

**Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich** – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347900, Taganrog, Shevchenko street, 2, office K-225; phone: +78634371694; Research and Development Institute of Robotics and Control Systems; Director, dr. of eng. sc.; professor.

**Medvedev Mikhail Yur'evich** – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Research and Development Institute of Robotics and Control Systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 629.7.05

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-158172

**П.П. Кравченко, Н.А. Хусаинов, В.В. Щербинин****СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ  
МНОГОРЕЖИМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ  
САМОЛЕТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ  
ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

*В работе приводится анализ известных проблем синтеза алгоритмов управления БПЛА, базирующегося на линеаризации уравнений движения и использовании ПИД-регуляторов. В рассматриваемой методологии синтеза алгоритмов для БПЛА самолетного типа используются теория оптимизированных по быстродействию и точности дельта-преобразований второго порядка и принцип управления двумя состояниями БПЛА (углом атаки/крена и положением центра масс по высоте/боковому отклонению) одним управляющим воздействием (принцип управления тележкой с перевернутым маятником). Методология нацелена на обеспечение возможности комплексного решения вопросов повышения многорежимности и универсальности практического использования БПЛА: оперирование с нелинейными модельными описаниями, реализация отработки больших отклонений по высоте и боковому отклонению на основе единых алгоритмов в условиях проявления нестационарности параметров, планирующее движение с больших высот, возможность управления боковым отклонением только креном, высокоточный выход по высоте и боковому отклонению на заданные координаты в пространстве и на земле, автоматическая посадка с обеспечением малых динамических ошибок, оптимизация по быстродействию при реализации переходных процессов, устойчивость, грубость алгоритмов управления, существенная простота теоретического синтеза и инженерной реализации. Представленный вариант компьютерного эксперимента автоматической посадки показал при движении с высоты 1000 м, боковом отклонении 600 м и начальной скорости 20 м/сек среднюю скорость снижения по высоте ~12 м/сек, по боковому отклонению – ~7.5 м/сек, максимально развиваемую скорость при спуске – 63 м/сек, выход на глиссаду практически без перерегулирования и высокую точность на протяженных участках установившегося процесса при движении по глиссаде (по обоим каналам динамическая ошибка в пределах ~0.1 м).*

*Беспилотный летательный аппарат; самолет; синтез алгоритмов; цифровое управление; оптимизация; дельта-преобразования второго порядка; быстродействие; ошибка; грубость.*

**P.P. Kravchenko, N.S. Khusainov, V.V. Scherbinin****SYNTHESIS OF DIGITAL CONTROL ALGORITHMS OF THE  
MULTIFUNCTIONAL AIRCRAFT-TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLE  
BASED ON OPTIMISED DELTA-TRANSFORMATIONS OF THE SECOND  
ORDER**

*The paper analyses the known problems of synthesis of UAV control algorithms based on linearization of motion equations and use of PID-controllers. The considered methods of synthesis of algorithms for aircraft-type UAV use the optimized for high speed response and accuracy delta-transformations of the second order, including forecast functions, and the principles of two UAV*

*conditions control (angle of attack/angle of list and center-of-gravity mass position of height / lateral deviation) with one command. The methodology aims to provide complex solutions on increasing of mission practical possibilities and UAV multifunctional performance, which include: handling with non-linear model descriptions, implementation of large deviations in height and lateral deviation on the basis of common algorithms in parameter nonstationarity, intended high altitude movements, opportunity to manage lateral deviation only with an angle of list, robustness of control algorithms, highly accurate capture of specified coordinates over a distance and on ground throughout the height and lateral deviation, automatic landing with small runtime errors, optimizing for timing while step-function responses, steadiness, essential simplicity of theoretical synthesis and engineering implementation. When moving from a height of 1000m with a lateral deviation 600m and the initial velocity of 20 m/s the presented version of computer automatic landing experiment has shown the average velocity height descent rate of ~ 12 m/s, the average velocity lateral deviation rate of ~ 7.5 m/s, and the glide-path capture with little or no overdriving and high accuracy on long sections of stationary while glissading (by both channels within ~ 0.1m when glissading).*

*Unmanned aerial vehicle; aircraft; synthesis of control algorithms; delta-transformations; high speed response; error; robustness.*

**Введение.** Тенденции развития методологии синтеза алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа связаны, в частности, с необходимостью повышения качественных характеристик, расширения многорежимности БПЛА и соответствующей универсальности в практическом использовании [1–3]. Среди таких возможностей можно отметить способности эффективного алгоритмического обеспечения отработки больших отклонений, планирующего движения с больших высот, высокоточного выхода по высоте и боковому отклонению на заданные координаты в пространстве и на земле, автоматической посадки с обеспечением достаточно малых динамических ошибок, оптимизации по быстрдействию при реализации переходных процессов, устойчивость и некоторые другие [1–6].

Широко используемые при проектировании систем управления БПЛА классические методологии синтеза базируются на линеаризации исходных нелинейных дифференциальных уравнений движения, функционировании при малых отклонениях, использовании ПИД-регуляторов, реализации движения по оперативно формируемой траектории [7–10].

Известны многочисленные работы, нацеленные на совершенствование качественных характеристик процессов управления, реализуемых с использованием данных методологий (например, [2–6, 11, 12]). В то же время остается актуальным комплексное решение вопросов, связанных со следующими особенностями:

- ◆ в связи с существенной нелинейностью в описании объекта практически невозможны отработки больших отклонений, в частности, с оптимизацией по быстрдействию и малыми ошибками при выходе на заданную траекторию;
- ◆ изменение в процессе полета нестационарных параметров, характеризующих объект, может приводить к необходимости перестройки алгоритмов управления;
- ◆ летательный аппарат относится к объектам, в которых центр тяжести и точка приложения силы не совпадают; данное обстоятельство накладывает фундаментальный проблемный отпечаток на возможности эффективного решения задачи управления ЛА, в частности, при проявлении статической неустойчивости.

Рассматриваемая в данной статье методология синтеза алгоритмов цифрового управления БПЛА самолетного типа базируется на теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка [13, 14], сочетающейся с возможностью реализации единого подхода в синтезе алгоритмов управления для линейных и

нелинейных объектов, а также с принципом управления одним управляющим воздействием двумя состояниями объекта (*принцип управления тележкой с перевернутым маятником* [13–17]).

**1. Постановка задачи.** Используются классические уравнения движения ЛА. При синтезе существенно упрощается модельное описание ЛА по сравнению с исходной моделью: сохраняются только те описательные компоненты с учетом их нелинейностей, которые оказывают преобладающее влияние в соответствующих уравнениях движения. В то же время используемые описания компонент аэродинамических коэффициентов сил и моментов могут содержать сложные аналитические и табличные соотношения взаимосвязей переменных и параметров.

В рамках статьи рассматриваются методологические возможности синтеза алгоритмов управления беспилотным ЛА самолетного типа, позволяющие подойти к комплексной реализации следующих эффективных возможностей:

- ◆ формирование оптимизированных по быстродействию переходных и точности установившихся процессов обработки больших отклонений ошибки с учетом нелинейностей в описании объекта по каналам высоты и бокового отклонения;
- ◆ реализация управления боковым отклонением с использованием только крена;
- ◆ управление объектом с несовпадающими центром масс и точкой давления воздушных масс в условиях проявления статической неустойчивости, обеспечение управления двумя переменными с помощью одного управляющего воздействия;
- ◆ функционирование без перестройки единых алгоритмов управления при изменении нестационарных параметров;
- ◆ при проектировании имеются определенные возможности априори решать вопрос о быстродействии переходных, точности установившихся процессов и временном шаге дискретизации;
- ◆ простота теоретического синтеза и инженерной реализации.

Приводимые в работе результаты модельных экспериментов охватывают демонстрацию обработки больших отклонений, выхода на глиссаду автоматической посадки и движения по глиссаде. Глиссада представлена в виде горизонтального участка, расположенного на высоте 50 м и плавно переходящего в наклонный участок под углом  $\sim 3^\circ$ ; траектория завершающего участка движения представлена в виде экспоненты [18].

Освещаемые в работе вопросы в значительной мере методологически коррелируются с материалом, изложенным в [16, 17]. При этом одним из наиболее характерных отличительных признаков является использование крена в управлении боковым отклонением. Приводимые в работе конкретные алгоритмы управления представляются как пример реализации синтеза. Грубость алгоритмов дельта-преобразований и особенности описания уравнений движения в конкретных приложениях могут накладывать существенный отпечаток на конечное представление алгоритмов управления.

**2. Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка.** Сущность дельта-преобразования второго порядка состоит в формировании с дискретным шагом  $\nabla t$  для данной исходной функции (сигнала) аппроксимирующей функции, вторые разности или вторые производные которой на шаге преобразования принимают значения из ограниченного множества величин, например, +1, 0 и -1. Впервые алгоритмы устойчивых оптимизированных по быстродействию и точности дельта-преобразований второго порядка разработаны одним из авторов данной работы и были ориентированы на сжатие сигналов [19]. В качестве

ближайшего аналога данных алгоритмов можно рассматривать классические алгоритмы оптимального по быстродействию непрерывного управления объектом в виде двух последовательных интегрирующих звеньев [20]. Характерной особенностью алгоритмов дельта-преобразований, как и алгоритмов аналога, является наличие прогнозирования.

Дифференциально-разностные троичные алгоритмы дельта-преобразований второго порядка применительно к рассматриваемой задаче для четырех переменных  $j = \overline{1,4}$  при шаге временной дискретизации  $\nabla t$  и определенных задаваемых

для протяженных интервалов значениях  $c_j^*$  можно представить в следующем виде [14, 19]:

$$\left. \begin{aligned} z_{ji} &= x_{ji} - y_{\text{зад},ji}; \quad z_{ji} = b_j(x_{ji} - y_{\text{зад},ji}); \\ F_{ji}^1 &= z_{ji} + 2z_{ji}\nabla t + (0,5(z_{ji}\nabla t)^2 / c_j + 0,5c_j) \text{sign}(z_{ji}); \\ F_{ji}^2 &= z_{ji} + z_{ji}\nabla t + (0,5(z_{ji}\nabla t)^2 / c_j - 0,5c_j) \text{sign}(z_{ji}); \\ \text{если } F_{ji}^1 F_{ji}^2 &> 0, \text{ то } \Delta_{j,i+1} = -\text{sign} F_{ji}^1; \text{ иначе } \Delta_{j,i+1} = 0; \\ \ddot{Y}_{j,i+1} &= c_j^* \Delta_{j,i+1} / (\nabla t)^2; t \in [t_i; t_{i+1}]; c_j^* > 0, c_j = 0,75c_j^*; j = \overline{1,2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $i$  – номер временного шага преобразования,  $y_{\text{зад},ji}$  – текущее задающее значение переменной,  $x_{ji}$  – текущее значение преобразованной переменной (аппроксимирующей функции);  $z_{ji}$  – ошибка,  $F_{ji}^1$  и  $F_{ji}^2$  – прогнозирующие функции;  $b_j \geq 1$ ,  $\Delta_{j,i+1}$  – формируемый знак кванта преобразования  $\ddot{Y}_{j,i+1}$ . Значения  $\Delta_{j,i+1} \in \{+1; 0; -1\}$  определяют режимы разгон/0/торможение.

Сущность работы данного алгоритма подробно освещена в работах [13, 14]; в разделах 4 и 5 указаны функциональные связи данного алгоритма с реализуемыми для рассматриваемой модели БПЛА. На каждом дискретном шаге протяженного интервала обеспечивается постоянство задаваемого модуля второй производной аппроксимирующей функции (кванта преобразования  $|\ddot{Y}_{j,i+1}|$ ), для которой формируется знак  $\Delta_{j,i+1}$ . Значения  $x_{ji}$  формируются как функция от  $\ddot{Y}_{j,i+1}$  в процессе двойного интегрирования (применительно к объекту управления двойное интегрирование реализуется собственно объектом в процессе движения с формированием координат состояния  $x_{ji}$ ). Для линейно изменяющейся задающей переменной  $y_{\text{зад},ji}$  обеспечивается оптимизация по быстродействию без перерегулирования в переходном процессе и по точности в установившемся на основе использования единого алгоритма. В работах [13, 14, 19] приведены, в частности, алгоритмы дельта-преобразований, в которых отсутствует необходимость прямого использования производных ошибок (в разделе 6 предполагается использование данного алгоритма, по крайней мере, при  $j = 2$ ).

При отсутствии внешних возмущений (отработка ступенчатой или линейно изменяющейся функции  $y_{\text{зад},ji}$ ) процессы дельта-преобразований характеризуются следующими **гарантированными** показателями ( $b_j = 1, j = \overline{1,4}$ ) [13, 14, 19]:

- ♦ ошибка установившегося процесса (для трюичного дифференциально-разностного алгоритма):

$$|\hat{z}(t)| \leq 0,5c^*; \quad (2)$$

- ♦ количество шагов  $R_{\text{пер}}$  и длительность переходного процесса  $T_{\text{пер}}$  ( $\dot{z}(t_0) \approx 0$ ):

$$R_{\text{пер}} \approx \sqrt{\frac{|z(t_0)|}{c^*}}, \quad T_{\text{пер}} \approx R_{\text{пер}} \nabla t \quad \text{или} \quad T_{\text{пер}} \approx \sqrt{\frac{|z(t_0)|}{|\ddot{Y}|}}, \quad (3)$$

Значения  $c^*$  и квант преобразования  $|\ddot{Y}|$  характеризуют точностные и динамические характеристики, задаются априорно или в процессе выполнения преобразований.

**3. Особенности методики синтеза алгоритмов цифрового управления на основе использования оптимизированных дельта-преобразований второго порядка.** В работах [13, 14] подробно освещена *единая простая инженерная методика синтеза алгоритмов цифрового управления для линейных и нелинейных объектов определенного класса (механических объектов)*. Сущность методологии состоит в том, что формируется процесс управления, эквивалентный процессу оптимизированного дельта-преобразования второго порядка. Особенностью применения дельта-преобразований для управления является, в частности, то, что для различных объектов имеют место фактически шаблонные характеристики для областей управляемости, качественные оценки и рекомендации, которые могут быть априорно использованы при проектировании цифровой системы управления. Устойчивость обуславливается наличием прогнозирования и обеспечением гарантированных показателей качества при допустимых возмущающих воздействиях. В рамках рассматриваемой методологии синтеза алгоритмов управления БПЛА проявляются неконтролируемые возмущения, приводящие к увеличению значений показателей (2) и (3). Практическая важность показателей (2) и (3) в данных условиях состоит в том, что они могут рассматриваться как предельно достижимые, и в процессе проектирования целесообразно стремиться к обеспечению наиболее близких к этим показателям реальных значений.

**4. Методология синтеза алгоритмов цифрового управления БПЛА самолетного типа.** В решении задачи синтеза используются приводимые ниже исходные дифференциальные уравнения движения в связанной и локальной (земной) системах координат [7, 8, 10, 18]:

$$\dot{v}_y = -\omega_z v_x + \omega_x v_z - g \cos \vartheta \cos \gamma + (X \sin \alpha + Y \cos \alpha) / m; \quad (4)$$

$$\dot{v}_z = -\omega_x v_y + \omega_y v_x + g \cos \vartheta \sin \gamma - (X \cos \alpha \sin \beta + Y \sin \alpha \sin \beta + Z \cos \beta) / m; \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_x = ((I_y - I_z) \omega_y \omega_z + M_x q S L) / I_x; \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_z = ((I_x - I_y) \omega_y \omega_x + M_z q S b_A) / I_z; \quad (7)$$

$$\dot{y}_{y_g} = v_x \sin \vartheta + v_y \cos \vartheta \cos \gamma - v_z \cos \vartheta \sin \gamma; \quad (8)$$

$$\dot{y}_{z_g} = -v_x \sin \psi \cos \vartheta + v_y (\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma) + v_z (\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma), \quad (9)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции вектора скорости в связанной системе координат (ССК),  $\alpha, \beta$  – углы атаки и скольжения,  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции вектора угловой скорости,

$\dot{Y}_{y_g}, \dot{Y}_{z_g}$  – проекции вектора скорости в ЛСК;  $X, Y, Z$  – компоненты вектора полной аэродинамической силы,  $\vartheta, \gamma$  – углы тангажа и крена,  $m$  – масса БПЛА,  $g$  – ускорение свободного падения. Здесь также

$$\alpha = -\arctan(v_y / v_x); \quad q = \frac{1}{2} \rho_h v^2; \quad v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2;$$

$$Y = c_y q S; \quad c_y = c_y^0 + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\omega_z} \omega_z + c_y^{\delta_{TS}} \delta_{TS}; \quad (10)$$

$$M_x = M_x^0 + M_x^\beta \beta + M_x^{\omega_x} \omega_x + M_x^{\omega_y} \omega_y + M_x^{\delta_{ail}} \delta_{ail} + M_x^{\delta_{dir}} \delta_{dir}; \quad (11)$$

$$M_z = M_z^0 + M_z^\alpha \alpha + M_z^{\omega_z} \omega_z + M_z^{\delta_{TS}} \delta_{TS}, \quad (12)$$

$c_y$  – аэродинамический коэффициент сил (в правую часть  $c_y$  входят соответствующие постоянные коэффициенты),  $M_x, M_z$  – аэродинамические коэффициенты моментов крена и тангажа (в правую часть  $M_x, M_z$  входят соответствующие постоянные коэффициенты);  $\delta_{TS}, \delta_{ail}, \delta_{dir}$  – отклонения рулей высоты, элеронов и направления и (в рамках данной работы при движении в полете предполагается  $\delta_{dir} = 0$ ),  $q$  – скоростной напор воздушного потока,  $S$  – площадь крыльев,  $\rho_h$  – плотность воздушных масс (в общем случае – функция высоты БПЛА и температуры).

В соответствии с принципом использования дельта-преобразований в рамках реализации алгоритмов управления для каналов управления по высоте и боковому отклонению в ЛСК задаются модули ускорений  $|\dot{y}_{y_g}|$  и  $|\dot{y}_{z_g}|$  в виде квантов  $|\dot{Y}_{y_g, i+1}|$  и  $|\dot{Y}_{z_g, i+1}|$ . На основе измеряемых (вычисляемых) значений координат БПЛА и задающих траекторий движения на каждом шаге ( $i+1$ ) определяются текущие ошибки по данным каналам, и с помощью алгоритмов дельта-преобразований формируется знак указанных ускорений (изменения перегрузок), т.е. формируются соответствующие прогнозируемому оптимизированному по быстродействию и точности движению центра масс БПЛА значения  $\dot{Y}_{y_g, i+1}$  и  $\dot{Y}_{z_g, i+1}$ .

Практическая реализация данных ускорений реализуется путем расчета на каждом дискретном шаге соответствующих по значению задающих значений углов атаки по каналу высоты и крена, которые обрабатываются на БПЛА с помощью управляющих воздействий по высоте и управлению креном. Таким образом, при действии одного управляющего воздействия по каналу высоты/(бокового отклонения) осуществляется управление двумя состояниями: углом атаки/крена и положением центра масс по высоте/(боковому отклонению).

Реализация управления скоростью БПЛА путем регулирования тяги двигательной установки предполагается на основе ПИД регулятора, как это показано в работе [18]. Ниже основное внимание уделено каналам управления по высоте и боковому отклонению (управление креном).

**4.1. Формирование текущих задающих значений углов атаки.** В соответствии с методологией дельта-преобразований второго порядка вводим в рассмотрение для ( $i+1$ )-го шага дискретизации в ЛСК квант преобразования  $\dot{Y}_{y_g, i+1}$ , постоянный по модулю на протяженном интервале:

$$\dot{y}_{y_g}(t) = \dot{Y}_{y_g, i+1}; \quad \dot{Y}_{y_g, i+1} = \eta_{y_g, i+1}^*; \quad t \in [t_i; t_{i+1}] \quad (13)$$

где  $\eta_{y_g, i+1}^*$  – задаваемое изменение перегрузки в ЛСК.

Связываем уравнения (4), (10) ССК, после дифференцирования (8) ЛСК и (13). В рамках данной работы предполагаем, что значения ограничений максимальных значений углов тангажа, рыскания и крена малы (например,  $\sim (15 \div 30)^\circ$ ), а также учитывая грубость синтезируемых алгоритмов на основе дельта-преобразований, вводим в эти формулы упрощения и задающее значение угла атаки определяем в виде

$$\alpha_{зад,i+1} = m(\dot{Y}_{y_g,i+1} / (\cos|\vartheta|_{\max} \cos|\gamma|_{\max}) + g - c_y^0 q_{i+1} S / m) / (c_y^\alpha q_{i+1} S). \quad (14)$$

**4.2. Формирование текущих задающих значений углов крена и прогнозирование выхода из крена.** В рамках исследований, проводимых при формировании рассматриваемой методологии синтеза БПЛА самолетного типа, анализировались различные подходы в решении задачи управления боковым движением: комплексное взаимодействие крена и руля направления, а также управление креном без использования руля направления. По данным подходам получены положительные результаты в обеспечении высоких технических характеристик по быстродействию и точности. Ниже освещаются вопросы управления боковым движением в полете с помощью крена без участия руля направления ( $\delta_{dir} = 0$ ). Синтезированные алгоритмы при таком подходе оказываются проще, углы скольжения минимизируются, конструктивно БПЛА также упрощается, и в то же время БПЛА в сочетании с возможностями реализации эффективного движения в больших отклонениях можно рассматривать как обладающий расширенной многорежимностью [2].

Используем для синтеза уравнение бокового движения БПЛА (5) ССК в упрощенном виде

$$\dot{v}_z = g \cos \vartheta \sin \gamma,$$

что приближенно соответствует установившемуся движению (постоянство  $\dot{v}_z$ ) при развороте в горизонтальной плоскости без скольжения [4, 8].

Вводим для  $(i+1)$ -го шага дискретизации в ЛСК квант преобразования  $\dot{Y}_{z_g,i+1}$ , постоянный по модулю на протяженном интервале:

$$\dot{y}_{z_g}(t) = \dot{Y}_{z_g,i+1}; \quad \dot{Y}_{z_g,i+1} = \eta_{z_g,i+1}^* g; \quad t \in [t_i; t_{i+1}] \quad (15)$$

где  $\eta_{z_g,i+1}^*$  – задаваемое изменение перегрузки в ЛСК.

Связываем уравнения (5) ССК, после дифференцирования (9) ЛСК, (15) и упрощенное выражение для задающего значения угла крена определяем в виде:

$$\gamma_{зад,i+1} = \arcsin(\dot{Y}_{z_g,i+1} / g) \quad \text{или} \quad \gamma_{зад,i+1} = \arcsin(\eta_{z_g,i+1}^*).$$

Данное задающее значение угла крена формируется на каждом шаге в зависимости от характера задающей и формируемой траекторий движения БПЛА. По знаку эти значения на соседних шагах могут отличаться, при этом текущее реальное значение угла крена БПЛА меняется в зависимости от значений последовательно поступающих квантов и в соответствии со свойствами инерционности БПЛА. При выходе на траекторию со слабо выраженным разворотом текущий угол будет устремляться к малым значениям. В данных условиях формирования текущего угла крена существенно важным является решение вопроса выхода из крена с минимизацией перерегулирования, сущность которого базируется на использовании характерного для оптимизированных дельта-преобразований второго порядка принципа глубокого прогнозирования процесса движения. В рамках синтеза получено следующее расширенное относительно представленного выше выражение, которое базируется на прогнозирующих функциях алгоритма (1) дельта-преобразования (параметр  $d > 0$  уточняется при моделировании):

$$\begin{aligned} \text{если } \operatorname{abs}\left(\left(F_{3i}^1 + F_{3i}^2\right) / \left(2 * z_{3i}\right)\right) > d, \text{ то } \gamma_{\text{зад}, i} = \arcsin\left(\dot{Y}_{z_g, i+1} / g\right), \\ \text{иначе } \gamma_{\text{зад}, i} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

**4.3. Поддержание ограничений по максимальным углам атаки, крена и определение параметров**  $C_{y_g, i+1}^*$ ,  $C_{z_g, i+1}^*$ . Важной особенностью синтезируемых алгоритмов является возможность реализации управления на основе единых алгоритмов в условиях проявления нестационарности параметров, таких, например, как скорость БПЛА, плотность воздушной среды (движение в условиях больших отклонений), массы БПЛА и других. При проектировании системы управления целесообразно задание изменений перегрузок согласовывать с возможностью обеспечения ограниченности обрабатываемых углов атаки, крена без ограничительного усечения модулей этих углов, по крайней мере, для определенных нормативных пределов изменения нестационарных параметров. В то же время, на практике возможны ситуации, например, в нестандартных чрезвычайных обстоятельствах, когда задающие значения данных углов могут выходить за принятые допустимые пределы и необходимо принимать меры для обеспечения соответствующих ограничений. Ниже рассматриваются возможности оперативной коррекции задаваемых значений перегрузок для обеспечения ограниченности задающих значений углов без их ограничительного усечения в ситуациях, выходящих за пределы “нормативных”.

Пусть исходно задано максимальное по модулю значение  $|\alpha_{\text{зад}}|_{\max}$ . На основе выражения (14) можно получить

$$\left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|_{\max} = \left[ c_y^\alpha q_{i+1} S |\alpha_{\text{зад}}|_{\max} + |mg - c_y^0 q_{i+1} S| \right] \cos|\vartheta|_{\max} \cos|\gamma|_{\max} / m.$$

Вводим коэффициент  $k_{\gamma, i+1}$  (назначение см. ниже)

$$\text{если } \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| > \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|_{\max}, \text{ то } k_\gamma = \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|_{\max} / \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|, \text{ иначе } k_\gamma = 1.$$

Учитывая в соответствии с алгоритмами дельта-преобразований соотношение для кванта преобразования

$$\left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| = \frac{c_{y_g, i+1}^*}{\nabla t^2}, \Delta_{i+1} \neq 0, t \in [t_i; t_{i+1}]$$

определяем  $C_{y_g, i+1}^*$  в виде:

$$c_{y_g, i+1}^* = \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| \nabla t^2. \quad (17)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \text{если } \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| > \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|_{\max}, \text{ то } \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| = \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right|_{\max}, \\ \text{иначе } \left|\dot{Y}_{y_g, i+1}\right| - \text{ без изменений.} \end{aligned}$$

Алгоритмически можно рассматривать коррекцию по углу крена в рамках тех же закономерностей, как и для угла атаки. В то же время, рассматривая выход максимального угла атаки за пределы максимального значения как проявление экстремальной ситуации, при которой может быть целесообразным и уменьшение угла крена, возможную коррекцию по углу крена связываем с рассмотренной выше коррекцией по углу атаки. Принимаем для  $C_{z_g, i+1}^*$ :



$$c_{z_g, i+1}^* = k_\gamma \left| \dot{Y}_{z_g, i+1} \right| \nabla t^2. \quad (18)$$

**4.4 Формирование управляющих воздействий.** В соответствии с принципом использования дельта-преобразований в рамках реализации алгоритмов управления для формирования текущих углов атаки и крена исходно задаются модули вторых производных  $|Y_\alpha''| = L_\alpha$ , и  $|Y_\gamma''| = L_\gamma$ . На основе измеряемых (вычисляемых) текущих значений данных углов БПЛА и задающих значений этих углов на каждом шаге определяются текущие ошибки, и с помощью алгоритмов дельта-преобразований формируются знаки указанных вторых производных, т.е. формируются соответствующие прогнозируемому оптимизированному по быстродействию и точности движению значения  $\dot{Y}_{\alpha, i+1}$ , и  $\dot{Y}_{\gamma, i+1}$ . Практическая реализация данных перегрузок реализуется по каналам путем расчета на каждом дискретном шаге соответствующих по значению управляющих воздействий, которые обрабатываются на БПЛА с помощью рулевых устройств.

Принимая  $\dot{Y}_{\alpha, i+1} \equiv \dot{\omega}_z$ ; ( $\ddot{\alpha}_{i+1} \equiv \ddot{\omega}_{z, i+1}$ ), используя уравнения (7), (12) и проводя упрощения, получаем для управляющего воздействия по высоте:

$$\delta_{TS, i+1}^* = - \frac{J_{z1} Y_{\alpha, i+1}'' - (J_{x1} - J_{y1}) \omega_{x1, i} \omega_{y1, i} + \dot{M}_{zi} q_i S b_A}{M_z \delta_{TS}^* q_i S b_A}. \quad (19)$$

Учитывая ограничения по отклонению руля высоты, добавляем соотношения:

$$\text{если } \left| \delta_{TS, i+1}^* \right| > \left| \delta_{TS} \right|_{\max}, \text{ то } \delta_{TS, i+1} = \left| \delta_{TS} \right|_{\max} \text{sign}(\delta_{TS, i+1}^*), \text{ иначе } \delta_{TS, i+1} = \delta_{TS, i+1}^*. \quad (20)$$

Принимая далее  $\dot{Y}_{\gamma, i+1} \equiv \dot{\omega}_x$ ; ( $\dot{\gamma}_{i+1} \equiv \dot{\omega}_{x, i+1}$ ), используя уравнения (6), (11) и проводя упрощения, получаем для управляющего воздействия по крену:

$$\delta_{ail, i+1}^* = \frac{J_{x1} \dot{Y}_{\gamma, i+1}}{M_x \delta_{ail}^* q_i S}. \quad (21)$$

Учитывая ограничения по отклонению руля крена, добавляем соотношения:

$$\text{если } \left| \delta_{ail, i+1}^* \right| > \left| \delta_{ail} \right|_{\max}, \text{ то } \delta_{ail, i+1} = \left| \delta_{ail} \right|_{\max} \text{sign}(\delta_{ail, i+1}^*), \text{ иначе } \delta_{ail, i+1} = \delta_{ail, i+1}^*. \quad (22)$$

В соответствии с методологией синтеза алгоритмов управления на основе дельта-преобразований второго порядка в общем случае может потребоваться введение на каждом дискретном шаге  $\nabla t$  дополнительной дискретизации [14]. Как показывает опыт компьютерного моделирования разных БПЛА (ракета [16, 17], самолет) возможно использование достаточно малых, но значимых с практической точки зрения шагов дискретизации  $\nabla t$ , при которых отпадает необходимость введения дополнительной дискретизации, и в представленных выше выражениях данный фактор не отражается.

**5. Базовые алгоритмы управления с использованием дельта-преобразований второго порядка.** Приводимый ниже “базовый” алгоритм управления БПЛА самолетного типа отражает основные процедурные компоненты для  $(i+1)$ -го шага, и может рассматриваться как пример синтеза алгоритмического обеспечения, отражения путей совершенствования качественных и функциональных характеристик процессов управления.

### 5.1. Канал высоты

а) *Определение  $\alpha_{\text{зад}, i+1}$ .* Исходно задано:  $U_{\text{зад}, y_g, i+1}$ ;  $\dot{Y}_{\text{зад}, y_g, i+1}$ ;  $\nabla t$ ;  $\left| \dot{Y}_{y_g, i+1} \right|$ ;  $\left| \alpha \right|_{\max}$ ;  $\left| \beta \right|_{\max}$ ;  $\left| \gamma \right|_{\max}$ .

*Порядок вычислений:*

– определение  $c_{y_g,i+1}^*$  (17),  $c_1^* = c_{y_g,i+1}^*$ ;

– определение на основе (1) при  $j=1$  значения  $\Delta_{1,i+1}$  ( $x_{1i} = y_{y_g,i}$ ;

$y_{зад,1,i} = y_{зад,y_g,i}$ ;  $\dot{x}_{1,i} = \dot{y}_{y_g,i}$ ;  $y_{зад,1,i} = y_{зад,y_g,i}$ );

– уточнение  $\Delta_{1,i+1}$  с учетом возможного ограничения  $|\mathcal{G}|$ :

если  $|\mathcal{G}_i| > |\mathcal{G}|_{\max}$ , то  $\Delta_{1,i+1} = -\text{sign}(\dot{z}_{1,i})$ , иначе  $\Delta_{1,i+1} = -\text{sign}F_{1,i}$ ;

– определение значения  $\ddot{Y}_{y_g,i+1} = \ddot{Y}_{1,i+1}$ ;

– определение  $\alpha_{зад,i+1}$  (14).

б) *Определение*  $\delta_{TS,i+1}$ . Исходно задано:  $|\dot{Y}_\alpha| = L_\alpha$ ;  $|\delta_{TS}|_{\max}$ ;  $\alpha_{зад,i+1} = 0$ .

*Порядок вычислений:*

– определение  $c_{\alpha,i+1}^* = |\dot{Y}_\alpha| \nabla t^2$ ,  $c_2^* = c_{\alpha,i+1}^*$ ;

– определение на основе (1) при  $j=2$  значения  $\ddot{Y}_{\alpha,i+1} = \ddot{Y}_{2,i+1}$  ( $x_{2,i} = \alpha_i$ ;

$\dot{x}_{2,i} = \omega_{z,i}$ ;  $y_{зад,2,i} = \alpha_{зад,i+1}$ );

– определение  $\delta_{TS,i+1}$  (19), (20).

## 5.2. Канал бокового управления

а) *Определение*  $\gamma_{зад,i+1}$ . Исходно задано:  $y_{зад,z_g,i+1}$ ;  $\dot{y}_{зад,z_g,i+1}$ ;  $\nabla t$ ;  $|\dot{Y}_{z_g,i+1}|$ ;  $|\psi|_{\max}$ ;  $|\mathcal{G}|_{\max}$ .

*Порядок вычислений:*

– определение  $c_{z_g,i+1}^*$  (18),  $c_3^* = c_{z_g,i+1}^*$ ;

– определение на основе (1) при  $j=3$  значения  $\Delta_{3,i+1}$  ( $x_{3i} = y_{z_g,i}$ ;

$y_{зад,3,i} = y_{зад,z_g,i}$ ;  $\dot{x}_{3,i} = \dot{y}_{z_g,i}$ ;  $y_{зад,3,i} = y_{зад,z_g,i}$ );

– уточнение  $\Delta_{3,i+1}$  с учетом возможного ограничения угла рыскания:

если  $|\psi_i| > |\psi|_{\max}$ , то  $\Delta_{3,i+1} = -\text{sign}(\dot{z}_{3,i})$ , иначе  $\Delta_{3,i+1} = -\text{sign}F_{3,i}$ ;

– определение значения  $\ddot{Y}_{z_g,i+1} = \ddot{Y}_{3,i+1}$ ;

– определение  $\gamma_{зад,i+1}$  (16).

б) *Определение*  $\delta_{ail,i+1}$ .

Исходно задано:  $|\dot{Y}_\gamma| = L_\gamma$ ;  $|\delta_{ail}|_{\max}$   $\gamma_{зад,i+1} = 0$ .

*Порядок вычислений:*

– определение  $c_{\gamma,i+1}^* = |\dot{Y}_\gamma| \nabla t^2$ ;  $c_4^* = c_{\gamma,i+1}^*$ ;

– определение на основе (1) при  $j=4$  значения  $\ddot{Y}_{\gamma,i+1} = \ddot{Y}_{4,i+1}$  ( $x_{4,i} = \gamma_i$ ;

$\dot{x}_{4,i} = \omega_{x,i}$ ;  $y_{зад,4,i} = \gamma_{зад,i+1}$ );

– определение  $\delta_{ail,i+1}$  (21), (22).

**6. Результаты модельных экспериментов.** Компьютерное моделирование проводилось при следующих исходных данных:  $\nabla t = 0.02$  сек; скорость  $V(t_0) = 20$  м/сек; высота  $H(t_0) = 1000$  м; боковое отклонение  $z_{z_g,0} = 600$  м;  $|\vartheta|_{\max} = 25^\circ$ ;  $|\psi|_{\max} = 10^\circ$ ; масса БПЛА  $m = 15$  кг; начальные значения углов тангажа  $\vartheta(t_0) = 0$ , рыскания  $\psi(t_0) = 0$ ; крена  $\gamma(t_0) = 0$ . На графиках отражен выход на глиссаду и движение по глиссаде при моделировании автоматической посадки.

На рис. 1 представлены графики временных диаграмм: рис. 1,а и рис. 1,д – траектории движения по высоте  $y_{y_g}(t)$  и боковому отклонению  $y_{z_g}(t)$ ; рис. 1,б и рис. 1,ж – ошибки по высоте  $z_{y_g}(t)$  и боковому отклонению  $z_{z_g}(t)$  в увеличенном масштабе; рис. 1,в и рис. 1,з – угол атаки  $\alpha(t)$  и угол скольжения  $\beta(t)$ ; рис. 1,г и рис. 1,и – угол тангажа  $\vartheta(t)$  и угол крена  $\gamma(t)$ . С помощью управляющего воздействия  $\delta_{TS}$  осуществляется представленное на графиках управление углом атаки и, соответственно, ошибкой по высоте  $z_{y_g}(t)$ ; управляющим воздействием  $\delta_{ail}$  – управление углом крена и ошибкой бокового отклонения  $z_{z_g}(t)$ . Максимальная развиваемая скорость при спуске (планировании) – 63 м/сек. В качестве дополнительных особенностей реализуемой модели относительно приведенных алгоритмов следует отметить формирование значений параметров  $|\dot{Y}_{y_g,i+1}|$  и  $|\dot{Y}_{z_g,i+1}|$  во взаимосвязи с текущими ошибками управления, имитацию вносимых рулевыми устройствами задержек, а также сглаживание управляющих воздействий, ограничивающее частоты колебания рулей на уровне  $\sim 1$  Гц.

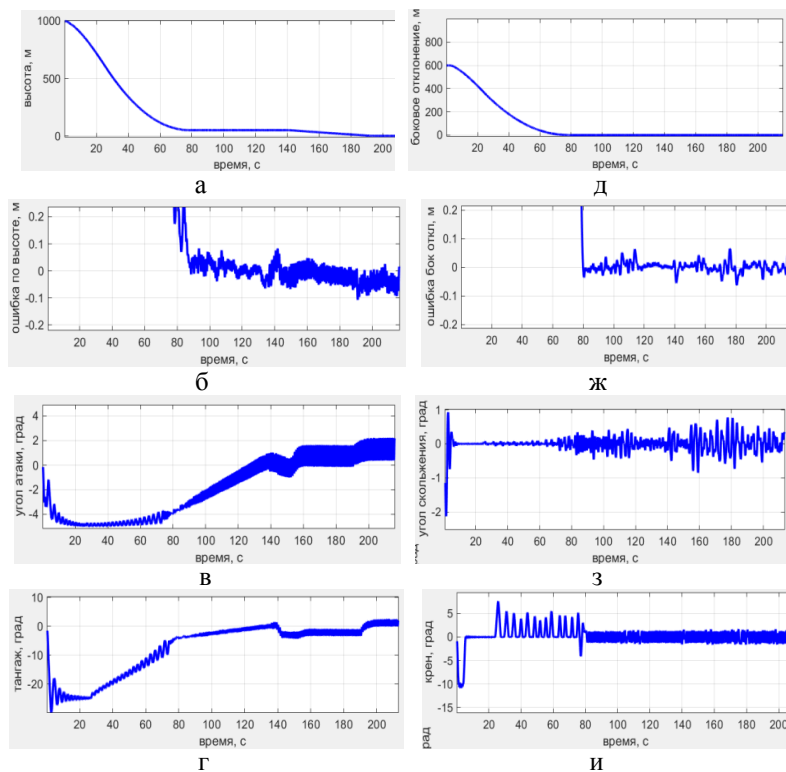


Рис. 1. Временные диаграммы процессов управления

**Заключение.** Рассмотренная методология синтеза алгоритмов цифрового управления БПЛА самолетного типа базируется на использовании прогнозирующих функций, представляет возможности обеспечения многорежимности универсализации практического использования БПЛА, учитывает нелинейность модельного описания, отработку больших отклонений практически без перерегулирований, функционирование на основе единых алгоритмов при наличии нестационарных параметров, возможность управления боковым отклонением только креном, оптимизацию по быстродействию переходных процессов (в рассмотренном примере компьютерного моделирования при движении с высоты 1000 м, боковым отклонением 600 м и начальной скорости 20 м/сек средняя скорость снижения по высоте составила  $\sim 12$  м/сек, по боковому отклонению –  $\sim 7.5$  м/сек, максимальная скорость – 63 м/сек), высокую точность на протяженных участках установившегося процесса (динамическая ошибка при автоматической посадке движения по глиссаде по обоим каналам – в пределах  $\sim 0.1$  м), грубость алгоритмов управления, существенную простоту теоретического синтеза и инженерной реализации. Возможно управляемое регулирование значением ошибки, длительности переходных процессов, противодействия возмущающим воздействиям и экстремальным (при ненормативном изменении угла атаки) ситуациям путем автоматического варьирования задаваемыми перегрузками.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титков О.С.* Беспилотные авиационные комплексы: новые технологии и применения // *Авиационные системы*. – 2015. – № 3. – С. 20-23.
2. *Сыров А.С., Пучков А.М., Рутковский В.Ю., Глумов В.М.* Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов // *Проблемы управления*. – 2014. – № 4. – С. 45-52.
3. *Попова И.В., Земсков А.В., Лестев А.М., Пестова К.С.* Алгоритмы управления планируемыми беспилотными летательными аппаратами “воздух-поверхность” // *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (16–19 июня 2014 г., Москва, ИПУ РАН)*. – М., 2014. – С. 3681-3688.
4. *Сыров А.С., Пучков А.М., Селезнев А., Глумов В.М.* Алгоритмы модернизированного координированного управления беспилотным летательным аппаратом // *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (16–19 июня 2014 г., Москва, ИПУ РАН)*. – М., 2014. – С. 3407-3416.
5. *Рутковский В.Ю., Глумов В.М., Суханов В.М.* Прецизионное управление нестационарными летательными аппаратами по углу крена // *Проблемы управления*. – 2011. – № 5. – С. 82-87.
6. *Пучков А.М., Карева Е.М., Глумов В.М.* Синтез и цифровая реализация адаптивного алгоритма управления летательным аппаратом // *Труды IX междунар. науч.-техн. конф. “Идентификация систем и задачи управления”*. – М., 2012. – С. 896-906.
7. *Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И.* Системы автоматического управления летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Жуковского. 1985. – 476 с.
8. *Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С.* Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.
9. *Ескин А.Ф.* Основы проектирования систем стабилизации высокоточных ракет Сухопутных войск / под общ. ред. В.Л. Солунина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 192 с.
10. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.
11. *Chai, H.-W.* Sliding Mode Control of PMSM Based On Robust Differentiator // 2010 2nd international Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, CINC 2010; Wuhan; China; September 13-14, 2010. – Vol. 1. – P. 37-40.
12. *Колесников А.А.* Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 196 с.

13. *Кравченко П.П.* Основы теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Цифровое управление, сжатие и параллельная обработка информации: монография. – Таганрог: ТРТИ, 1997. – 200 с.
14. *Кравченко П.П.* Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка. Теория и применение. – М.: Радиотехника, 2010. – 288 с.
15. *Кравченко П.П.* Синтез алгоритмов управления перевернутым маятником на тележке с использованием аппарата дельта-преобразований второго порядка // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 5 (134). – С. 6-15.
16. *Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш., Щербинин В.В.* Алгоритмические проблемы управления беспилотными летательными аппаратами, методология синтеза алгоритмов на основе дельта-преобразований второго порядка и принципов управления тележкой с перевернутым маятником // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 219-234.
17. *Кравченко П. П., Хусаинов Н. Ш., Щербинин В. В.* О методологии решения задачи управления летательным аппаратом на основе дельта-преобразований второго порядка и принципов управления тележкой с перевернутым маятником // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО “ЦНИИ “Электроприбор”, 2014. – С. 121-126.
18. *Куликов Л.И.* Синтез алгоритма управления полетом БПЛА самолетного типа на этапе посадки // Сборник материалов Десятой Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" и Шестой молодежной школы-семинара "Управление и обработка информации в технических системах". – Т. 1. – С. 34-46.
19. *Кравченко П.П.* Высокопроизводительные алгоритмы дельта-модуляции, оптимизированной по быстродействию и точности // Электросвязь. – 1989. – № 9. – С. 44-47.
20. *Павлов А.А.* Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию. – М.: Наука, 1966. – 390 с.

## REFERENCES

1. *Titkov O.S.* Bepilotnye aviatsionnye komplekсы: novye tekhnologii i primeneniya [Unmanned aircraft systems: new technologies and applications], *Aviatsionnye sistemy* [Aviation systems], 2015, Vol. 3, pp. 20-23.
2. *Syrov A.S., Puchkov A.M., Rutkowski V.Yu., Glumov V.M.* Zadachi upravleniya dvizheniem mnogorezhimnyh bepilotnyh letatel'nyh apparatov [Motion control tasks of multimode unmanned aerial vehicles], *Problemy upravleniya* [Control Problems], 2014, Vol. 4, pp. 45-52.
3. *Popov I.V., Zemskov A.V., Lestev A.M., Pestova K.S.* Algoritmy upravleniya planiruyushchimi bepilotnymi letatel'nymi apparatami "vozduh-poverhnost'" [Control algorithms of planners unmanned aerial vehicles "air-to-surface"], *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya* [In proceedings of the XII National Conference on Control] (16-19 June 2014, Moscow, Institute of Control Sciences). Moscow, 2014, pp. 3681-3688.
4. *Syrov A.S., Puchkov A.M., Seleznev A., Glumov V.M.* Algoritmy modernizirovannogo koordinirovannogo upravleniya bepilotnym letatel'nyim apparatom [Algorithms of modernized coordinated control unmanned aerial vehicle], *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya* [In proceedings of the XII National Conference on Control] (16-19 June 2014, Moscow, Institute of Control Sciences), 2014, pp. 3407-3416.
5. *Rutkowski V.Y., Glumov V.M., Sukhanov V.M.* Pretsizionnoe upravlenie nestatsionarnymi letatel'nymi apparatami po uglu krena [Precision control of non-stationary aircraft at an angle of heel], *Problemy upravleniya* [Control Problems], 2011, Vol. 5, pp. 82-87.
6. *Puchkov A.M., Kareva E.M., Glumov V.M.* Sintez i tsifrovaya realizatsiya adaptivnogo algoritma upravleniya letatel'nyim apparatom [Synthesis and digital implementation of the adaptive control algorithm of aircraft], *Trudy IX mezhdunar. yauchn.-tekhn. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya"* [In proceedings of IX International Scientific and Technical Conference "System Identification and Control Problems"], 2012, pp. 896-906.
7. *Krasovsky A.A., Vavilov U.A., Suchkov A.I.* Sistemy avtomaticheskogo upravleniya letatel'nyh apparatov [Systems of automatic control of aircraft]. Moscow: VVIA im. ZHukovskogo, 1985, 476 p.
8. *Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S.* Dinamika poleta bepilotnyh letatel'nyh apparatov: uchebnoe posobie dlya vuzov [The dynamics of unmanned aerial vehicles flight: teaching aid for university], 2nd ed., Moscow: Mashinostroenie, 1973, 616 p.

9. *Eskin A.F.* Osnovy proektirovaniya sistem stabilizatsii vysokotochnykh raket Sukhoputnykh voysk [Basis of design stabilization systems of high-precision missiles Ground Forces], under total. Ed. Solunina V.L. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2009, 192 p.
10. *Byushgens G.S., Studnev R.V.* Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie [The dynamics of the aircraft. The spatial movement], Moscow: Mashinostroenie, 1983, 320 p.
11. *Chai H.-W.* Sliding Mode Control of PMSM Based On Robust Differentiator, *In the 2nd international Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, CINC 2010, Wuhan; China; September 13-14, 2010*, Vol. 1, 2010, pp. 37-40.
12. *Kolesnikov A.A.* Novye nelinejnye metody upravleniya poletom [New nonlinear methods of flight control], Moscow: Fizmatlit, 2013, 196 p.
13. *Kravchenko P.P.* Osnovy teorii optimizirovannykh del'ta-preobrazovaniy vtorogo poryadka. Tsifrovoye upravlenie, szhatie i parallel'naya obrabotka informatsii: monografiya [Basic theory of optimized delta-transformations of the second order. Digital control, compression, and parallel processing of information: Monograph], Taganrog: TRTI, 1997, 200 p.
14. *Kravchenko P.P.* Optimizirovannye del'ta-preobrazovaniya vtorogo poryadka. Teoriya i primeneniye: monografiya [Optimized Delta-transformations of the second order. Theory and applications: monograph]. Moscow: Radiotekhnika, 2010, 288 p.
15. *Kravchenko P.P.* Sintez algoritmov upravleniya perevernutym mayatnikom na telezhke s ispol'zovaniem apparata del'ta-preobrazovaniy vtorogo poryadka [Synthesis of control algorithms inverted pendulum on a cart using delta-transformations of the second order], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2012, Vol. 5 (134), pp. 6-15.
16. *Kravchenko P.P., KHusainov N.SH., Shcherbinin V.V.* Algoritmicheskie problemy upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami, metodologiya sinteza algoritmov na osnove del'ta-preobrazovaniy vtorogo poryadka i principov upravleniya telezhkoy s perevernutym mayatnikom [Algorithmic problems of control unmanned aerial vehicles, the methodology of synthesis algorithms based on the second-order delta-transformations and principles of trolley control with the inverted pendulum], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, Vol. 3 (152), pp. 219-234.
17. *Kravchenko P.P., KHusainov N.SH., Shcherbinin V.V.* O metodologii resheniya zadachi upravleniya letatel'nym apparatom na osnove del'ta-preobrazovaniy vtorogo poryadka i printsipov upravleniya telezhkoy s perevernutym mayatnikom [About methodology of solving aircraft management tasks based on the second-order delta-transformations and principles of trolley control with the inverted pendulum], *XXI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [in St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg: OAO "CNII "Elektropribor", 2014, pp. 121-126.
18. *Kulikov L.I.* Sintez algoritma upravleniya poletom BPLA samoletnogo tipa na ehtape posadki [Synthesis algorithm UAV flight control of the aircraft type in the landing phase], *Sbornik materialov Desyatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i Shestoy molodezhnoy shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* [The collection of materials of the Tenth All-Russian scientific-practical conference "Perspective systems and control tasks" and six youth school-workshop "Control and information processing in technical systems"], Vol. 1, pp. 34-46.
19. *Kravchenko P.P.* Vysokoproizvoditel'nye algoritmy del'ta-modulyacii, optimizirovannoy po bystrodejstviyu i tochnosti [High performance delta modulation algorithms optimized for speed and accuracy], *Elektrosvyaz'* [electric communication], 1989, Vol. 9, pp. 44-47.
20. *Pavlov A.A.* Sintez releynykh sistem, optimal'nykh po bystrodeystviyu [Synthesis of relay systems, time optimal], Moscow: Nauka, 1966, 390 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Кравченко Павел Павлович** – Южный федеральный университет; e-mail: Pavelkravch@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634393545; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; д.т.н.; профессор.

**Хусайнов Наиль Шавкятович** – e-mail: naile.khussainov@gmail.com; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Щербинин Виктор Викторович** – "ЦНИИАГ", г. Москва; 127018, Москва, ул. Советской Армии, 5; тел.: 84956006317; д.т.н.; начальник научно-технического отделения.

**Kravchenko Pavel Pavlovich** – Southern Federal University; e-mail: Pavelkravch@gmail.com; 44, Nekrasovsky lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634393545; the department of software engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Khusainov Nail Shavkyatovich** – e-mail: naile.khussainov@gmail.com; the department of software engineering; head of department; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Scherbinin Victor Victorovich** – Central Research Institute of Automatics and Hydraulics; e-mail: mail\_dv@mail.com; 127018, Moscow, 5, Sovetskaya Army street, phone: +74956006317; dr. of eng. sc.; head of research department.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-172184

**В.Н. Казьмин****ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ SLAM  
В ТРЁХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ\***

*Предложен и рассмотрен подход к решению центральных для автономной робототехники задач определения координат подвижных роботизированных объектов и построения модели окружающего пространства по данным бортовой системы технического зрения, основанный на применении численного метода Монте-Карло для задачи локализации. Суть метода состоит в применении многочастичного фильтра для последовательного вычисления плотности распределения вероятностей, которая задаёт возможные положения робота в пространстве. Особенностью реализации метода является использование выделенных в дальнометрическом кадре плоскостей для измерения положения робота относительно карты, путём сопоставления их с уже имеющимися в базе данных и решения системы уравнений, построенной на параметрах найденных пар соответствующих друг другу плоскостей. При навигации, помимо геометрии пространства, используется яркостная раскраска выделенных плоскостей с целью повышения точности и разрешения геометрически неопределённых ситуаций. После определения положения робота найденные в кадре плоскости вносятся в базу данных с объединением и усреднением с уже имеющейся в ней информацией и используются для навигации в последующих циклах алгоритма. Приведены результаты работы созданных алгоритмов и программ, решающих поставленные задачи в темпе движения робота; осуществлена оценка ошибок и производительности. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований сделано заключение, что предлагаемый подход обеспечивает переход от больших объемов исходной информации к компактным описаниям внешней среды, содержащим навигационные данные, что позволяет эффективно решать задачи локализации и автономного управления движением мобильных роботов и беспилотных летательных аппаратов.*

*Мобильный робот; беспилотный летательный аппарат; система технического зрения; многочастичный фильтр; локализация; реконструкция модели окружающего пространства; метод Монте-Карло.*

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №16-29-04178 офи\_м.