

А. А. ЛОБАТЫЙ¹⁾, Ю. И. СЕМАК²⁾, Л. Н. ГОТИНА¹⁾

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ

¹⁾ Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

²⁾ Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов
Национальной академии наук Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены общие принципы построения системы поддержки принятия решений при управлении беспилотным летательным аппаратом (БЛА) с наземного пункта управления на основе измерений и оценки технического состояния бортовых систем БЛА. Проведен анализ современных методов решения таких задач, обосновано использование алгоритмических методов решения, основанных на использовании стохастических математических моделей процессов изменения переменных, характеризующих техническое состояние БЛА. Приведены дифференциальные уравнения общего вида, описывающие эволюцию рассматриваемой системы, полученные на основе применения теории систем со случайным изменением структуры. Приведена блок-схема, характеризующая общие принципы решения задачи вероятностной оценки технического состояния системы, на основе которой получен дискретный алгоритм решения задачи оптимальной фильтрации и идентификации режима работы с управлением процесса наблюдения. Приведен пример решения задачи для простейших математических моделей процесса изменения технического параметра и его измерителя, наглядно демонстрирующий работоспособность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, техническое состояние, вероятность, структура, фильтрация, идентификация

Введение

Развитие электронных и информационных технологий приводит к появлению новых возможностей и задач при управлении сложными техническими объектами. К таким объектам относятся беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые широко используются как в гражданской, так и в военной сферах [1, 2]. Одна из задач успешного применения БЛА – обеспечение их технической надежности в полете.

Известно, что БЛА способен работать, как в автоматическом, так и в автоматизированном режимах. Главной его особенностью является интерактивное управление. В силу высокой стоимости, ограниченного доступа к бортовым системам и сложности эксплуатации беспилотного авиационного комплекса (БАК) возникла острая практическая потребность непрерывного (оперативного) контроля технического состояния БЛА, находящегося в полете. Кроме того, иногда в процессе выполнения задания возникает необходимость корректировки параметров полета БЛА и/или режимов работы его систем. Решение данных задач обусловило необходимость установки на борт БЛА новых систем, позволяющих получать и регистрировать объемное потребное количество информации и даже представляющих данные в формате «видео» [3].

Рациональным решением данной задачи является не просто «освобождение» оператора БЛА от контроля технического состояния оборудования БЛА в полете и введение для этого в состав наземного пункта управле-

ния (НПУ) автоматизированного рабочего места (АРМ) инженера БЛА, но главным образом – автоматизация управления оборудованием в полете в особых случаях (при отказах, повреждениях, сбоях бортовых систем).

Автоматизация управления оборудованием может быть осуществлена введением (повышением) бортового «интеллекта» БЛА и наземного «интеллекта» НПУ путем применения технологий «искусственного интеллекта» – создания определенных специализированных бортовых и наземных устройств с «искусственным интеллектом», которые не только решают задачу контроля технического состояния оборудования БЛА, но и формируют рекомендации для инженера БЛА по принятию решений об управлении режимами работы бортовых систем при возникновении отказов в полете. Такой системой является аппаратно-программный комплекс (АПК) оперативного контроля технического состояния БЛА в полете, а его реализацией – соответствующий комплекс АРМ инженера БЛА, виртуальный имитатор работы БАК, интеллектуальное бортовое устройство контроля, специальное программное обеспечение, а также рабочая конструкторская документация, технологическая и программная документация на АПК [2, 3].

Контроль технического состояния БЛА

Типичным представителем БЛА многоцелевого назначения является беспилотный авиационный комплекс (БАК) «Бусел» [4]. На рис. 1 представлен внешний вид наземного пункта управления комплексом «Бусел».

Автоматизированное рабочее место инженера БЛА (рис. 1) предназначено для непрерывного контроля работы основных систем и бортового оборудования БЛА в полете, а также для информационной поддержки принятия решений расчетом БАК по результатам контроля в случае нештатных ситуаций в полете. В основе функционирования АРМ инженера БЛА лежит оценка работоспособности бортовых систем и компонентов БЛА, оснащенных автономной системой управления с искусственным интеллектом на базе микроконтроллеров («нейромодулей») и специального программного обеспечения.



Рисунок 1. Внешний вид наземного пункта управления

Ключевой составляющей элементов системы управления БАК и его техническим состоянием является система поддержки принятия решений (СППР), предоставляющая в процессе функционирования БЛА инженеру информацию о техническом состоянии подсистем БЛА с вероятностной оценкой возможных нежелательных ситуаций (отказов элементов системы).

Одним из путей реализации СППР БАК является создание виртуального имитатора работы БАК в виде «искусственного интеллекта» на основе нейронных сетей, реализованных в цифровом виде. Виртуальный имитатор работы БАК предназначен для «обучения» нейронных сетей в ходе работ по созданию систем бортового «интеллекта» БЛА и наземного «интеллекта» НПУ, а также – для тренировки расчета БАК. Данный имитатор позволит реализовывать различные сценарии ситуационной осведомленности расчета БАК. Бортовое устройство контроля за техническим состоянием на основе «нейромодулей» предназначено для контроля бортового оборудования БЛА и в случае необходимости – принятия решений на реконфигурацию бортовых систем для минимизации последствий возникшей в полете нештатной ситуации (отказа).

«Обучение» такой нейронной сети требует большого объема априорной информации о всех возможных вариантах изменения параметров, определяющих техническое состояние БЛА, что практически реализовать очень трудно. «Обученная» таким образом нейронная сеть, тем не менее, не в состоянии предусмотреть всех возможных ситуаций, в которых может находиться БЛА в процессе полета, что не обеспечит необходимые требования к СППР.

В то же время параметры, характеризующие техническое состояние БЛА, подчиняются известным законам физики (механика, электроника и т.д.) и имеют свои апробированные математические модели. Измерение этих параметров производится датчиками, для которых также имеются свои математические модели.

Математическая модель технического состояния БЛА

В общем случае процессы, характеризующие состояние БАК как сложной мехатронной системы являются случайными и описываются векторным стохастическим уравнением вида [5]:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= D(t)\varphi(X, t) + W(X, t)U(t) + H(X, t)\xi(t), \\ X(t_0) &= X_0,\end{aligned}\quad (1)$$

где $X(t)$ – n -мерный случайный вектор (матрица-столбец); $D(t)$ – 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 ($r \leq n$) векторная функция управления; $\xi(t)$ – n -мерный вектор центрированного гауссова белого шума с положительно-определенной матрицей интенсивностей $G(t)$ и матрицей корреляционных функций $K_\xi(t, t') = G(t)\delta(t - t')$, $\delta(\dots)$ – дельта-функция Дирака.

При случайном скачкообразном изменении режимов работы системы управления БЛА (отказах подсистем) изменяется вид (структура s [5, 6]) уравнения состояния (1). В данном случае s – номер состояния, в котором может находиться система – случайная дискретная последовательность. Математическая модель измерителей с учетом известных обоснованных допущений имеет вид:

$$Z^{(s)}(t) = C^{(s)}X^{(s)}(t) + \zeta(t), \quad (s = \overline{1, ns}), \quad (2)$$

где $Z^{(s)}(t)$ – m -мерный вектор, $C^{(s)}(X^{(s)}, t)$ – нелинейная векторная функция, $\zeta(t)$ – m -мерный белый гауссовый шум с матрицей интенсивностей $Q(t)$. При небелом шуме $\zeta(t)$ или инерционном измерителе модель измерителя сводится к виду (2) путем расширения вектора состояния.

Полной вероятностной характеристикой вектора $[X(t), S(t)]^T$ в момент времени t при наличии измерений вектора $Z^{(s)}(t)$ в интервале $[t_0, t]$ является апостериорная функция плотности вероятности $\hat{f}^{(s)}(x, t)$, для которой справедливо обобщенное (для систем случайной структуры) уравнение Стратоновича [5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{f}^{(s)}(x, t)}{\partial t} &= -\text{div} \hat{\pi}^{(s)}(x, t) - \\ &- \sum_{r=1}^{ns} \sum_{(r \neq s)} [\hat{y}_{sr}(x, t) - \hat{u}_{rs}(x, t)] - \frac{1}{2} [\rho(x, z, t) - \\ &- \sum_{k=1}^{ns} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x, z, t) \hat{f}^{(k)}(x, t) dx] \cdot \hat{f}^{(s)}(x, t)\end{aligned}\quad (3)$$

при начальных условиях $\hat{f}^{(s)}(x, t_0) = f(x, t_0)$. $\hat{\pi}^{(s)}(x, t)$ – вектор апостериорной плотности потока вероятности s -й структуры с компонентами по фазовым координатам, вычисляемым по формуле:

$$\hat{\pi}_k^{(s)}(x, t) = A_k^{(s)} x(t) \hat{f}_k^{(s)}(x, t) - \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{ns} B_{kv}^{(s)}(x, t) \hat{f}_k^{(s)}(x, t), \quad (k = \overline{1, ns}). \quad (4)$$

$A_k^{(s)}$ и $B_{kv}^{(s)}$ – компоненты вектора сноса и матрицы диффузии. $\rho(x, z, t)$ – функция невязки, которая при допущении о нормальности процесса $\zeta(t)$ в общем случае определяется выражением:

$$\rho(x, z, t) = \sum_{p,v=1}^m \rho_{pv}(x, z, t), \quad \rho_{pv}(x, z, t) = \frac{\bar{Q}_{p,v}(t)}{|Q(t)|} [z_p - C_p(t)x][z_p - C_p(t)x]. \quad (5)$$

$\bar{Q}_{pv}(t)$ – алгебраическое дополнение элемента $Q_{pv}(t)$ в определителе $|Q(t)|$ матрицы $Q(t)$ белых шумов $\zeta(t)$ измерителя.

В выражении (3) $\hat{v}_{sr}$ – оценка интенсивности перехода реализаций процесса $X(t)$ из области s в область r (интенсивность поглощения реализаций структуры s). $\hat{u}_{rs}(x, t)$ – оценка интенсивности возврата реализаций процесса $X(t)$ из области r в область s (интенсивность восстановления реализаций структуры s).

Проинтегрировав уравнение (3) по x в бесконечных пределах, получается дифференциальное уравнение для апостериорной вероятности состояния $\hat{P}_s(s = \overline{1, ns})$ (s -го режима) [7].

При гауссовой аппроксимации функции $\hat{f}^{(s)}(x, t)$ векторно-матричное уравнение для апостериорных математических ожиданий $\hat{X}^{(s)}(t)$ (оценок вектора $X(t)$) и апостериорных корреляционных моментов $\hat{R}^{(s)}(t)$ получаются в соответствии с известными положениями теории вероятностей умножением уравнения (3) соответственно на $X^{(s)}(t)$ или $(X^{(s)}(t) - \hat{X}^{(s)}(t))^2$ и интегрированием в бесконечных пределах [8].

Оценка состояния БЛА в условиях многорежимности

На практике основные измерения и обработка информации в системе управления БЛА производятся в дискретной форме. Следовательно, математические модели процесса $X_k = X(t_k)$ и измерителя $Z_k = Z(t_k)$ при этом имеют вид разностных уравнений. Пусть функционирование стохастической системы управления описывается векторно-матричным уравнением вида [5, 6]:

$$X_k = A_{k-1,k} X_{k-1} + L_{k-1,k} U_{k-1} + H_{k-1,k} \xi_{k-1}, \quad (6)$$

где X_k – n -мерный вектор состояния системы на k -м шаге; $A_{k-1,k}$, $L_{k-1,k}$, $H_{k-1,k}$ – матрицы перехода размерности $n \times n$; U_{k-1} – n -мерный вектор управления на $(k-1)$ -м шаге; ξ_{k-1} – вектор дискретного гауссова белого шума интенсивности G_ξ .

Измерения также производятся в дискретные моменты времени, а работа измерителя описывается уравнением:

$$Z_k^{(s)} = C_k^{(s)} X_k + \zeta_k, \quad (7)$$

где $Z_k^{(s)}$ – m -мерный вектор измерений на k -м шаге; $C_k^{(s)}$ – матрица коэффициентов на k -м шаге; ζ_k – дискретный белый шум измерений интенсивности G_ξ . $s = \overline{1, ns}$ – номер режима (структуры) системы, ns – число возможных структур системы.

Алгоритм оценивания фазовых координат (вектора X_k) для линейных дискретных моделей (6)–(7) процесса и измерителя s -го режима представляет собой известные выражения для фильтра Калмана [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{X}_k^{(s)} &= A_{k-1,k}^{(s)} X_{k-1}^{(s)} + L_{k-1,k}^{(s)} U_{k-1}, \\ \hat{X}_k^{(s)} &= \tilde{X}_k^{(s)} + B_k^{(s)} [Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k], \\ B_k^{(s)} &= \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} [C_k^{(s)} \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} + Q_k]^{-1}, \\ \tilde{R}_k^{(s)} &= A_{k-1,k}^{(s)} R_{k-1}^{(s)} A_{k-1,k}^{(s)T} + H_{k-1,k}^{(s)} G_k^{(s)} H_{k-1,k}^{(s)T}, \\ R_k^{(s)} &= (E - B_k^{(s)} C_k^{(s)}) \tilde{R}_{k-1}^{(s)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\tilde{X}_k^{(s)}$, $\hat{X}_k^{(s)}$ – априорная и апостериорная оценки вектора состояния системы управления БЛА на k -м шаге; $\tilde{R}_k^{(s)}$, $R_k^{(s)}$ – априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок оценивания; E – единичная матрица.

Для определения вероятности s -го режима в дискретной задаче удобно использовать байесовский алгоритм определения апостериорной вероятности состояния системы [6] при допущении о том, что на интервале дискретизации смена режима практически невозможна (маловероятна) и априорная вероятность на k -м шаге равна апостериорной вероятности на предыдущем шаге [9].

$$\hat{P}_k^{(s)} = \frac{\bar{P}_k^{(s)} |\bar{D}_k^{(s)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(s)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(s)}, \tilde{R}_k^{(s)})]}{\sum_{i=1}^{nl-1} \bar{P}_k^{(i)} |\bar{D}_k^{(i)}|^{-\frac{1}{2}} \exp[-\tilde{h}^{(i)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(i)}, \tilde{R}_k^{(i)})]}, \quad (9)$$

где $\bar{P}_k^{(s)} = \bar{P}_{k-1}^{(s)}$, $\bar{D}_k^{(s)} = C_k^{(s)} \tilde{R}_k^{(s)} C_k^{(s)T} + Q_k^{(s)}$, $\tilde{h}^{(s)}(Z_k, \tilde{X}_k^{(s)}, \tilde{R}_k^{(s)}) = \frac{1}{2} (Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k)^T (\bar{D}_k^{(s)})^{-1} (Z_k - C_k^{(s)} \tilde{X}_k^{(s)} - K_k^{(s)} U_k)$. $\bar{P}_k^{(s)}$ и $\bar{P}_{k-1}^{(s)}$ – априорная и апостериорная вероятности s -го режима на k -м шаге. вероятность s -го режима определяется из условия нормировки:

$$\hat{P}^{(s)} = 1 - \sum_{l=1}^{nl-1} \hat{P}^{(l)}. \quad (10)$$

Таким образом, согласно критерию Байеса проверяемая система с наибольшей вероятностью находится в состоянии, соответствующем K -му режиму,

апостериорная вероятность которого превышает апостериорные вероятности остальных режимов: $\hat{s} = K$ при $\hat{P}^{(k)} = \max\{P_1, \dots, P_{ns}\}$, $s, \hat{s} = \overline{1, ns}$.

Решая совместно уравнения (8)–(10) можно определить, в каком режиме находится система, и оценить вектор ее фазовых координат (провести фильтрацию сигналов, необходимых для определения технического состояния параметров БЛА).

Если в системе производится комплексирование индикаторов состояния и измерителей параметров, то в результате оптимальной обработки информации определяется совместный закон распределения фазовых координат и структуры (режима), на основании которого могут быть найдены оптимальные оценки фазовых координат и индекса структуры (режима работы) системы (рис. 2) [6].

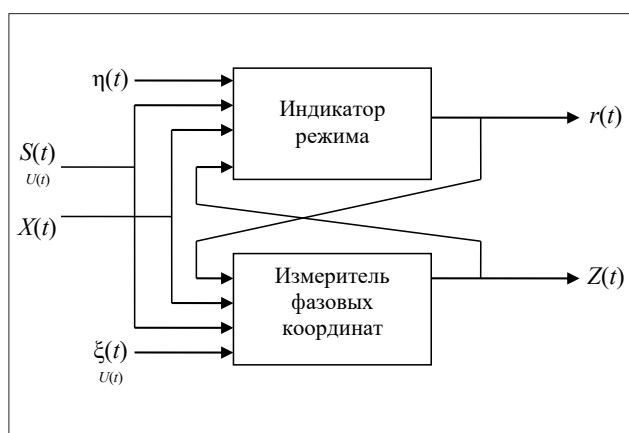


Рисунок 2. Блок-схема комплексной системы наблюдения состояния

На рис. 2 $Z(t)$ – вектор выходных сигналов измерителя (измерителей), $r(t)$ – дискретный выходной сигнал индикатора, $\eta(t)$ и $\xi(t)$ – случайные помехи (стационарные неопределенности). Из рисунка видно,

что индикатор и измеритель связаны между собой через выходные сигналы, так как показания индикатора зависят от фазовых координат $X(t)$, а показания измерителя зависят от режима работы $S(t)$.

Существует большое число практических задач, когда наличие обратной связи в канале наблюдения задается априорно. Это приводит к тому, что свойства канала наблюдения становятся зависимыми от процессов, протекающих в фильтре. В подобных случаях задача оптимальной фильтрации измеряемых фазовых координат системы (эксплуатационных параметров БАК) обладает специфическими особенностями. Свойства канала наблюдения могут изменяться под влиянием управляющего воздействия $U(t)$, которое формируется таким образом, чтобы обеспечить наилучшие условия фильтрации измеренного параметра. Такая постановка относится к комбинированным задачам, когда в процессе фильтрации необходимо одновременно вести управление свойствами канала наблюдения.

Пример

Рассмотрим для наглядности простейший случай одномерной системы, когда один из параметров, характеризующих техническое состояние, описывается выражением (6), а его измерение описывается выражением (7), при этом возможны два режима работы рассматриваемого устройства (исправное и неисправное), смена которых происходит случайным образом. В первом режиме ($s=1$) параметры системы (6)–(7) следующие: $A^{(1)}=1$, $L^{(1)}=-0.005$, $U^{(1)}=-4$, $G^{(1)}=3$, $C^{(1)}=1$, $H^{(1)}=1$, $Q^{(1)}=0.4$. Во втором режиме ($s=2$): $A^{(2)}=1$, $L^{(2)}=0.005$, $U^{(2)}=-3$, $G^{(2)}=1.5$, $C^{(2)}=1$, $H^{(2)}=1$, $Q^{(2)}=2$.

На рис. 3 представлены графики изменения сигналов на выходе измерителя: для первого режима $Z_k^{(1)}=z1_k$ и для второго режима $Z_k^{(2)}=z2_k$ системы. Моделирование производилось в среде Mathcad.

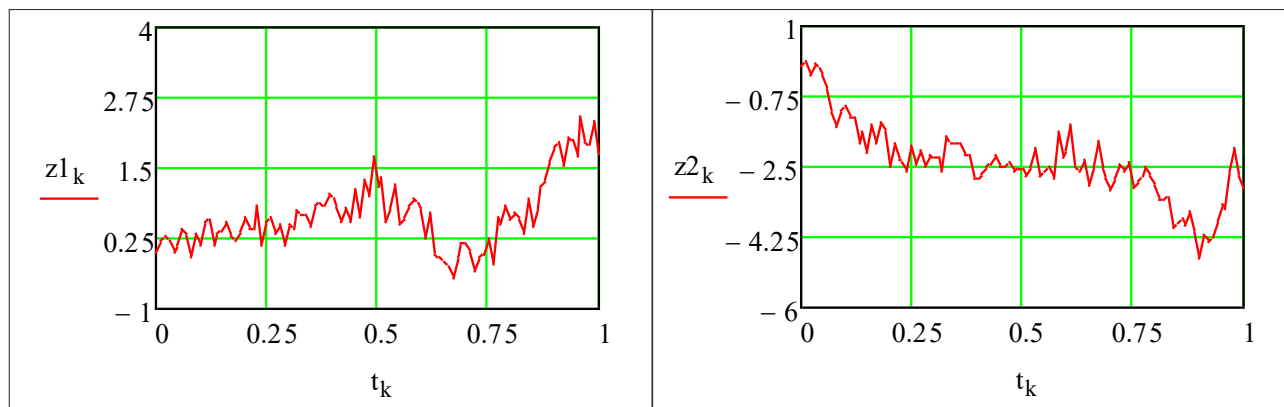


Рисунок 3. Процессы $Z_k^{(1)}$ и $Z_k^{(2)}$ на выходе измерителей

На рис. 4 приведены временные зависимости апостериорных вероятностей каждого из возможных режимов системы $\hat{P}^{(1)} = P1_k$ и $\hat{P}^{(2)} = P2_k$.

В алгоритме распознавания априорные вероятности структур задавались равными $P_1 = P_2 = 0.5$.

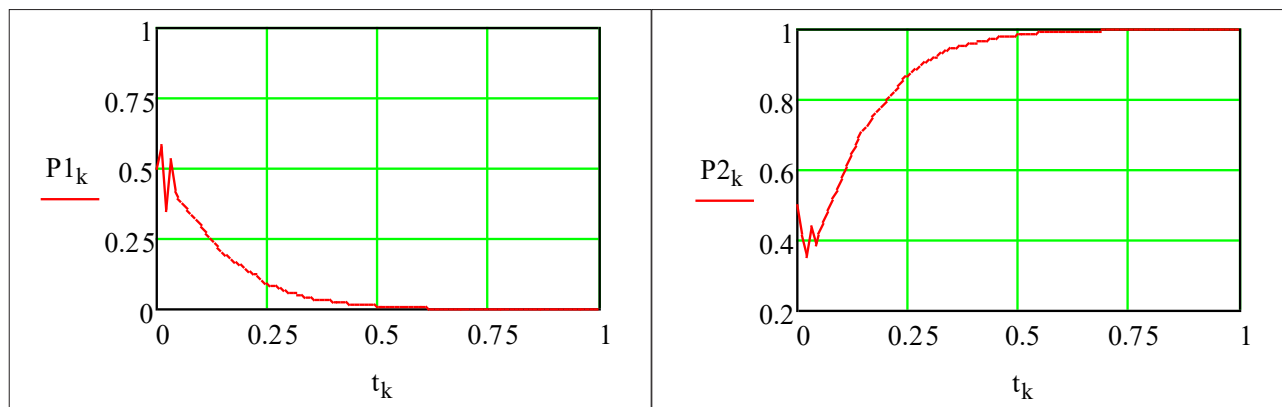


Рисунок 4. Вероятности возможных режимов системы

Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предлагаемые алгоритмы фильтрации и идентификации режимов работы системы позволяют с высокой степенью достоверности определить режим (структуру), в котором находится система. Время, необходимое для оценки структуры системы, в данном примере составило менее одной секунды. При этом количество режимов идентифицируемых с помощью рассматриваемого

алгоритма практически не ограничено и зависит от адекватности математических моделей системы, находящейся в том или ином режиме работы.

Применение в комплексе СППР БАК алгоритмов идентификации режима в дополнение к калмановским алгоритмам фильтрации ошибок измерителей позволяет повысить устойчивость БАК к внезапным изменениям режимов работы, что повысит эффективность применения БЛА, которые являются сложными и дорогостоящими комплексами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспилотные летательные аппараты : справочник / сост.: В. Ю. Барковский, Л. Р. Милованова ; под ред. Н. Н. Новичкова. Москва: АРМС-ТАСС, 2009. 436 с.
2. Эксплуатация и применение беспилотных летательных аппаратов (FPV-дронов) : учебное пособие / А. В. Ананьев, М. А. Булгаков, М. Ф. Волобуев [и др.]. Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023 г. 235 с.
3. Семак, Ю. И. Аппаратно-программный комплекс оперативного контроля технического состояния БЛА в полете / Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : материалы XV Международной научно-практической конференции / Военная академия Республики Беларусь. Минск, 2025. С. 81.
4. Семейство беспилотных летательных аппаратов «Бусел», «Бусел М» и «Бусел М50» для мониторинга местности // Республиканский центр трансфера технологий. URL: <https://www.ictt.by/rus/exh/plan/view.php?proid=cdd3ad7eb0cc77d4f3849f6873ce3c&lng=eng> (дата обращения: 27.04.2026).
5. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. Москва : Наука, 1993. 270 с.
6. Бухалев, В. А. Распознавание, оценивание, и управление в системах со случайной скачкообразной структурой / В. А. Бухалев. Москва : Наука, 1996. 286 с.
7. Бухалев, В. А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов / В. А. Бухалев, А. А. Скрынников, В. А. Болдинов. Москва : Физматлит, 2018. 188 с.
8. Бенкафо, А. С. Особенности применения фильтров Калмана-Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А. С. Бенкафо, А. А. Лобатый // Доклады БГУИР. 2013. № 5. С. 67–71. URL: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/208/208> (дата обращения: 27.04.2026).
9. Бенкафо, А. С. Оценка навигационных параметров подвижного объекта в условиях многорежимности / А. С. Бенкафо, А. А. Лобатый // Доклады БГУИР. 2014. № 4. С. 52–58. URL: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/325/325> (дата обращения: 27.04.2026).

REFERENCES

1. Novichkov N.N., editor. *Bespilotnye letatelnye apparaty: spravochnik [Unmanned Aerial Vehicles: Handbook]*. Moscow: ARMS-TASS; 2009. 436 p. (in Russian).
2. Ananyev A.V., Bulgakov M.A., Volobuev M.F., Vyshlov O.S., Dolgov A.A., Kravtsov E.V., et al. *Ekspluatatsiya i primeneniye bespilotnykh letatelnykh apparatov (FPV-dronov): uchebnoe posobie [Operation and Application of*

Unmanned Aerial Vehicles (FPV Drones): Textbook. Voronezh: VUNTS BBS "VVA"; 2023. 235 p. (in Russian).

3. Semak Yu.I. Apparato-programmnyj kompleks operativnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya BLA v polete [Hardware and software complex for operational control of the technical condition of the UAV in flight]. *Aktualnye voprosy nauki i tekhniki v sfere razvitiya aviacii: materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Topical Issues of Science and Technology in the Field of Aviation Development: Materials of the XV International Scientific and Practical Conference]*. Minsk. 2025. pp. 81 (in Russian).

4. Family of unmanned aircraft systems "Busel", "Busel M" and "Busel M50" for terrain monitoring. *The Republican Center for Technology Transfer* (in Russian). Available at: <https://www.ictt.by/rus/exh/plan/view.php?proid=cd-d3ad7eb0cc77d4f3849f6873ce3c&lng=eng> (accessed 27 April 2026).

5. Kazakov I.E., Artemyev V.M., Bukhalyov V.A. *Analiz sistem sluchajnoj struktury [Analysis of Random Structure Systems]*. Moscow: Nauka; 1993. 270 p. (in Russian).

6. Bukhalyov V.A. *Raspoznavanie, ocenivanie, i upravlenie v sistemah so sluchajnoj skachkoobraznoj strukturoj [Recognition, Estimation, and Control in Systems with Random Discontinuous Structure]*. Moscow: Nauka; 1996. 286 p. (in Russian).

7. Bukhalyov V.A., Skrynnikov A.A., Boldinov V.A. *Algoritmicheskaya pomekhozashchita bespilotnykh letatelnykh apparatov [Algorithmic Interference Protection of Unmanned Aerial Vehicles]*. Moscow: Fizmatlit; 2018. 188 p. (in Russian).

8. Benkafo A.S., Lobaty A.A. Features of application of filters Kalman-Bjusi in orientation and navigation complexes. *Doklady BGUIR [Reports of the BSUIR]*. 2013;(5):67–71 (in Russian). Available at: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/208/208> (accessed 27 April 2026).

9. Benkafo A.S., Lobaty A.A. Evaluation of moving objects' navigation parameters under multimode. *Doklady BGUIR [Reports of the BSUIR]*. 2014;(4):52–58 (in Russian). Available at: <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/325/325> (accessed 27 April 2026).

A. A. LOBATY¹⁾, Y. I. SEMAK²⁾, L. N. GOTINA¹⁾

DECISION SUPPORT SYSTEM FOR AUTOMATED CONTROL

¹⁾ Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²⁾ Scientific and Production Center for Multifunctional Unmanned Systems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This article examines the general principles of constructing a decision support system for controlling an unmanned aerial vehicle (UAV) from a ground control station based on measurements and assessment of the technical condition of the UAV's onboard systems. An analysis of current methods for solving such problems is provided, and the use of algorithmic solutions based on stochastic mathematical models of the processes of change in variables characterizing the UAV's technical condition is substantiated. General differential equations describing the evolution of the system under consideration are presented, derived from the theory of systems with random structure changes. A block diagram characterizing the general principles of solving the problem of probabilistic assessment of the system's technical condition is presented, based on which a discrete algorithm for solving the problem of optimal filtering and identification of the operating mode with monitoring process control is derived. An example of solving the problem for simple mathematical models of the process of change in a technical parameter and its measuring device is given, clearly demonstrating the operability of the proposed algorithm.

Keywords: unmanned aerial vehicle, technical condition, probability, structure, filtering, identification

**Лобатый Александр Александрович**

Белорусский национальный технический университет (БНТУ), пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь.

Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Робототехнические системы» БНТУ. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор научных статей, книг и учебных пособий.

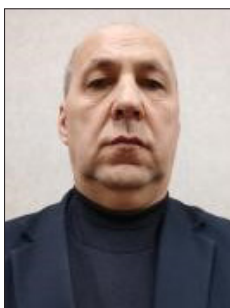
Alexander A. Lobaty

Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus.

Doctor of Science (Engineering), Professor. Professor of the Department of Robotic systems of the Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of control systems, including those of unmanned aerial vehicles. Author and co-author of scientific articles, books, and textbooks.

Тел: +375 29 346-82-56

E-mail: lobaty@bntu.by

**Семак Юрий Иванович**

Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 10, к.7, 220084, г. Минск, Республика Беларусь.

Кандидат технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник РУП «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» НАН Беларуси. Проводит исследования в области теории сложных систем (синергетике) и надежности в технике, в том числе беспилотных систем.

Y. I. Semak

Scientific and Production Center for Multifunctional Unmanned Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, 10/7, Kuprevich St., 220084, Minsk, Republic of Belarus.

PhD in Engineering, Associate Professor. Leading Researcher at the Scientific and Production Center for Multifunctional Unmanned Systems of the National Academy of Sciences of Belarus. He conducts research in the field of complex systems theory (synergetics) and reliability in engineering, including unmanned systems.

E-mail: semak.yury@mail.ru

**Готина Любовь Николаевна**

Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь.

Соискатель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

L. N. Gotina

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Applicant at the Department of Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes, Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of stochastic control systems applied to unmanned aerial vehicles.

E-mail: mathematics@bntu.by