

В. В. Евстифеев, М. В. Палкин

УПРАВЛЕНИЕ КРЕНОМ АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрена идеология построения системы высокоточного наведения на основе связки баллистического неуправляемого реактивного снаряда с управляющим модулем дооснащения, стабилизируемым по углу крена. Стабилизацию угла крена обеспечивает система ориентирования на основе информации от головки самонаведения. Предложены методы анализа изображения, получаемого с головки самонаведения, и алгоритмы определения параметров крена управляющего модуля на различных участках траектории полета летательного аппарата. Представлена процедура синтеза системы ориентирования. Приведены результаты исследования работы системы ориентирования.

В настоящее время разработки систем высокоточного наведения с точки зрения критерия “эффективность–стоимость” подошли к своеобразной “точке бифуркации”, за которой просматриваются следующие направления развития.

Первое направление предполагает разработку сложных и дорогостоящих систем, предназначенных для решения поставленной задачи с высокой вероятностью. Второе — связано с разработкой менее сложных систем с ограниченными возможностями по применению, характеризующихся относительно невысокой стоимостью и возможностью массового производства. Это направление и рассмотрено в настоящей работе.

Характерный пример реализации второго направления — это создание управляемого реактивного снаряда (УРС) на базе баллистического неуправляемого реактивного снаряда, дополненного специализированным носовым блоком — управляющим модулем дооснащения (УМД), рис. 1.

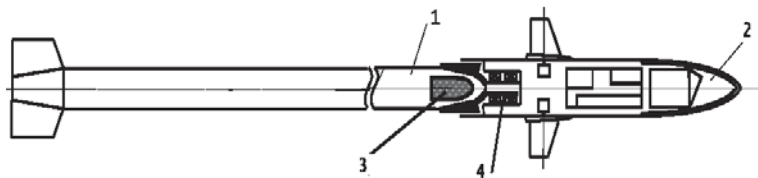


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема УРС:

1 — серийный неуправляемый реактивный снаряд; 2 — управляющий модуль дооснащения; 3 — полезная нагрузка; 4 — цилиндрический шарнир

Управляемые реактивные снаряды, снаряженные полезной нагрузкой, могут использоваться для дистанционного тушения горящих нефтяных скважин, лесных пожаров; для доставки полезных грузов в труднодоступные участки местности, точечного инициирования схода снежных лавин и выполнения других задач.

УМД оснащен головкой самонаведения (ГСН) с матричным приемником планово-перспективного визирования видимого или ИК-диапазона спектра, жестко соединенным с корпусом УМД; бортовым вычислительным комплексом (БВК); аэродинамическими органами управления УРС [1].

Между собой реактивный снаряд и УМД соединены с помощью цилиндрического шарнира, ось вращения которого совпадает с продольной осью снаряда. Такое соединение позволяет “развязать” по каналу крена УМД и вращающийся относительно продольной оси снаряд и осуществлять стабилизацию угла крена УМД, необходимую для устойчивого визирования ГСН области расположения цели при самонаведении.

В качестве измерителя угла крена УМД используется ГСН. БВК на основе получаемых от ГСН кадров с изображением внешних ориентиров производит расчет параметров крена УМД и формирует управляющие команды на рулевые приводы для стабилизации УМД по крену.

При старте УРС происходит “закрутка” УМД по крену. Стабилизацию угла крена УМД осуществляет система ориентирования, производящая ликвидацию параметров начальной “закрутки” УМД — начальных угловой скорости и угла крена УМД (режим ориентации) и поддержание достигнутого значения угла крена УМД (режим стабилизации).

Система ориентирования производит ориентацию УМД по изображению неба и земли с последующей стабилизацией — по ориентирам подстилающей поверхности/приповерхностного воздушного слоя (озерам, отдельным лесопосадкам, зданиям, метеообразованиям и т.п.). В условиях естественных или искусственных помех и пересеченного рельефа местности определение параметров крена УМД является сложной задачей, требующей получения двумерного изображения внешней среды и применения нетривиальных алгоритмов анализа изображения, получаемого с ГСН.

Алгоритм ориентации УМД построен на основе разностно-яркостного метода, производящего поиск областей неба и земли на основе различия их яркостных характеристик. Использование изображений неба и земли обладает по сравнению с другими типами ориентиров преимуществами: информационной достаточностью и инвариантностью к изменению масштаба и к повороту изображения на кадрах ГСН.

Модуль угла крена УМД $|\gamma|$ при одновременном визировании областей неба и земли широкоугольным матричным приемником ГСН, на котором строки размещены перпендикулярно, а столбцы — параллельно вертикальной плоскости связанной системы координат УМД, определяют по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\gamma| = \arctg \left| \frac{j_{\text{H}} - j_3}{i_{\text{H}} - i_3} \right|, \quad \text{при } i_{\text{H}} < i_3, \\ |\gamma| = 180^\circ - \arctg \left| \frac{j_{\text{H}} - j_3}{i_{\text{H}} - i_3} \right|, \quad \text{при } i_{\text{H}} > i_3, \\ i_3 = \frac{\sum_{k=1}^{n_3} i_{3k}}{n_3}; \quad j_3 = \frac{\sum_{k=1}^{n_3} j_{3k}}{n_3}; \\ i_{\text{H}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{H}}} i_{\text{H}k}}{n_{\text{H}}}; \quad j_{\text{H}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{H}}} j_{\text{H}k}}{n_{\text{H}}}, \end{array} \right.$$

где n_3 — количество элементов области земли; n_{H} — количество элементов области неба; i_{3k} , j_{3k} — соответственно номера строки и столбца k -го пиксела области земли; $i_{\text{H}k}$, $j_{\text{H}k}$ — соответственно номера строки и столбца k -го пиксела области неба; i_3 , j_3 — соответственно номера строки и столбца центра “тяжести” области земли; i_{H} , j_{H} — соответственно номера строки и столбца центра “тяжести” области неба. Нумерация строк производится против принятого направления оси Oy_1 связанной системы координат УМД, нумерация столбцов — слева направо.

Знак угла крена определяется по знаку выражения $(j_{\text{H}} - j_3)$; модуль скорости крена по формуле $\omega_\gamma = |\dot{\gamma}|$.

Процедура поиска областей неба и земли алгоритма ориентации УМД ведется на основе методов гистограммного и морфологического анализа изображения [2]. На рис. 2 приведена циклограмма работы системы ориентирования.

При предстартовой подготовке УРС в БВК поступает информация об угле места пусковой установки, метеоусловиях (в автоматизированном или автоматическом режимах от внешних или бортовых датчиков). БВК на основе принятой информации производит: 1) расчет по стандартным формулам основных параметров траектории полета УРС как функций времени — скорости, высоты, дальности, изменения угла тангажа УРС в процессе полета; 2) определение на основе рассчитанных параметров траектории полета УРС характерных моментов времени работы системы ориентирования: прогнозируемого времени появления в поле обзора ГСН линии горизонта — $t_{\text{Г}}$, времени перехода системы ориентирования в режим ориентации — $t_{\text{оп}}$, времени начала самонаведения УРС — $t_{\text{сн}}$.

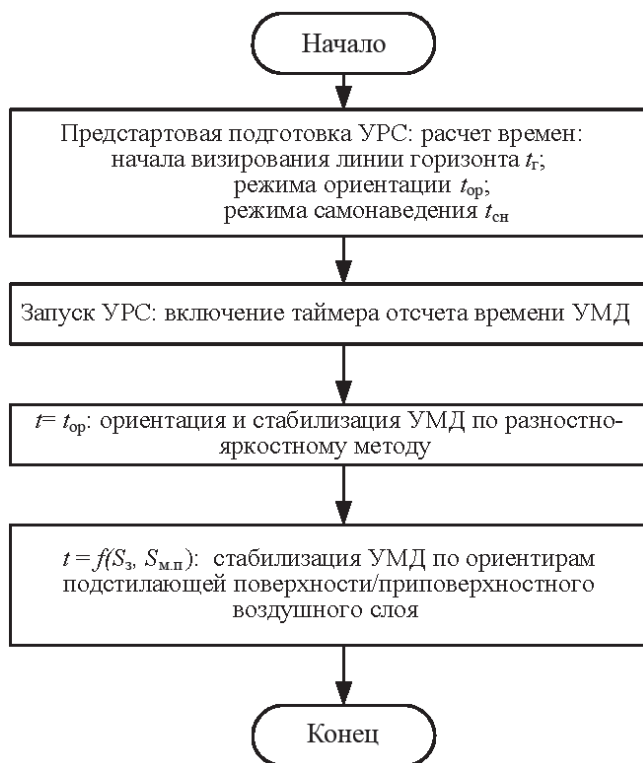


Рис. 2. Циклограмма работы системы ориентирования

Величина t_r определяется по условию

$$\vartheta_{\text{УМД}}(t_r) - \beta_N = 0,$$

где $\vartheta_{\text{УМД}}(t_r)$ — угол тангажа УРС в момент t_r ; β_N — величина угла обзора ГСН в вертикальной плоскости относительно продольной оси УРС.

Значение t_{op} рассчитывается по формуле

$$t_{op} = t_r - \Delta,$$

где Δ — расчетный интервал времени определения ГСН яркости неба, определяется в зависимости от аэродинамических характеристик канала крена УРС и вычислительных возможностей БВК.

Величину $t_{сн}$ определяют, исходя из паспортных характеристик ГСН.

При старте УРС в БВК запускается таймер отсчета времени. Под действием спиральной направляющей пусковой трубы происходит “закрутка” УРС. Возмущающий крутящий момент через подшипники передается на УМД. При полете УРС до момента t_{op} полет происходит без стабилизации угла крена УМД. В момент t_{op} БВК выдает команду на включение ГСН и начало ориентации УМД.

В процессе ориентации возможны два варианта событий.

1. При обнаружении ориентиров до момента $t_{\text{сн}}$ производится раскрытие дифференциальных рулей. По разностно-яркостному методу осуществляется ликвидация “закрутки” УМД и стабилизация угла крена УМД. При движении УРС по нисходящей части траектории площадь земли на матричном приемнике будет все время увеличиваться и постепенно “вытеснять” область неба. Поэтому при стабилизации УМД на каждом получаемом с ГСН кадре производится проверка превышения площади области земли S_3 определенной части площади матричного приемника $S_{\text{м.п}}$:

$$S_3 \geq \eta S_{\text{м.п}}, \quad (1)$$

где η — коэффициент пропорциональности, принимается равным 0,8.

С момента выполнения приведенного неравенства (1) система ориентирования осуществляет стабилизацию угла крена УМД по ориентирам подстилающей поверхности/приповерхностного воздушного слоя.

2. При необнаружении ориентиров до момента времени $t_{\text{сн}}$ раскрытия рулей УМД не происходит. До момента падения УРС летит по неуправляемой баллистической траектории.

В основу работы алгоритма стабилизации угла крена по ориентирам подстилающей поверхности/приповерхностного воздушного слоя заложена гипотеза отсутствия крена УМД при движении УРС без бокового сноса при плано-перспективном визировании ориентиров подстилающей поверхности/приповерхностного воздушного слоя широкоугольным матричным приемником ГСН, на котором строки размещают перпендикулярно, а столбцы — параллельно вертикальной плоскости связанной системы координат УМД, определяется фактом перемещения геометрического центра “тяжести” ориентиров за весь промежуток времени их наблюдения только по соответствующим этим ориентирам столбцам [3].

На основе гипотезы реализован итерационный процесс расчета угла крена УМД путем определения взаимного смещения ориентиров поверхности земли на текущем и на эталонном кадрах. Эталонным является кадр, получаемый в момент окончания работы системы ориентации [2]. При этом изменение угла крена ($\Delta\gamma_{\text{ср}}$) за промежуток времени между двумя кадрами, полученными в моменты времени t_i и t_j ($t_j > t_i$), определяют по выражению

$$\begin{cases} \Delta\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{s=1}^n \Delta\gamma_{i,j}^s}{n}, \\ \Delta\gamma_{i,j}^s = k k_{\alpha,s} (\Delta t_j - \Delta t_i), \quad k = \frac{\beta_G}{n_{\text{м.п}}}, \end{cases}$$

где $\Delta\gamma_{i,j}^s$ — изменение угла крена УМД, определенное на основе ориентира с номером s ; n — общее количество ориентиров; Δ_{ti} — номер столбца ориентира с номером s в момент времени t_i ; Δ_{tj} — номер столбца ориентира с номером s в момент времени t_j ; k — технологический коэффициент, определяющий соотношение между величиной угла крена и перемещением по столбцам изображения визируемого ориентира на матричном приемнике; β_G — угол обзора ГСН в боковой плоскости; $n_{м.п}$ — количество столбцов матричного приемника ГСН; $k_{\alpha,s}$ — коэффициент номера строки ориентира, определяющий положение ориентира относительно оси вращения Ox_1 УМД.

Угловую скорость крена определяют по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{сп}}{t_j - t_i}.$$

В качестве ориентиров при работе алгоритма стабилизации УМД могут выбираться любые оптически различимые элементы поверхности/приповерхностного воздушного слоя с постоянной и случайной формой, например, облачность, дым, пламя, целеподобные объекты, выделяемые по “энергетическим” или “геометрическим” признакам. Как показали исследования, наиболее стабильным элементом у объектов со случайной формой является геометрический центр (центр “тяжести”) объекта — яркостного пятна. Достоинством выбора этого ориентира является и относительная быстрота обработки получаемого с ГСН изображения. Поэтому исследования процедуры анализа изображения по ориентирам подстилающей поверхности целесообразно проводить, используя пятна яркости. При выборе ориентиров на эталонном изображении и их локализации на последующих кадрах применяются структурные методы анализа изображения [2].

Исследование процедур анализа получаемого с ГСН изображения при ориентации и стабилизации УМД проводилось путем полунатурного моделирования с применением созданной в среде Matlab программы-имитатора работы указанных процедур с использованием кадров, полученных оптической ГСН в различных условиях прозрачности и освещенности атмосферы, при разных типах ландшафта местности (рис. 3).

В качестве основных показателей, характеризующих эффективность процедур анализа изображения при работе алгоритмов ориентации и стабилизации УМД, приняты надежность правильного определения ориентиров и точность определения угла крена УМД.

Исследования надежности алгоритма ориентации выявили зависимость вероятности сбоев и отказов алгоритма от величины области поиска ориентира “земля” на плоскости матричного приемника. Поэтому необходимо вводить ограничение области поиска ориентира “земля”,

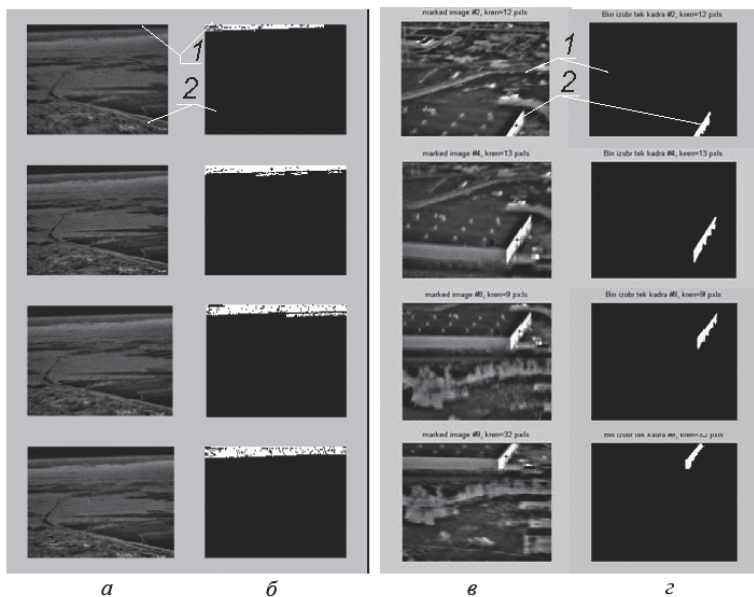


Рис. 3. Работа процедур анализа изображения в алгоритмах ориентации по областям неба и земли (*а, б*) и алгоритма стабилизации по яркостным пятнам подстилающей поверхности (*в, г*):

а — кадры с оптической ГСН ИК-диапазона; *б* — преобразованные в результате обработки кадры с найденными областями неба (1) и земли (2); *в* — кадры с оптической ГСН видимого диапазона; *г* — преобразованные в результате обработки кадры с выбранным на поверхности земли (1) ориентиром (2)

что позволяет снизить вероятность отказов алгоритма ориентации до приемлемого значения 0,08. Границы сектора поиска ориентира на плоскости кадра определяют по формулам:

$$\gamma_2^{\max} = \gamma_1 + 360 \cdot \frac{f_{\max}}{f_{\text{ГСН}}} k_s^{\max},$$

$$\gamma_2^{\min} = \gamma_1 + 360 \cdot \frac{f_{\max}}{f_{\text{ГСН}}} k_s^{\min},$$

где γ_1 [град] — угол поворота центра “тяжести” ориентира относительно вертикальной оси Oy_1 на первом кадре; γ_2^{\max} , γ_2^{\min} [град] — соответственно максимальная и минимальная границы сектора кадра, в котором должен находиться ориентир на последующем кадре; f_{\max} , Гц — максимальная частота закрутки УМД по крену; $f_{\text{ГСН}}$, Гц — частота обработки в БВК кадров ГСН; k_s^{\max} , k_s^{\min} — коэффициенты, расширяющие сектор поиска ориентира из-за естественной флуктуации угловой скорости вращения УМД. Максимальные значения k_s^{\max} , k_s^{\min} , принимаемые для режима ориентации УМД, составляют $k_s^{\max} \approx 1,2$, $k_s^{\min} \approx 0,8$.

Исследования надежности алгоритма стабилизации выявили зависимость вероятности сбоев и отказов от количества и поперечных

размеров используемых ориентиров. Наиболее устойчивым к сбоям является ориентир — компактное пятно, занимающее 5...15% столбцов матричного приемника. Пятна с меньшим поперечным размером обладают меньшей стабильностью при воздействии шума или при изменении ракурса визирования ГСН. Более крупные пятна-ориентиры при изменении ракурса визирования ГСН имеют “склонность” распалиться на неоднородные участки, что снижает вероятность их корректной локализации. Исследования показали возможность стабилизации УМД по крену по одному ориентиру, особенно на нисходящих крутых участках траектории, по ярким точечным ориентирам типа “горящий объект”. Однако из-за непрерывной смены и перемасштабирования изображения при движении УРС по баллистической траектории наилучшим признано использование 2...5 ориентиров (зафиксированная вероятность отказа соответственно 20...3%). Использование большего количества ориентиров является затруднительным, поскольку приводит к уменьшению расстояния между ориентирами на изображении, что понижает вероятность их нахождения на последующих кадрах.

Точность определения угла крена УМД алгоритмом ориентации определяется суммарной ошибкой $\varepsilon_\gamma = \sum(\varepsilon_\omega, \varepsilon_n, \varepsilon_J)$, где ε_n — случайная ошибка от флуктуационных шумов матричного приемника; ε_J — случайная ошибка от засветки матричного приемника, размытости или кривизны линии разделения областей ориентиров; ε_ω — систематическая переменная по величине, ошибка определения угла крена, вызванная начальной “закруткой” УМД. Значение ε_ω зависит от угла поворота УМД по крену за время экспозиции ГСН, определяемого соотношением частоты получения кадров с ГСН и частоты вращения УМД в момент получения кадра.

В процессе ликвидации “закрутки” УМД точность определения угла крена УМД повышается ($\varepsilon_\omega \rightarrow 0$), достигая значений $\varepsilon_\gamma = 1...2$ град. При этом основной и критичной к точности ориентации УМД является случайная ошибка от засветки матричного приемника, размытости или кривизны линии разделения областей ориентиров (ε_J), способная в наихудших ситуациях превысить максимально допустимое значение.

Исследования алгоритма стабилизации показали, что ошибка определения угла крена $\varepsilon_{ст}$ может быть определена по формуле

$$\varepsilon_{ст} = \frac{\beta_G n_0}{2n_{м.п}}, \quad (2)$$

где n_0 — среднее количество столбцов у группы одновременно используемых ориентиров.

Согласно формуле (2), при использовании ГСН с углом обзора $\beta_G = 20^\circ$ ошибка определения угла крена УМД по ориентиру, за-

нимающему до $\approx 3\%$ столбцов матричного приемника, составляет $\varepsilon_{ст} \approx 0,5$ град; по ориентиру, занимающему до $\approx 12\%$ столбцов матричного приемника, составляет $\varepsilon_{ст} \approx 1,2$ град.

Использование алгоритма стабилизации УМД относительно больших ориентиров ландшафта (процент занимаемых столбцов матричного приемника больше 15%) повышает вероятность нахождения на них локально неоднородных по параметрам участков, что при изменении ракурса визирования ГСН может привести к неполному захвату ориентира и увеличению ошибки определения угла крена УМД.

Функциональная схема системы ориентирования приведена на рис. 4.

Сигнал с выхода формирователя изображения ГСН — матрично-приемника — поступает в микроконтроллер ГСН, преобразующий аналоговый сигнал в цифровой. Оцифрованный сигнал заносится в оперативно-запоминающее устройство (ОЗУ сцен) БВК для последующей обработки. Процессор изображений (ПИ) является центральным узлом БВК и выполняет необходимые вычислительные и управляющие функции: производит обработку изображения на кадре с ГСН, расчет величины текущих параметров крена — угла и угловой скорости, формирование управляющих сигналов. Хранение обработанных изображений осуществляется в специальном банке промежуточных данных. Управляющие сигналы с процессора изображений после преобразования в ЦАП в аналоговый вид поступают на исполнительные устройства системы ориентирования — рулевые приводы (РП).

Анализ современной элементной базы систем управления свидетельствует о большом ее разнообразии для аппаратной реализации системы ориентирования УМД. Возможности представленной на рынке

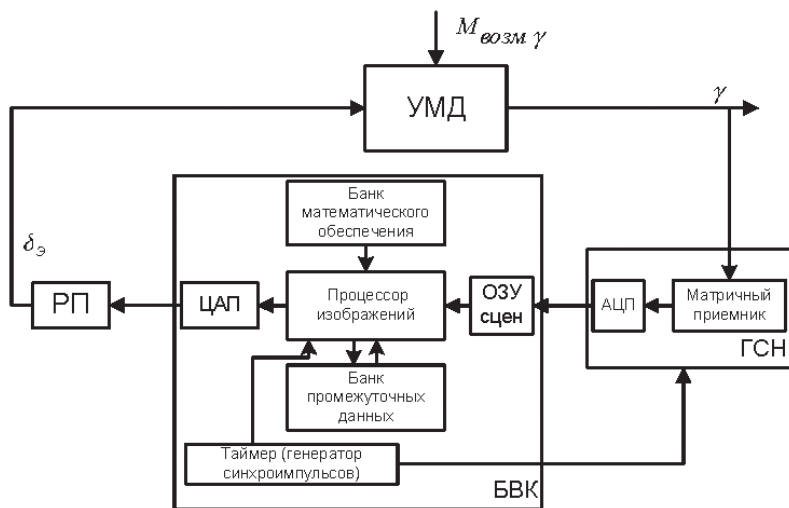


Рис. 4. Функциональная схема системы ориентирования УМД

микропроцессорной техники, в том числе и отечественного производства, для построения БВК, а также относительная простота разработанных алгоритмов системы ориентирования позволяют проводить обработку полученных с ГСН изображений с частотой не менее 100 Гц.

УРС является маломаневренным летательным аппаратом. Поэтому в качестве рулевого привода в УМД целесообразно использовать рулевой привод без искусственной обратной связи. Такой рулевой привод управляет положением органов управления пропорционально величине управляющего сигнала и обратно пропорционально величине шарнирного момента [4], что обеспечивает инвариантность коэффициента передачи системы ориентирования по отношению к режимам полета УРС.

С учетом покадрового получения от ГСН информации система ориентирования является дискретной и имеет структурную схему, приведенную на рис. 5. БВК на схеме рис. 5 представлен в виде трех элементов: дискретного корректирующего устройства ($D(s)$), вырабатывающего управляющий сигнал на основе информации, поступающей из импульсного элемента, имитирующего работу ГСН (реализация в корректирующем устройстве ПД-закона управления, обеспечивающего требуемые статические и динамические характеристики системы ориентирования УМД, связана с возможностью получения значений угла и угловой скорости крена при покадровом получении информации с ГСН и известном интервале времени T_P между кадрами); запаздывающего звена с передаточной функцией $W(s) = e^{-s\tau_1}$, в которой величина времени запаздывания τ_1 соответствует времени, затрачиваемому БВК на выполнение процедур обработки одного кадра с ГСН и определения текущих значений параметров крена УМД; ЦАП, представленного в виде передаточной функции экстраполятора нулевого порядка.

Процедура синтеза корректирующего устройства системы ориентирования состояла из следующих этапов.

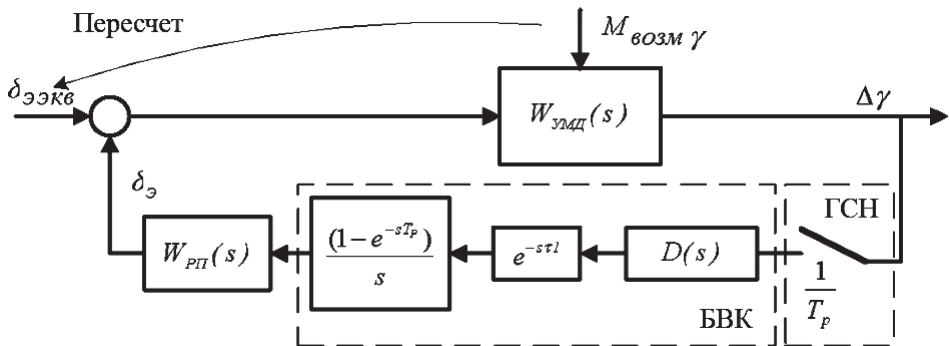


Рис. 5. Структурная схема системы ориентирования

1. Предварительный выбор для упрощенной модели УМД параметров корректирующего устройства путем построения и анализа областей устойчивости относительно параметров корректирующего устройства для наиболее “тяжелых” режимов полета УРС. При упрощении модели системы ориентирования УМД исходная дискретно-непрерывная система была сведена к непрерывной системе с запаздыванием [5]; время запаздывания соответствует значению τ_1 .

2. Уточнение параметров корректирующего устройства с использованием ЛЧХ системы ориентирования УМД по углу крена для оценки степени устойчивости и качества системы.

3. Окончательный выбор параметров корректирующего устройства при исследовании системы ориентирования УМД путем математического моделирования.

Моделирование системы ориентирования УМД в режимах ориентации и стабилизации проводилось на нестационарной дискретно-непрерывной модели системы (рис. 6), построенной в среде Mathlab Simulink на основе структурной схемы рис. 5. При этом в модель рулевого привода было включено нелинейное звено, соответствующее физическому ограничению углов поворота рулей УМД максимальными значениями $\delta_3^{\max} = \pm 18$ град в режиме ориентации и $\delta_3^{\max} = \pm 8$ град в режиме стабилизации. Для описания объекта управления были использованы программные блоки, допускающие установку начальных значений параметров крена УМД: $\dot{\gamma}_{\max} = 180$ рад/с, $\gamma_{\max} = 180$ град.

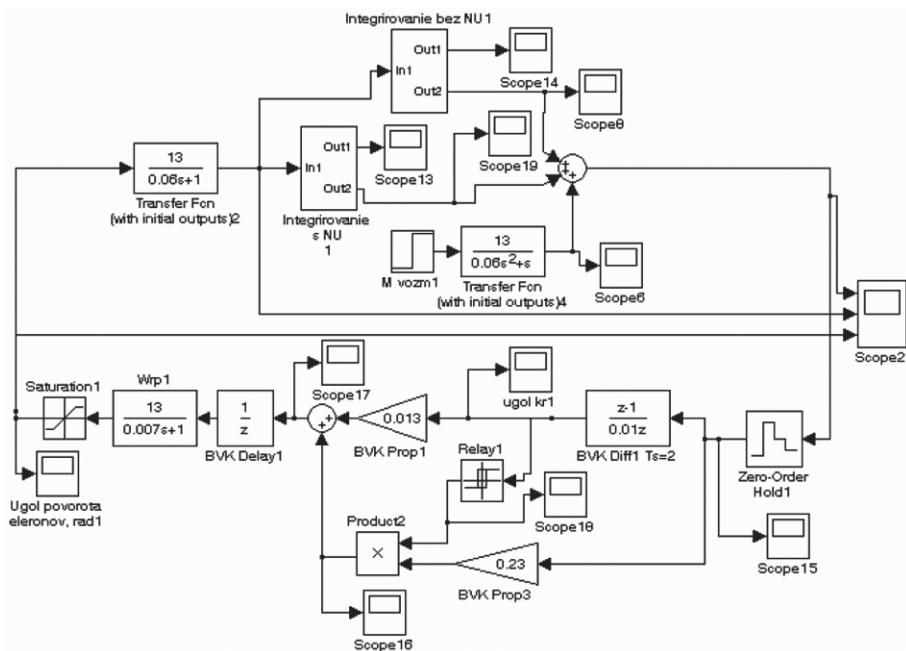


Рис. 6. Дискретно-непрерывная модель системы ориентирования

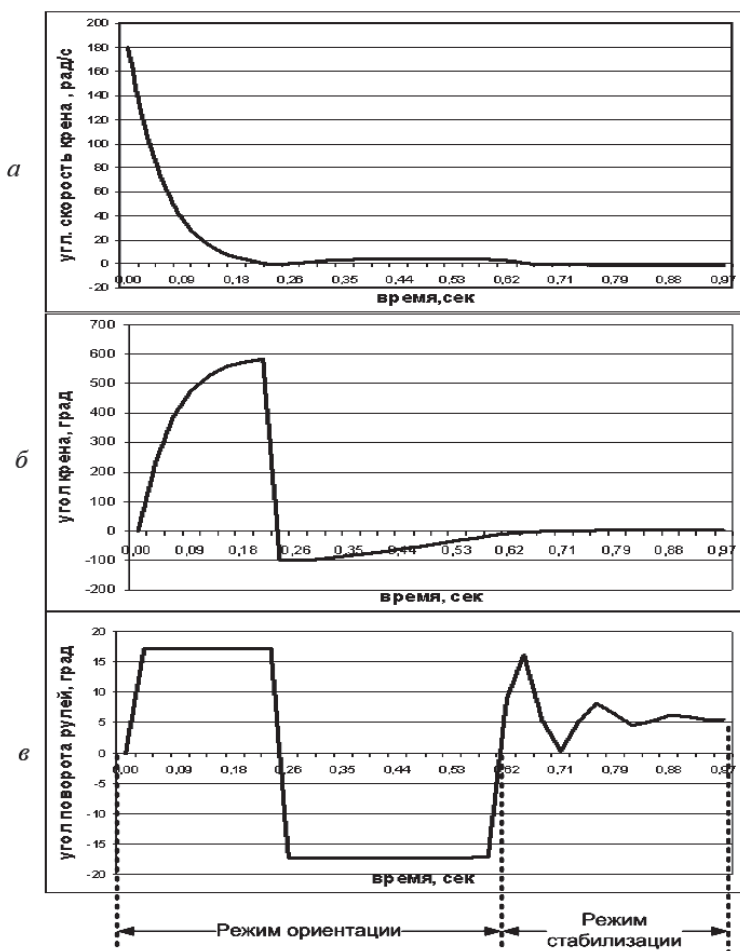


Рис. 7. Переходные процессы в системе ориентирования:

a – изменение угловой скорости крена, рад/с; *б* – изменение угла крена, град; *в* – переходный процесс по углу поворота рулей, град

Нестационарность модели объекта и рулевого привода была получена путем изменения соответствующих параметров для исследуемых траекторий полета УРС.

Результаты математического моделирования системы ориентирования УМД для одного из режимов полета УРС (высота полета $H \approx 5$ км; скорость полета $V \approx 300$ м/с; $\dot{\gamma}_{\max} = 180$ рад/с, $\gamma_{\max} = 180$ град) показаны на рис. 7. На рис. 7, *a* и *б* приведены соответственно процессы изменения угловой скорости крена и угла крена УМД при работе системы ориентирования. На рис. 7, *в* показан переходный процесс отработки рулями УМД управляющего сигнала системы ориентирования. Как видно из рис. 7, *a*, ликвидация начальной угловой скорости вращения УМД происходит за $\sim 0,24$ с при отклоненных в крайнее положение рулях (см. рис. 7, *в*); таким образом, время ликвидации “закрутки” УМД при ориентации опреде-

ляется аэродинамической эффективностью рулей. За это время угол крена УМД изменяется приблизительно на 590 град (из положения $\gamma = 0$ град), что с учетом особенностей определения угла крена УМД алгоритмом ориентации соответствует фактическому углу крена УМД в момент времени $t \approx 0,24$ с: $\gamma \approx -130$ град. Для устранения угла крена с момента времени $t \approx 0,24$ с происходит перекладка рулей в противоположную сторону. При уменьшении угла крена УМД до $\gamma \approx 0$ град с момента времени $t \approx 0,62$ с начинается работа системы стабилизации.

Проведенные исследования системы ориентирования показали возможность использования стационарного корректирующего устройства, обеспечивающего требуемые показатели качества системы ориентирования на всех возможных режимах полета УРС. Ошибка стабилизации угла крена УМД составила $\varepsilon_{\text{co}} \leq 5$ град, время переходного процесса – $T_{\text{co}} \leq 0,25$ с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П а т е н т № 2164657. Управляемый реактивный снаряд / Ефремов Г.А., Бурганский А.И., Хомяков М.А., Лавренов А.Н., Большаков М.В. // Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 1999.
2. Б а к л и ц к и й В. К., Б о ч к а р е в А. М., М у с ь я к о в М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. – М.: Радио и связь, 1986. – 216 с.
3. П а т е н т № 2280590. Способ ориентирования по крену летательного аппарата с оптической головкой самонаведения / Большаков М.В., Лавренов А.Н., Кулаков А.В., Палкин М.В. // Федеральный институт патентной собственности. – 2006.
4. Л е б е д е в А. А., К а р а б а н о в В. А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1965. – 528 с.
5. Г у р е ц к и й Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

Статья поступила в редакцию 18.01.2007



Валентин Васильевич Евстифеев родился в 1931 г., окончил в 1955 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Системы автоматического управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области систем автоматического управления.

V.V. Evstifeyev (b. 1931) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School n.a. Bauman in 1955. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Automation Control Systems” Department of the Bauman Moscow State Technical University n.a. Bauman. Author of more than 70 publications in the field of automatic control systems.

Максим Вячеславович Палкин родился в 1980 г., окончил в 2003 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заместитель начальника отдела ФГУП “НПО машиностроения”. Автор 7 научных работ в области систем автоматического управления.

M.V. Palkin (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University n.a. Bauman in 2003. Deputy chief of the department at the Federal State Unitary Enterprise “NPO mashinostroeniya”. Author of 7 publications in the field of automatic control systems.



НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.31(075.8)

С. А. В а с ю к о в, Г. Ф. Д р о б ы ш е в

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛАМИ НА ЭЛЕКТРОДАХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДВЕСА

Рассмотрены способы регулирования потенциалами в подвесах с роторами цилиндрической и сферической формы. Особое внимание уделено подвесам с регулированием потенциалов по закону широтно-импульсной модуляции. Рассмотрены организация емкостных датчиков перемещения ротора и влияние на крутизну и нулевой сигнал датчиков “паразитных” емкостей подвеса.

Существует несколько законов управления потенциалами на электродах подвеса. Каким же требованиям должны отвечать эти законы? В первую очередь они должны обеспечивать устойчивость, а также наилучшие рабочие характеристики: перегрузочную способность, жесткость и стабильность центрирования подвесов. Законы регулирования не должны быть слишком сложны в технической реализации. Известно, что наилучшие характеристики имеют подвесы с нулевым потенциалом ротора. Следовательно, законы управления должны обеспечивать минимальный наведенный потенциал ротора.

Система регулирования потенциалов на электродах подвеса включает несколько каналов стабилизации. Число каналов равно, как правило, числу пар диаметрально противоположных электродов. Так, цилиндрический подвес (рис. 1, а) имеет пять каналов стабилизации, из них четыре регулируют положение ротора в радиальном направлении и