованием непрерывного градиентного метода идентификации в течение времени, обусловленного инерционностью системы [6].

3. Показано, что основой для корреляционного анализа гибридных непрерывно-дискретных систем управления является стохастическое уравнение случайной структуры для фазовых координат системы, на основе которого можно получить обобщенное уравнение для апостериорной плотности вероятности фазовых координат, дающее возможность при разработке гибридных систем определять их оптимальную структуру и параметры при заданном критерии качества. Предлагается решать задачу аналитического синтеза оптимального управления гибридной системой путем формирования такого сигнала регулятора, который минимизирует заданный линейный квадратичный функционал качества. При этом управление гибридной системой осуществляется последовательностью прямоугольных импульсов, зависящей от величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления [4, 5, 17].

4. Разработана методика аналитического синтеза форсированного импульсного управления электроприводом системы слежения. Рассматривается решение данной задачи на основе применения неопределенных множителей Лагранжа и принципа максимума Понтрягина. В качестве примера для оценки работоспособности предлагаемой методики рассматривается математическая модель вентильного электропривода. Показано, что применение форсированного управления не приводит к выходу переменных, характеризующих состояние системы, за пределы допустимых значений и позволяет синтезировать закон управления в виде последовательности прямоугольных импульсов постоянной амплитуды, определяемой источником питания, переменной скважности и полярности. Такой подход может быть использован при управлении электродвигателями постоянного тока, применяемыми в различных системах слежения [8, 18, 19].

5. Разработана методика синтеза анизотропийного регулятора демпфирования случайных внешних воздействий на подвижную платформу БЛА, вызванных турбулентностью атмосферы, позволяющего снизить влияние на качество работы системы неопределенностей, обусловленных различиями между выбранной математической моделью и реальной оптимизируемой системой. Результаты математического моделирования показали, что применение такого регулятора дает возможность в конкретных условиях более чем в два раза уменьшить ошибку определения угловой ориентации подвижной платформы БЛА [7, 20].

6. Показано, что применение в алгоритмах фильтрации навигационных параметров БЛА нечеткой структурно-параметрической коррекции позволяет повысить точность работы системы мониторинга [1, 15]. Предложена методика обоснования выбора конструктивного решения при разработке или покупке элемента (подсистемы) БЛА, основанная на использовании метода анализа иерархий, позволяющая при наличии расчетных результатов аналитического исследования эффективности БЛА использовать дополнительно знания и опыт независимых экспертов, что дает возможность частично компенсировать неопределенности и погрешности, которые могут иметь место при аналитических расчетах [1, 3, 9, 10, 15, 16].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученную в диссертационной работе совокупность научных результатов можно квалифицировать как возможное направление в области задач аналитического анализа и синтеза систем управления беспилотных летательных аппаратов, в том числе применительно к решению задач оценки их эффективности для формирования требований к характеристикам БЛА на этапе их разработки и подготовки производства.

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 УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах**

1. Абуфанас, А.С. Структурно-параметрическая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации / А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас, А.С. Бенкафо // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4. – С. 4-8.

2. Абуфанас, А.С. Беспилотный авиационный комплекс как сложная мультиструктурная система / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 1. – С. 4-9.

3. Абуфанас, А.С. Принятие решений при выборе объектов по критериям эффективности / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 4. – С. 36-39.

4. Абуфанас, А.С. Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый, Ю.Н. Петренко, И. Эльзейн // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 322-328.

5. Абуфанас, А.С. Импульсное управление гибридной электротехнической системой / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый, Ю.Н. Петренко, И. Эльзейн // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 4(12). – С. 46-52.

6. Абуфанас, А.С. Поисковый алгоритм параметрической идентификации электропривода системы мониторинга / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый, А.Г. Шведко // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 2(14). – С. 39-45.

7. Абуфанас, А.С. Анизотропный регулятор демпфирования случайных колебаний подвижной платформы беспилотного летательного аппарата / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый, Ю.Ф. Яцына // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 3. – С. 13-19.

8. Абуфанас, А.С. Аналитический синтез форсированного импульсного управления электроприводом системы слежения / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый, Ю.Ф. Яцына // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 4 – С. 16-19.

### **Материалы конференций**

9. Абуфанас, А.С. Аналитическая оценка точности инерциальной системы беспилотного летательного аппарата / А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый, А.С. Абуфанас // Доклады II международной научно-технической интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», БНТУ, 4 декабря 2014 г. [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12573>.

10. Абуфанас, А.С. Оценка эффективности беспилотного авиационного комплекса на этапе наведения / А.С. Абуфанас, А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Доклады II международной научно-технической интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве», БНТУ, 4 декабря 2014 г. [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12576>.

11. Абуфанас, А.С. Математические модели систем управления беспилотных летательных аппаратов как сложных динамических систем / А.С. Абуфанас, А.С. Бенкафо, А.А. Лобатый // Тезисы докладов тринадцатой Международной научно-технической конференции БНТУ. Минск, 2015. – С. 198.

12. Абуфанас А.С. Особенности моделирования сложных мультиструктурных систем // Доклады IX Международной научно-практической конференции молодых исследователей «Наука и молодежь: новые идеи и решения», г. Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ ИПК «Нива», 2015. – С. 66-69.

13. Абуфанас, А.С. Критерии оптимизации систем управления беспилотных летательных аппаратов / А.С. Абуфанас // Тезисы докладов тринадцатой Международной научно-технической конференции БНТУ. Минск, 2015. – С. 199.

14. Абуфанас, А.С. Моделирование сложных систем на примере беспилотного комплекса / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Сборник материалов научно-технической конференции РИВШ. Минск, 2015. – С. 48-51.

15. Абуфанас, А.С. Коррекция алгоритма фильтрации системой нечеткой логики / А.С. Абуфанас // Материалы международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». Воронеж, 2015. – С. 271-274.

16. Абуфанас, А.С. Применение метода анализа иерархий при выборе технической системы / А. С. Абуфанас // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: III Международная научно-техническая интернет-конференция, 20-21 ноября 2015 г. Секция 2 [Электронный ресурс]. - [Б. и.], 2015.

17. Абуфанас, А.С. Управление электродвигателем гибридной системы автоматического управления / А.С. Абуфанас // Тезисы докладов четырнадцатой Международной научно-технической конференции БНТУ. Минск, 2016. – С. 241.

18. Абуфанас, А.С. Оптимизация импульсного управления электродвигателем постоянного тока / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: IV Международная научно-техническая интернет-конференция, 18-19 ноября 2016 г. Секция, Информационные технологии в производстве и научных исследованиях [Электронный ресурс]. - [Б. и.], 2016.

19. Абуфанас, А.С. Форсированное импульсное управление электроприводом / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Тезисы докладов пятнадцатой Международной научно-технической конференции БНТУ. Минск, 2017. – С. 244.

20. Абуфанас, А.С. Регулятор демпфирования случайных колебаний / А.С. Абуфанас, А.А. Лобатый // Тезисы докладов пятнадцатой Международной научно-технической конференции БНТУ. Минск, 2017. – С. 260.

## РЭЗІЮМЭ

**Абуфанас Альседык Салем Ахмед**

**Сінтэз адаптыўна-рабастнай сістэмы кіравання рухомай  
платформай беспілотнага лятальнага апарата  
пры падрыхтоўцы яе вытворчасці**

**Ключавыя словы:** сістэма кіравання, маніторынг, рухомая платформа, электрычны прывад.

**Мэта працы:** распрацоўка методык і алгарытмаў апрацоўкі інфармацыі для кіравання рухомай платформай беспілотнага лятальнага апарата (БЛА) і прыняцця рашэнняў пры сінтэзе яго падсістэм

**Метады даследавання:** класічныя і сучасныя метады аналізу і сінтэзу сістэм кіравання па зададзенаму крытэрыю, метады ацэнкі стану стахастычных сістэм, элементы тэорыі сістэмнага аналізу.

**Атрыманая вынікі і іх навізна.** Прапанаваны агульны метадалагічны падыход пры распрацоўцы матэматычных мадэляў дынамічных сістэм, заснаваны на разглядзе тапалагічных раўнанняў складаных сістэм і кампанентных раўнанняў, ўваходзячых у іх падсістэм, што дазваляе праводзіць іх параметрычную ідэнтыфікацыю ва ўмовах наяўнасці нявызначанасцяў і змены рэжымаў працы падсістэм БЛА

Распрацаваны алгарытмы кіравання электрычным прывадам рухомай платформы БЛА для розных рэжымаў з улікам нявызначанасцяў ў выглядзе ўплыву на палёт БЛА знешніх абурэнняў ў выглядзе выпадковага ветру і турбулентнасці атмасферы.

Абгрунтаваны агульны падыход да сінтэзу алгарытмаў фільтрацыі кіруючых сігналаў і прыняцця рашэнняў пры сінтэзе падсістэм БЛА на аснове ацэнкі яго эфектыўнасці, ўлічваючы стахастычную пастаноўку задачы і дазваляючы на этапе папярэдняга праектавання абгрунтаваць асноўныя патрабаванні да элементаў інфармацыйнай падсістэмы сістэмы кіравання БЛА

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Распрацаваныя метадыкі і алгарытмы могуць быць выкарыстаны ў арганізацыях, якія займаюцца пытаннямі аналізу і сінтэзу сістэм аўтаматычнага кіравання тэхнічнымі аб'ектамі.

**Галіна выкарыстання.** Атрыманая ў дысертацыйнай працы сукупнасць навуковых вынікаў з'яўляецца магчымым напрамкам у галіне задач аналізу і аналітычнага сінтэзу сістэм кіравання БЛА, забяспечваючым павышэнне эфектыўнасці іх прымянення.

## РЕЗЮМЕ

Абуфанас Альседык Салем Ахмед

### **Синтез адаптивно-робастной системы управления подвижной платформой беспилотного летательного аппарата при подготовке ее производства**

**Ключевые слова:** система управления, мониторинг, подвижная платформа, электрический привод.

**Цель работы:** разработка методик и алгоритмов обработки информации для управления подвижной платформой беспилотного летательного аппарата и принятия решений при синтезе его подсистем.

**Методы исследования:** классические и современные методы анализа и синтеза систем управления по заданному критерию, методы оценки состояния стохастических систем, элементы теории системного анализа.

**Полученные результаты и их новизна.** Предложен общий методологический подход при разработке математических моделей динамических систем, основанный на рассмотрении топологических уравнений сложных систем и компонентных уравнений, входящих в них подсистем, что позволяет проводить их параметрическую идентификацию в условиях наличия неопределенностей и изменения режимов работы подсистем БЛА.

Разработаны алгоритмы управления электрическим приводом подвижной платформы БЛА для различных режимов с учетом неопределенностей в виде влияния на полет БЛА внешних возмущений в виде случайного ветра и турбулентности атмосферы.

Обоснован общий подход к синтезу алгоритмов фильтрации управляющих сигналов и принятия решений при синтезе подсистем БЛА на основе оценки его эффективности, учитывающий стохастическую постановку задачи и позволяющий на этапе предварительного проектирования обосновать основные требования к элементам информационной подсистемы системы управления БЛА.

**Рекомендации по использованию.** Разработанные методики и алгоритмы могут быть использованы в организациях занимающихся вопросами анализа и синтеза систем автоматического управления техническими объектами.

**Область применения.** 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

**Abufanas Alsedik Salem Ahmed**

### **Synthesis of an adaptive-robust control system for a mobile platform of an unmanned aerial vehicle during preparation for its production**

**Keywords:** control system, monitoring, mobile platform, electric drive.

Purpose of research: development of methods and algorithms for processing information for controlling the mobile platform of an unmanned aerial vehicle and making decisions in the synthesis of its subsystems.

**Research methods:** the classical and modern methods of analysis and synthesis of control systems on specific criteria, methods of assessment of stochastic systems, elements of the theory of systems analysis.

**The results obtained and their novelty.** A general methodological approach is proposed for the development of mathematical models of dynamical systems, based on the consideration of topological equations of complex systems and component equations of the subsystems entering into them, which allows their parametric identification in the presence of uncertainties and changes in the operating modes of the UAV subsystems.

The algorithms for controlling the electric drive of the mobile platform of UAVs for various modes are developed, taking into account uncertainties in the form of influence on the UAV flight of external disturbances in the form of random wind and atmospheric turbulence

The general approach to the synthesis of control signal filtering algorithms and decision making in the synthesis of UAV subsystems is substantiated based on the estimation of its efficiency, taking into account the stochastic formulation of the problem and allowing to substantiate at the preliminary design stage the basic requirements for the elements of the information subsystem of the UAV control system.

**Recommendation for using.** The developed methods and algorithms can be used in organizations concerned with the analysis and synthesis of automatic control systems of technical objects.

**Application area.** Obtained in the thesis collection of scientific results is a possible direction in problems of analysis and analytical synthesis of control systems UAV, providing increased efficiency of their application.

Научное издание

**АБУФАНАС**  
**Альседык Салем Ахмед**

**СИНТЕЗ АДАПТИВНО-РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМОЙ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (промышленность)

Подписано в печать 14.11.2018. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 70. Заказ 948.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.