

## Раздел VI. Навигация, наведение и связь

УДК 681.5.013; ББК 32.965

**П.П. Кравченко, Н.Ш. Хусайнов, В.В. Щербинин**

### **АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ, МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ ДЕЛЬТА-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА И ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕЖКОЙ С ПЕРЕВЕРНУТЫМ МАЯТНИКОМ**

*Анализируются алгоритмические проблемы системы управления высокоскоростными летательными аппаратами на экстремальных участках полета (посадка, заправка в движении и т.п.). Обращается внимание на высокую чувствительность системы к уровню достоверности линеаризованного математического описания, практическое отсутствие теоретических методов синтеза алгоритмов управления, представляющих возможности реализации оптимизированных по быстрдействию переходных процессов с большими перегрузками и достижением высокой точности. Имеют место проблемы обеспечения высокого запаса устойчивости, грубости при функционировании с интенсивными возмущающими воздействиями, оперативной перестройки траектории с использованием характеризующегося высокой вычислительной трудоемкостью математического и программного обеспечения, сложной инженерной реализации. Рассматривается методология синтеза, базирующаяся на использовании теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка и принципов управления тележкой с перевернутым маятником, представляющая возможности упрощения синтеза и качественного совершенствования процессов управления летательным аппаратом. Сущность решения задачи синтеза состоит в использовании одного управляющего воздействия для управления углом атаки (скольжения) и положением центра масс. Использование при синтезе теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка позволяет формировать оптимизированные по быстрдействию переходные и по точности установившиеся процессы. Приводятся результаты модельных экспериментов.*

*Беспилотный летательный аппарат; синтез; дельта-преобразования; перевернутый маятник; быстрдействие; ошибка; грубость.*

**P.P. Kravchenko, N.Sh. Khusainov, V.V. Scherbinin**

### **ALGORITHMIC PROBLEMS IN CONTROL OF AERIAL VEHICLES, METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS ALGORITHMS BASED ON DELTA-TRANSFORMATIONS OF THE SECOND ORDER AND PRINCIPLES OF CONTROL ON CART WITH INVERTED PENDULUM**

*The article analyzes the algorithmic problems of high-speed aircraft control at extreme phases of flight (landing, refueling on the move, etc.). Draws attention to the high sensitivity of the system to the level of reliability of the linearized mathematical description, lack of theoretical methods for the synthesis of control algorithms, representing feasibility optimized for speed transients with large congestion and achieving high accuracy. We have the problem of ensuring high safety factor, rudeness when operating with intense disturbing influences, operational restructuring trajectory characterized with high computational complexity of mathematical and software complex engineering implementation. We consider the synthesis methodology based on the theory of optimized delta transformations of the second order and management principles cart with inverted pendulum representing the possibility of simplifying the synthesis and qualitative improve-*

*ment of management processes aircraft . The essence of the solution of the synthesis problem is to use a control action to control the angle of attack (sip ) and the position of the center of mass . Use in the synthesis of theory optimized delta-transformations of the second order allows you to create optimized for speed and accuracy transitional established processes . The results of simulation experiments .*

*Unmanned aerial vehicle; synthesis; delta-transformations; inverted pendulum; response time; error; roughness.*

**Введение.** Разработка высокоточных систем управления высокоскоростными беспилотными летательными аппаратами (ЛА) связана с проблемами обеспечения устойчивости движения, интенсивного быстрогодействия и снижения динамических ошибок.

В основе наиболее широко известных методологий решения задачи синтеза алгоритмов управления беспилотными ЛА имеет место [1–9]:

- ◆ использование высоко детализированного и предельно соответствующего реальному объекту представления модели ЛА;
- ◆ линеаризация дифференциальных уравнений этой модели, синтез алгоритмов управления с обеспечением требуемых технических характеристик при малых отклонениях (метод малых возмущений) и движения по оперативно формируемой траектории.

Особенности данных методологий:

- ◆ система оказывается очень чувствительной к уровню достоверности (точности) математического описания ЛА; современные тенденции к повышению скорости ЛА и качественных характеристик процессов управления приводят к ужесточению требований к модели;
- ◆ уровень допустимых возмущающих воздействий оказывается низким, что ограничивает функциональные возможности ЛА и качественные характеристики системы управления;
- ◆ изменение в процессе полета нестационарных параметров, характеризующих объект, может приводить к необходимости перестройки алгоритмов управления;
- ◆ разработка алгоритмов управления с обеспечением достаточного запаса устойчивости осложняется, в частности, тем, что для высокоскоростных ЛА в сильной мере проявляется статическая неустойчивость;
- ◆ имеет место необходимость оперативной перестройки траектории с использованием характеризующегося высокой вычислительной трудоемкостью математического и программного обеспечения;
- ◆ в связи с существенной нелинейностью в описании объекта практически недопустимы возможности отработки больших отклонений, в частности, с оптимизацией по быстроддействию, проявлением предельно-допустимых перегрузок и малыми ошибками при выходе на заданную траекторию;
- ◆ отсутствуют теоретические предпосылки гарантированного обеспечения устойчивости и заданного качества регулирования по точности и быстроддействию;
- ◆ летательный аппарат относится к объектам, в которых центр тяжести и точка приложения силы не совпадают; данное обстоятельство накладывает фундаментальный проблемный отпечаток на возможности эффективно-го решения задачи управления ЛА.

В технической литературе вопросы синтеза алгоритмов управления для ЛА как нелинейной системы освещены, например, в [10, 11]. В работе [10] со ссылкой на [11], в частности, отмечается: “проблема остается в том, что предложенные методы не дают готового и интуитивно понятного инженеру инструмента для проектирования систем управления сложными многомерными объектами и многосвяз-

ными субъектами”. В наибольшей мере вопросы синтеза ЛА как нелинейной системы охвачены в работе [10]. Предлагаемая в данной работе теория базируется на асимптотическом характере процессов, отсутствуют теоретические предпосылки для оптимизации по быстродействию, гарантированного обеспечения запаса устойчивости, длительности переходных процессов с достижением высокой точности установившегося процесса, выбора отдельных параметров алгоритмов управления. Остаются неясными возможности синтеза при наличии возмущений, которые должны быть представлены в виде дифференциальных уравнений и не меняться в процессе управления, что на практике реализовать не представляется возможным. Принцип представления возмущений в виде дифференциальных уравнений в данной работе лежит и в основе решения вопроса робастности. Теория и формируемое алгоритмическое обеспечение в значительной мере сложны как инженерный инструмент.

В данной работе рассматриваются вопросы синтеза алгоритмов цифрового управления ЛА с обеспечением устойчивости, высоких технических характеристик по быстродействию и точности, снижения чувствительности к возмущающим воздействиям и требований к точности описания модели. Рассматриваемое решение базируется на методологии дельта-преобразований второго порядка и принципов управления тележкой с перевернутым маятником [12, 13]. Использование данной методологии позволяет подойти к реализации следующих возможностей:

- ◆ эффективное управление объектом с несовпадающими центром масс и центром давления воздушных масс, обеспечение управления двумя переменными с помощью одного управляющего воздействия;
- ◆ гарантированное обеспечение устойчивости в большом, в частности, в условиях проявления статической неустойчивости;
- ◆ формирование оптимизированных по быстродействию и точности переходных процессов отработки больших отклонений ошибки с учетом нелинейностей в описании объекта; благодаря этому, по крайней мере на экстремальных участках движения, может отпадать необходимость оперативно формировать в процессе полета новые траектории движения, при выходе на номинальную траекторию движение может реализовываться с большими перегрузками и соответственно с высокими динамическими характеристиками;
- ◆ варьирование уровнями перегрузки, обеспечивающими достаточный запас устойчивости и высокие качественные характеристики при изменении возмущающих воздействий;
- ◆ реализация адаптивной оптимизации по точности при изменении неконтролируемых возмущающих воздействий;
- ◆ благодаря грубости алгоритмов управления: упрощение требований по детализированному аналитическому описанию модели ЛА, к точности представления таблиц соответствия параметров и переменных;
- ◆ создание унифицированных устройств-регуляторов для определенных классов высокоскоростных ЛА.

Предлагаемая методология синтеза может представлять особый интерес при решении таких задач управления на экстремальных участках движения ЛА, как посадка, заправка топливом в процессе движения т.п., т.е. там, где возникает необходимость реализации быстропротекающего переходного процесса и обеспечения высокой точности установившегося процесса.

Целью работы является освещение предлагаемой методологии синтеза базовых алгоритмов управления ЛА.

**1. Постановка задачи.** Рассматриваемая методология синтеза базируется на использовании классических уравнений движения ЛА с использованием системы уравнений Эйлера, состоящей из трех уравнений для сил и трех уравнений для моментов в проекции на оси связанной системы координат (ССК) с описанием аэродинамических сил, уравнений моментов, формул расчета углов атаки и скольжения, уравнений связи координат в земной системе с проекциями скорости на оси ССК и углами ориентации ЛА [1–9].

Данная детализированная система уравнений использовалась для имитации поведения ЛА в модели, а также являлась основой для проведения синтеза. По каналу крена используются алгоритмы, базирующиеся на более простой немаятниковой методологии с использованием дельта-преобразований второго порядка [12].

При синтезе используется существенно упрощенное 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. Данные упрощения в рамках освещения предлагаемой методологии приводят к проявлению *неконтролируемых постоянно действующих возмущающих воздействий*.

В рамках решения рассматриваемой задачи излагаются алгоритмические основы синтеза базовых алгоритмов управления и некоторые результаты модельных экспериментов, демонстрирующие возможность получения высоких качественных характеристик при отмеченных выше постоянно действующих возмущающих воздействиях.

**2. Физическая и алгоритмическая сущность решения задачи.** Предлагаемая методология решения задачи управления высокоскоростным статически неустойчивым ЛА ориентирована на обеспечение исходно заданных (или формируемых в процессе управления) значений *модулей перегрузок по действию сил и вторых производных угла атаки (скольжения) по действию моментов*. Данная ориентация позволяет решать вопросы гарантированного обеспечения устойчивости и качественных характеристик оптимизированных по быстродействию и точности процессов, грубости алгоритмов. Достаточная устойчивость и грубость обеспечиваются путем исходного задания (или в процессе адаптации) преобладающих значений упомянутых модулей по отношению к действующим неконтролируемым (условно приводимым к перегрузкам) значениям возмущений.

В связи с отмеченным выше возникает необходимость осуществлять управление с помощью *одного управляющего воздействия*:

- ◆ процессом установления расчетного угла атаки (скольжения) с обеспечением постоянства модуля второй производной этого угла;
- ◆ положением центра масс ЛА с обеспечением определенных перегрузок действия сил.

В отмеченном выше и состоит сходство рассматриваемой задачи с задачей управления *одним управляющим воздействием* положениями тележки и перевернутого маятника.

Сущность решения задачи управления тележкой с перевернутым маятником можно проиллюстрировать в виде действий человека, удерживающего палку на пальце руки. В идеальном случае человек после вывода палки на вертикаль в начале направленного движения обеспечивает небольшой наклон палки относительно вертикали в направлении движения (*разгон движения*), а в некоторый момент времени при приближении к конечной точке – наклон в сторону, противоположную движению (*торможение*). Реально при движении человека (движением тела и руки) осуществляются многократные процессы *разгона/торможения* [12, 13].

Применительно к управлению ЛА и с учетом использования дельта-преобразований второго порядка сущность решения данной задачи состоит в следующем. В рамках действующего алгоритма по каналу высоты (бокового отклонения) обеспечивается на каждом текущем дискретном шаге расчет модуля угла атаки (скольжения), обеспечивающего заданную перегрузку, и знака этого угла, соответствующего обеспечению оптимизации по быстродействию переходного и минимизации ошибки установившегося процессов. Формируется и действует по формированию данного угла и ошибки положения центра тяжести одно управляющее воздействие. Перегрузки реализуются с учетом заданных ограничений по углам атаки (скольжения) и управляющих воздействий.

Формирование выражений, характеризующих величину и знак угла, а также значение управляющего воздействия, базируется на вытекающих из описания модели соотношениях, на использовании формируемых с помощью алгоритмов дельта-преобразований значений квантов преобразования и ограничениях по перегрузкам, пределам изменения управляющих воздействий и углов.

Благодаря грубости алгоритмов представляется возможным использовать для синтеза существенно упрощенные описания ЛА по сравнению с "точной" (исходной) моделью: сохранять только те описательные компоненты с учетом их нелинейностей, которые оказывают преобладающее влияние в соответствующих уравнениях движения. В основе описания компонент аэродинамических коэффициентов и моментов исходной модели могут использоваться сложные аналитические соотношения и таблицы взаимосвязей переменных и параметров. Процесс упрощения этих описаний и переход к приближенным интерполяционным представлениям может представлять непростую задачу; корректность проводимых упрощений и принятых для синтеза описаний необходимо оценивать при проведении экспериментов с точки зрения обеспечения ожидаемых (требуемых) качественных характеристик процессов управления.

**3. 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. Многие годы проблема неустойчивости известных алгоритмов дельта-преобразований второго порядка существенно ограничивала их практическое использование. В основе решения проблемы обеспечения оптимизированных по быстродействию и точности процессов при действии возмущений используются принципы минимаксного критерия оптимальности и наихудших воздействий. Впервые алгоритмы оптимизированных по быстродействию и точности дельта-преобразований второго порядка разработаны одним из авторов данной работы [14]. Основы теории и возможности практического использования новых алгоритмов в областях цифрового управления, компрессии и защиты сигналов от несанкционированного доступа, алгоритмизации для параллельных специализированных вычислительных средств, построения сплайнов для компьютерной графики освещены, например, в работах [12, 15–17].

В качестве ближайшего аналога данных алгоритмов можно рассматривать классические алгоритмы оптимального непрерывного управления объектом в виде двух последовательных интегрирующих звеньев [18]. Характерной особенностью алгоритмов дельта-преобразований, как и алгоритмов аналога, является наличие прогнозирующей (переключающей) функции, на основе которой осуществляется определение знака кванта преобразования. Внешне фазовый портрет в обоих случаях имеет один и тот же характер.

На рис. 1 приводится пример, иллюстрирующий характер формирования аппроксимирующей функции с некоторыми начальными условиями для линейной функции. На каждом дискретном шаге протяженного интервала обеспечивается постоянство задаваемого модуля второй производной аппроксимирующей функции (кванта преобразования). Знак второй производной кванта на каждом шаге формируется с использованием алгоритма дельта-преобразования; при этом обеспечивается оптимизация по быстродействию без перерегулирования в переходном процессе и по точности в установившемся на основе использования одного алгоритма. Из рассмотрения данного рисунка по поведению аппроксимирующей функции нетрудно увидеть аналогию с некоторым управляемым движением, характеризующимся постоянством модуля второй производной (перегрузки) координаты состояния (координаты положения объекта, угла атаки/скользяния); при этом функционирование алгоритма с прогнозирующей функцией можно рассматривать как некоторую *упрощенную реализацию терминального управления* (решение краевой задачи по быстродействию и точности).

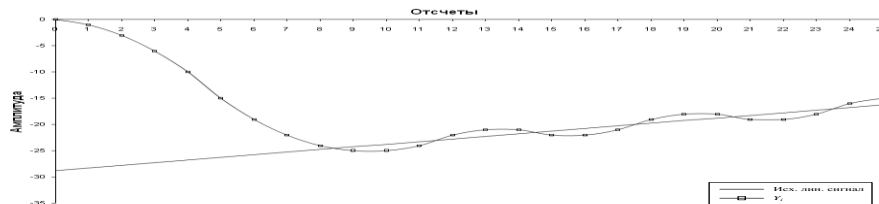


Рис. 1. Переходный и установившийся процессы оптимизированного дельта-преобразования второго порядка при обработке линейной функции

Алгоритмы дельта-преобразования второго порядка применительно к рассматриваемой задаче для двух переменных ( $j = \overline{1,2}$ ) можно представить в следующем виде [12, 13]:

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

Здесь  $i$  – номер временного шага преобразования,  $\nabla t$  – шаг временной дискретизации,  $x_{ji}$  – значение текущей преобразуемой переменной,  $y_{\text{зад},ji}$  – текущее задающее значение переменной,  $\hat{z}_{ji}$  – ошибка,  $F_{ji}^1$  и  $F_{ji}^2$  – прогнозирующие функции,  $\Delta_{j,i+1}$  – формируемый знак кванта преобразования  $\ddot{Y}_{j,i+1}$ . Значения  $\Delta_{j,i+1} \in \{+1; 0; -1\}$  определяют режимы разгон/0/торможение при  $j = 1$  обработки ошибки  $\hat{z}_{1,i}$  и при  $j = 2$  – обработки ошибки  $\hat{z}_{2,i}$ .

При отсутствии внешних возмущений (обработка ступенчатой или линейно изменяющейся функции) процессы дельта-преобразований характеризуются следующими *гарантированными* показателями [12]:

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

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

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

$$R_{nep} \approx 2\sqrt{\frac{|z(t_0)|}{c^*}}, \quad T_{nep} \approx R_{nep} \nabla t \text{ или } T_{nep} \approx 2\sqrt{\frac{|z(t_0)|}{|\ddot{Y}|}}. \quad (3)$$

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

Сущность методологии синтеза алгоритмов управления состоит в том, что формируется процесс управления, эквивалентный процессу оптимизированного Д-преобразования второго порядка. Особенностью применения Д-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 обеспечением гарантированных показателей качества при допустимых возмущающих воздействиях.

В рамках рассматриваемой методологии синтеза алгоритмов управления 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 реальных показателей, по значению наиболее близких к предельным.

В работах [12, 15] освещены, в частности, следующие возможности, обусловленные применением алгоритмов дельта-преобразований второго порядка для синтеза алгоритмов управления: *единая простая инженерная методика синтеза алгоритмов цифрового управления (с дискретным шагом) для линейных и нелинейных объектов*; оптимизация в условиях априорно задаваемых показателей качества по быстродействию и точности; получение гарантированных показателей качества на конечных интервалах; оптимизация по точности с адаптацией к неконтролируемым произвольным по характеру изменения внешним возмущающим воздействиям; оперирование с постоянно изменяющимися задающими воздействиями; грубость алгоритмов; синтез алгоритмов управления для систем с частичной структурной и параметрической неопределенностями; управление объектом, уравнения движения которого содержат ограниченные нестационарные параметры; перспективность использования для подвижных объектов в экстремальных условиях и некоторые другие.

#### 4. Методология синтеза алгоритмов цифрового управления (на примере канала управления по высоте)

**4.1. Приведение исходных уравнений движения к виду для синтеза алгоритмов управления по высоте.** В рамках данной работы для синтеза используется следующий вариант представления уравнений движения по каналу управления высотой, сформированный на основе исходного описания модели и с учетом вводимых упрощений:

$$\dot{V}_{y1} = \frac{Y_{a2}}{m} - g \cos \vartheta ; \quad (4)$$

$$\ddot{y}_g = \dot{V}_{y_g} = \dot{V}_{y_1} \cos \vartheta; \quad (5)$$

$$\hat{z}_{y_g} = y_g - y_{g,зад};$$

$$\ddot{\hat{z}}_{y_g} = \ddot{y}_g - \ddot{y}_{y_g,зад}; \quad (6)$$

$$\ddot{\alpha} = \dot{\omega}_{z_1} = \frac{M_{z_1}}{J_{z_1}} + \omega_{x_1} \omega_{y_1}; \quad (7)$$

$$\hat{z}_\alpha = \alpha - \alpha_{зад};$$

$$\ddot{\hat{z}}_\alpha = \ddot{\alpha} - \ddot{\alpha}_{зад}, \quad \ddot{\alpha}_{зад} = 0, \quad \dot{\alpha}_{зад} = 0. \quad (8)$$

В приведенных выражениях:  $m$  – масса ЛА;  $g$  – ускорение свободного падения;  $V_{y_1}$  – проекция скорости  $V$  на нормальную ось ССК;  $V = \sqrt{V_{y_1}^2 + V_{z_1}^2 + V_{x_1}^2}$ ;  $Y_{aэ}$  – аэродинамическая нормальная сила в ССК;  $\vartheta$  – угол тангажа;  $\omega_{x_1}$ ,  $\omega_{y_1}$ ,  $\omega_{z_1}$  – угловые скорости вращения осей связанной ССК относительно осей земной системы координат;  $J_{z_1}$  – момент инерции ЛА относительно поперечной оси в СК;  $M_{z_1}$  – аэродинамический момент тангажа по поперечной оси ССК;  $V_{y_g}$ ,  $y_{y_g}$  и  $y_{g,зад}$  – текущие значения скорости, координаты и задающего воздействия по высоте в земной системе координат;  $\hat{z}_{y_g}$  – текущая ошибка по высоте,  $\alpha$  – угол атаки;  $\alpha_{зад}$  – текущее значение задающего воздействия по углу атаки,  $\hat{z}_\alpha$  – текущая ошибка по углу атаки. В рамках данной работы задающая траектория представляется в виде зафиксированной в вертикальной плоскости земной системы координат наклонной прямой с программным углом наклона  $\theta_{np}$ .

Предполагается, что измеряемыми или вычисляемыми в процессе движения являются величины: скорости ЛА в ССК, углы ориентации ЛА, угловые скорости вращения осей ССК и их производные, углы направления осей ЛА относительно вектора скорости, пространственные координаты ЛА в земной СК.

**4.2. Особенности описания аэродинамических сил ( $Y_{aэ}$ ).** Аэродинамический коэффициент  $C_y$  силы  $Y_{aэ} = C_y q S$  рассматривался с использованием таблицы как функция от значений угла атаки и числа Маха ( $q$  – скоростной напор,  $S$  – характерная площадь). В рамках синтеза осуществляется формирование нормированных по соответствующим значениям угла атаки табличных значений  $C_y^\alpha$ , характеризующих вес приходящегося на единицу угла атаки коэффициента  $C_y$  [7]. Затем формируется приближенное интерполяционное представление нормированной положительной величины  $C_y^\alpha$ . Для синтезируемых алгоритмов значение  $C_y^\alpha$  было существенно округлено относительно значений, вытекающих из принятых для исходной модели таблиц, и приближенно принято равным положительной постоянной величине. Выражение для  $Y_{aэ}$  принимает вид [7]:

$$Y_{aэ} = \alpha \cdot C_y^\alpha \cdot q \cdot S. \quad (9)$$

В рамках данной работы следует различать смысл обозначений аэродинамической силы  $Y_{aэ}$  и квантов  $\ddot{Y}$  в дельта-преобразованиях второго порядка.



**4.3. Особенности описания аэродинамических моментов ( $M_{z1}$ ).** В исходных уравнениях движения момент тангажа включает составляющие: момента тангажа от корпуса ЛА (влияние смещения точки давления воздушных масс относительно центра масс), момента тангажа от рулей ЛА, момента тангажа от демпфирования.

В рамках синтеза учитывается только составляющая моментов от рулей:

$$M_{z_p} = -C_{y_M} \cdot (l_1 - X_{цм}) \cdot q \cdot S.$$

Принимаемое для использования в исходной модели представление аэродинамического коэффициента  $C_{y_M}$  включает аналитические выражения и таблицы в функции от величины управляющего воздействия ( $\delta_e$ ), числа Маха ( $M$ ), угла атаки. В рамках синтеза осуществляется нормирование табличных значений  $C_{y_M}$  по соответствующим значениям управляющего воздействия при равном нулю угле атаки. Затем формируется на основе нескольких интервалов возможного изменения  $M$  приближенное интерполяционное представление нормированной положительной величины  $C_{y_M}^\delta$ . Выражение для  $M_{z1}$  принимает вид

$$M_{z1} = -\delta_e C_{y_M}^\delta (M) \cdot (l_1 - X_{цм}) \cdot q \cdot S.$$

С учетом (7) имеем

$$\ddot{\alpha} = -\frac{\delta_e \cdot C_{y_M}^\delta (M) \cdot q \cdot S \cdot (l_1 - X_{цм})}{J_{z1}} + \omega_{y1} \omega_{x1}. \quad (10)$$

**4.4. Формирование управляющего воздействия.** В уравнение (10) в соответствии с методологией дельта-преобразований второго порядка вводим для  $(i+1)$ -го шага постоянный на шаге квант преобразования  $\ddot{Y}_{\alpha,i+1}$  и обозначение номера шага дополнительной дискретизации  $\sigma = \overline{1; r}$ , где  $r$  – количество шагов дополнительной дискретизации:

$$\ddot{Y}_{\alpha,i+1} = -\frac{\delta_{e,i+1,\sigma} \cdot C_{y_M}^\delta (M_{i+1,\sigma}) \cdot q_{i+1,\sigma} \cdot S \cdot (l_1 - X_{цм})}{J_{z1}} + \omega_{y1,i+1,\sigma} \omega_{x1,i+1,\sigma},$$

откуда следует выражение для управляющего воздействия:

$$\delta_{e,i+1,\sigma} = -\frac{(\ddot{Y}_{\alpha,i+1} - \omega_{y1,i+1,\sigma} \omega_{x1,i+1,\sigma}) \cdot J_{z1}}{C_{y_M}^\delta (M_{i+1,\sigma}) \cdot q_{i+1,\sigma} \cdot S \cdot (l_1 - X_{цм})}. \quad (11)$$

Уравнение (8) принимает вид исходного для дельта-преобразований:

$$\ddot{z}_{\alpha,i+1}(t) = \ddot{Y}_{\alpha,i+1} - \ddot{y}_{\alpha,\text{зад},i+1}(t); \quad \ddot{Y}_{\alpha,i+1} = \ddot{Y}_{\alpha,i+1}(t) = \text{const} \text{ на } t \in [t_i; t_{i+1}]; \quad i = \overline{0, N-1}.$$

**4.5. Формирование выражения для расчета задаваемого текущего угла атаки.** Для координаты состояния  $y_g$  (4, 5) с учетом выражения для  $Y_{a\sigma}$  (9) имеем

$$\ddot{y}_g = \left( \frac{\alpha \cdot C_y^\alpha \cdot q \cdot S}{m} - g \cdot \cos \vartheta \right) \cdot \cos \vartheta. \quad (12)$$

Вводим постоянные на шаге  $(i+1)$  кванты преобразования, определяющие в рамках алгоритма перегрузку по  $y_1$

$$\ddot{Y}_{y_1,i+1} = \ddot{y}_1(t) = \dot{V}_{y_1}(t); \quad t \in [t_i; t_{i+1}]$$

и соответствующую по  $y_g$

$$\ddot{Y}_{y_g, i+1} = \ddot{y}_g(t) = \dot{V}_{y_g}(t); \quad t \in [t_i; t_{i+1}]$$

Теперь можем записать для  $(i+1)$ -го шага

$$\ddot{Y}_{y_g, i+1} = \left( \frac{\alpha_{i+1} \cdot C_y^\alpha \cdot q_i \cdot S}{m} - g \cdot \cos \mathcal{G}_i \right) \cdot \cos \mathcal{G}_i,$$

откуда получаем выражение для определения задающего значения угла атаки  $\alpha_{зад, i+1}$  при заданной перегрузке  $\ddot{Y}_{y_1, i+1}$  (для рассматриваемого в рамках данной работы движения по задающей (программной) наклонной с углом  $\theta_{np}$  прямой принимаем  $\mathcal{G}_i = \theta_{np}$ )

$$\alpha_{зад, i+1} = \frac{m \cdot (\ddot{Y}_{y_1, i+1} + g \cdot \cos \theta_{np})}{C_y^\alpha \cdot q_i \cdot S}$$

или перегрузке  $\ddot{Y}_{y_g, i+1}$

$$\alpha_{зад, i+1} = \frac{m \cdot (\ddot{Y}_{y_g, i+1} + g \cdot \cos^2 \theta_{np})}{C_y^\alpha \cdot q_i \cdot S \cdot \cos \theta_{np}}. \quad (13)$$

Уравнение (6) принимает вид исходного для дельта-преобразований:

$$\ddot{\tilde{z}}_{y_g, i+1} = \ddot{Y}_{y_g, i+1} - \ddot{y}_{y_g, зад, i+1}; \quad \ddot{Y}_{y_g, i+1} = \ddot{Y}_{y_g, i+1}(t) = const \text{ на } t \in [t_i; t_{i+1}]; \quad i = \overline{0, N}.$$

**4.6. Оценка текущей максимально допустимой перегрузки и определение параметра  $C_{y_g, i+1}^*$ .** Пусть заданы для некоторого текущего интервала управления:

- ♦ уровень перегрузки по действию сил ( $n_y$  характеризует предельно допустимую перегрузку): в связанной системе координат  $|\ddot{Y}_{y_1, nep}| = |\dot{V}_{y_1, nep}| = n_y g$ ; соответственно, в земной системе координат для случая движения ЛА по программной траектории в виде прямой с наклоном  $\theta_{np}$  принимаем  $|\ddot{Y}_{y_g, nep}| = |\dot{V}_{y_g, nep}| = n_y g \cos \theta_{np}$ ;
- ♦ максимально допустимое значение угла атаки  $|\alpha|_{\max, доп}$ .

Текущая перегрузка определяется или заданной перегрузкой  $|\dot{V}_{y_1, nep}|$ , или перегрузкой, ограничиваемой допустимым углом атаки  $|\alpha|_{\max, доп}$ . Для  $|\alpha|_{\max, доп}$  получаем на основе (12) соответствующую оценку максимально допустимой перегрузки  $|\ddot{Y}_{y_1, i+1}|_{\max, \alpha}$

$$|\ddot{Y}_{y_1, i+1}|_{\max, \alpha} = \frac{|\alpha|_{\max, доп} C_y^\alpha q_i S}{m} - g \cos \theta_{np},$$

и  $|\ddot{Y}_{y_g, i+1}|_{\max, \alpha}$

$$\left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right|_{\max, \alpha} = \left| \ddot{Y}_{y_1, i+1} \right|_{\max, \alpha} \cos \theta_{np}.$$

Здесь всегда  $g \cos \theta_{np} > 0$ , а также должны выполняться соотношения для корректного определения  $\left| \ddot{Y}_{y_1, i+1} \right|_{\max, \alpha}$ .

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

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

определяем  $c_{y_g, i+1}^*$  в виде

$$c_{y_g, i+1}^* = \left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right| \nabla t^2. \quad (14)$$

Здесь: если  $\left| \ddot{Y}_{y_1, i+1} \right|_{\max, \alpha} < \left| \ddot{Y}_{y_1, nep} \right|$ , то  $\left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right| = \left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right|_{\max, \alpha}$ , иначе

$$\left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right| = \left| \ddot{Y}_{y_g, nep} \right|.$$

Возможны другие варианты приближенного задания  $\left| \ddot{Y}_{y_1, i+1} \right|_{\max, \alpha}$  и  $\left| \ddot{Y}_{y_g, i+1} \right|_{\max, \alpha}$  в виде "постоянной" величины.

**4.7. Оценка текущей максимально допустимой второй производной угла атаки и определение параметра  $c_{\alpha, i}^*$ .** Пусть заданы для некоторого текущего интервала управления по действию момента:

- ♦ уровень максимально допустимой (предельной) второй производной угла атаки  $\left| \ddot{Y}_{\alpha, nep} \right| = \left| \ddot{\alpha}_{nep} \right| = \left| \dot{\omega}_{z1, nep} \right| \leq L_{\alpha}; L_{\alpha} > 0;$
- ♦ максимально допустимое значение управляющего воздействия  $\left| \delta_{\epsilon} \right|_{\max, don}.$

Таким образом, по текущему действию момента имеют место ограничения: уровень максимально допустимой (предельной) второй производной угла атаки  $\left| \ddot{\alpha}_{nep} \right|$  или ограничения для второй производной угла атаки, вносимые допустимым значением управляющего воздействия  $\left| \delta_{\epsilon} \right|_{\max, don}.$

Для заданного  $\left| \delta_{\epsilon} \right|_{\max, don}$ , используя (10), вводим оценку максимально допустимого кванта преобразования  $\left| \ddot{Y}_{\alpha, i+1} \right|_{\max, \delta}$

$$\left| \ddot{Y}_{\alpha, i+1} \right|_{\max, \delta} = \left| \ddot{\alpha}_i \right|_{\max, \delta} = \frac{\left| \delta_{\epsilon} \right|_{\max, don} \cdot C_{y_M}^{\delta}(M_i) \cdot q_i \cdot S \cdot (t_1 - X_{цм})}{J_{z1}}.$$

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

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

на основе приведенных выше соотношений определяем

$$c_{\alpha,i+1}^* = \left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right| \nabla t^2. \quad (15)$$

Здесь: если  $\left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right|_{\max,\delta} < \left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1,перед} \right|$ , то  $\left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right| = \left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right|_{\max,\delta}$ , иначе  $\left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right| = \left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1,перед} \right|$ .

Возможны другие варианты приближенного задания  $\left| \ddot{Y}_{\alpha,i+1} \right|_{\max,\delta}$  в виде "постоянной" величины.

**4.8. Базовые алгоритмы управления с использованием дельта-преобразований второго порядка и принципов управления тележкой с перевернутым маятником.** Приводимый ниже "базовый" алгоритм отражает основные процедурные компоненты на  $i$ -м шаге, нацеленные на формирование значения угла атаки и управляющего воздействия для  $(i+1)$ -го шага, и может рассматриваться как основа для алгоритмического развития возможностей обеспечения необходимых качественных и функциональных характеристик процессов управления.

**а) Определение  $\alpha_{зад,i+1}$ .**

Исходно задано:  $y_{зад,y_g,0}; \dot{y}_{зад,y_g,0}; \nabla t; \left| \ddot{Y}_{y1,неп} \right| = n_y g; ; \left| \alpha \right|_{\max}; \theta_{np}$ .

Порядок вычислений:

♦ определение  $c_{y_g,i+1}^*$  (14),  $c_1^* = c_{y_g,i+1}^*$ ;

♦ определение на основе (1) при  $j=1$  значения  $\ddot{Y}_{y_g,i+1}$  ( $x_{1,i} = y_{y_g,i}$ ;  
 $y_{зад,1,i} = y_{зад,y_g,i}$ );

♦ определение  $\alpha_{зад,i+1}$  (13).

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

Исходно задано:  $\left| \ddot{Y}_{\alpha,перед} \right| = L_\alpha; \left| \delta \right|_{\max,дон}; \dot{\alpha}_{зад,i+1} = 0;$

Порядок вычислений:

♦♦ определение  $c_{\alpha,i+1}^*$  (15),  $c_2^* = c_{\alpha,i+1}^*$ ;

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

♦ - определение  $\delta_{\theta,i+1,\sigma}$  (11).

**5. Результаты модельных экспериментов.** Ниже приводятся некоторые результаты экспериментов при исходных данных: скорость  $V(t_0) = 1200$  м/с; высота  $H(t_0) = 10000$  м; отклонение от траектории по высоте  $\hat{z}_{y_g,0} = -200$  м; боковое отклонение  $\hat{z}_{z_g,0} = 500$  м; начальная перегрузка по осям ССК  $n(t_0) = 9$ , второй производной угла атаки (скольжения)  $L(t_0) = 17,5$  град/с<sup>2</sup>; масса ЛА  $m = 5000$  кг; угол тангажа  $\vartheta(t_0) = \theta_{np}$ ; угол рыскания  $\psi(t_0) = 0$ ; угол крена  $\gamma(t_0) = 0$ . На рис. 2 представлены графики временных диаграмм: на рис. 2,а – ошибки  $\hat{z}_{y_g}(t)$  и  $\hat{z}_{z_g}(t)$ ; на рис. 2,б – ошибки  $\hat{z}_{y_g}(t)$  и  $\hat{z}_{z_g}(t)$  в увеличенном масштабе; на рис. 2,в – угол

скольжения  $\beta(t)$ ; на рис. 2,г – поведение  $\ddot{Y}_{z_g}(t)$ ; на рис. 2,д – управляющее воздействие по боковому направлению  $\delta_n(t)$ . С помощью одного управляющего воздействия  $\delta_n(t)$  осуществляется представленное на графиках управление углом скольжения  $\beta(t)$  и ошибкой бокового отклонения  $\hat{z}_{z_g}(t)$ .

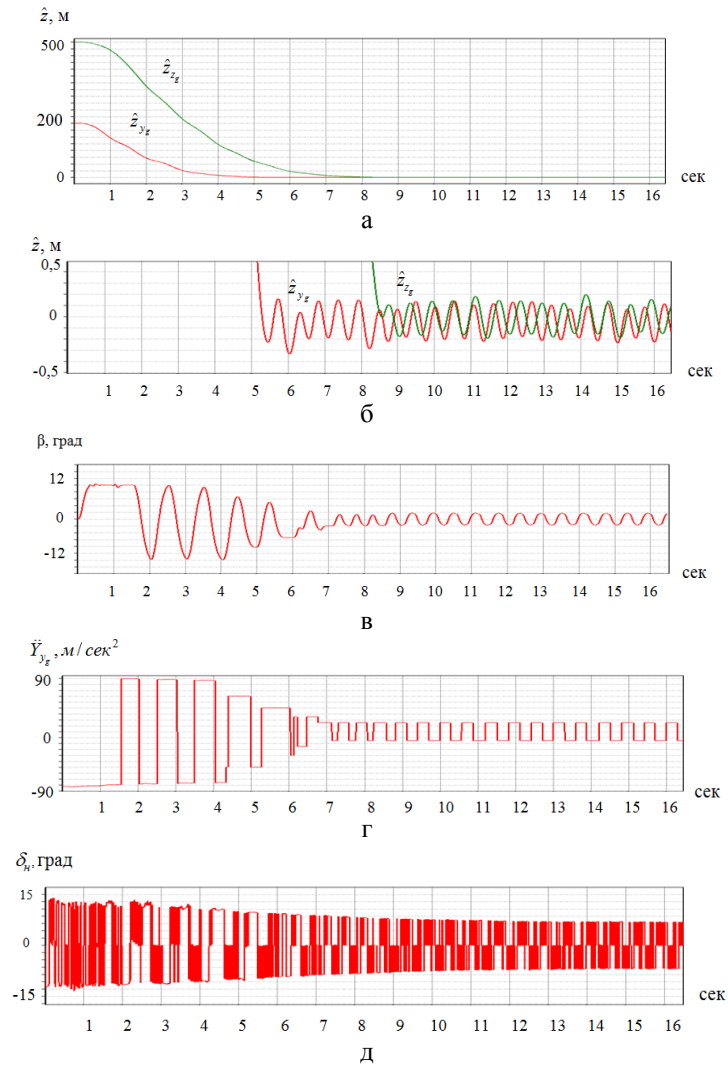


Рис. 2. Временные диаграммы процессов управления

**Закключение.** Теоретические положения и результаты экспериментов, некоторые из которых нашли отражение в данной работе, позволяют сделать следующие заключения:

- ♦ предлагаемая методология синтеза алгоритмов управления беспилотным летательным аппаратом характеризуется существенной простотой с точки зрения инженерной реализации;

- ◆ при многократно превосходящих скорость звука скоростях, наличии влияния на аэродинамические моменты смещения точки давления воздушных масс относительно центра масс и действии других неконтролируемых возмущений процессы управления характеризовались устойчивостью на уровне обеспечения определенных (гарантированного характера) показателей качества по точности и быстродействию; данный фактор создает предпосылки для успешного функционирования системы управления в условиях действия неконтролируемых внешних возмущений другой природы;
- ◆ стабильность функционирования по устойчивости и качественным характеристикам обеспечивается действующим достаточным уровнем модулей перегрузок относительно неконтролируемых возмущающих воздействий; данная особенность представляет, в частности, основания для несложного решения вопросов адаптивной оптимизации по точности и быстродействию в процессе управления;
- ◆ переходные процессы по длительности увеличиваются в  $\sim 1,7$  раза относительно предельной оценки (3) при начальной в момент времени  $t_0$  перегрузке, что обуславливается, в частности, необходимостью снижения перегрузки при вхождении в установившийся процесс;
- ◆ максимальная ошибка установившегося процесса составила  $\sim 0,2$  м; возможность достижения такого высокого уровня по точности подтверждает свойство грубости предлагаемой методологии в условиях действия неконтролируемых возмущающих воздействий;
- ◆ возможно управляемое регулирование значением ошибки путем соответствующего варьирования перегрузками;
- ◆ приведенные на рис. 2 графики характерны для широкого диапазона значений  $\theta_{np}$ ;
- ◆ важной особенностью реализуемых переходных процессов является то, что они не являются асимптотическими; в установившемся процессе имеют место ограниченные по максимальному значению колебания ошибки;
- ◆ решение задачи совершенствования качественных характеристик (расширение диапазона скоростей, действующих перегрузок, качества переходных процессов отработки больших ошибок, интенсивности возмущающих воздействий и т.п.) может быть связано с необходимостью использования для синтеза более полного представления исходных уравнений движения;
- ◆ использование предлагаемой методологии позволяет при необходимости и в рамках допустимых возможностей формировать определенные качественные характеристики путем оперативной перестройки параметров алгоритмов управления с использованием несложных адаптивных процедур, в частности табличных методов.

Одной из особенностей предлагаемой методологии является импульсный с изменяющейся амплитудой характер управляющих воздействий. В общем случае при использовании ограничиваемых по скорости перемещения рулевых устройств могут возникать трудности практической реализации. В связи с отмеченным перспективный интерес представляет ориентация на рулевые устройства амплитудно-импульсного типа. В то же время интерес представляет также развитие данной методологии с ориентацией на обеспечение алгоритмически гарантированной ограниченной скорости перемещения рулевых устройств.

Рассмотренные в данной работе возможности не следует рассматривать как вариант для некоторой определенной практической реализации: на теоретическом и экспериментальном уровнях демонстрируются возможности решения важных

алгоритмических проблем управления беспилотным ЛА, что может трансформироваться при дальнейшем развитии в реальные практические применения. Предлагаемая методология может представлять интерес для синтеза алгоритмов управления различными типами беспилотных летательных аппаратов на экстремальных участках полета (при решении задач посадки, заправки ЛА в движении и т.п.).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лебедев А.А., Карабанов В.А.* Динамика полета беспилотных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972.
2. *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.
3. *Гурский Б.Г., Люцанов М.А., Спириин Э.П., Ескин А.Ф., Зимин А.В., Ковальчук С.А., Павельев В.А., Свечарник В.Д., Солунин В.Л., Трубкин Я.А.* Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск / Под ред. В.Л. Солунина. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 328 с.
4. *Аэродинамика ракет: в 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. М. Хемша, Дж. Нилсена.* – М.: Мир, 1989. – 426 с.
5. *Абгарян К.А., Рапопорт И.М.* Динамика ракет. – М.: Машиностроение, 1969.
6. *Колесов Б.С., Ескин А.Ф., Спириин Э.П. и др.* Высокоточное инерциальное управление на всей траектории твердотопливными тактическими ракетами без отсечки тяги. – М.: ЦНИИ информации, 1985.
7. *Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С.* Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.
8. *Лысенко Л.Н.* Наведение и навигация баллистических ракет: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 672 с.
9. *Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н.* Внешняя баллистика: Учебник для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.
10. *Колесников А.А.* Новые нелинейные методы управления полетом. – М.: Физматлит, 2013. – 196 с.
11. *Kokotovic P.V., Arcak M.* Constructive Nonlinear Control: progress in the 90'S // Prepr. 14<sup>th</sup> IFAC World Congress. – Beijing, China, 1999. – P. 49-77.
12. *Кравченко П.П.* Оптимизированные дельта-преобразования второго порядка. Теория и применение. – М.: Радиотехника, 2010. – 288 с.
13. *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.
14. *Кравченко П.П.* Высокопроизводительные алгоритмы дельта-модуляции, оптимизированной по быстродействию и точности // Электросвязь. – 1989. – № 9. – С. 44-47.
15. *Кравченко П.П.* Основы теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Цифровое управление, сжатие и параллельная обработка информации: Монография. – Таганрог: ТРТИ, 1997. – 200 с.
16. *Кравченко П.П.* Синтез алгоритмов цифрового управления на основе оптимизированных дельта-преобразований второго порядка при недостаточной информированности о системе // Материалы Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления, SICPRO-2000» ИПУ. – М., 2000. – С. 92.
17. *Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш.* Синтез алгоритмов цифрового управления на основе оптимизированных дельта-преобразований второго порядка с фильтрацией координат и ускоренной адаптацией к внешним возмущениям // Труды V Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления SICPRO-2006». – М., 2006. – С. 2259-2280.
18. *Павлов А.А.* Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию. – М.: Наука, 1966. – 390 с.

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

**Кравченко Павел Павлович** – Южный федеральный университет; e-mail: kravchenkopp@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634314945; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; д.т.н.; профессор.

**Хусайнов Наиль Шавкятovich** – e-mail: khusainov@sfedu.ru; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

**Щербинин Виктор Викторович** – "ЦНИИАГ", г. Москва; e-mail: mail\_dv@mail.com; 127018, Москва, ул. Советской армии, 5; тел.: 84956006317; д.т.н.; начальник научно-технического отделения.

**Kravchenko Pavel Pavlovich** – Southern Federal University; e-mail: kravchenkopp@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634314945; the department of software engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Khusainov Nail' Shavkyatovich** – e-mail: khusainov@sfedu.ru; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

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

УДК 681.518.3

**В.В. Щербинин, А.В. Связов, С.В. Смирнов, Г.А. Кветкин**

### **АВТОНОМНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ И ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Статья посвящена навигационному комплексу на основе автономной системы ближней радионавигации. Комплекс обеспечивает точное определение местоположения объекта при отсутствии сигналов спутниковых радионавигационных систем. Принцип работы автономной системы ближней радионавигации заключается в одновременном измерении дальностей от подвижного объекта до нескольких опорных навигационных устройств с известными координатами. Дальномерная аппаратура включает бортовой радиоэлектронный модуль и комплект неподвижных модулей (радиомаяков). При обработке измеренных дальностей в вычислителе навигационного комплекса определяются координаты подвижного объекта. В зависимости от типа подвижного объекта состав навигационного комплекса дополнительно включает бесплатформенную инерциальную навигационную систему на микромеханических элементах, барометрический и лазерный (для летательных аппаратов) высотомеры. Основными достоинствами предлагаемого комплекса являются автономность, помехозащищенность и высокий темп измерений. В статье рассматриваются предварительные процедуры рекогносцировки местности для рационального размещения радиомаяков, калибровки дальномерной аппаратуры, а также схемы и алгоритмы комплексирования навигационной информации от различных систем. Приводятся результаты натурных испытаний макетного образца, на основании которых делается вывод об удовлетворительной точности навигационного комплекса без использования спутниковых радионавигационных систем.*

*Автономная навигация; система ближней радионавигации; комплексирование информации.*