

УДК 629.7.05

ЕРОМИН А. М., ШАБАН С. А., ПОДКОПАЕВ П. А.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНТУРА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО КРИТЕРИЮ ОБОБЩЕННОЙ РАБОТЫ

Военная академия Республики Беларусь

В статье рассматривается решение задачи нетерминального управления для нейтрального контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата (ТБЛА). Синтез оптимального управления осуществляется на основе минимизации функционала обобщенной работы. Проводится анализ оптимального контура ТБЛА.

Введение

Из [1] известно, что к задачам терминального управления относятся задачи, в которых критерием качества управления является точность приведения объекта в желаемое состояние в определенный конечный момент времени. Этот момент или назначен заранее или приближение к нему может контролироваться в процессе управления, т. е. известно текущее относительное время. В работах [2–5], рассмотрен ряд задач стабилизации и управления в режиме наведения ТБЛА на цель. В этих исследованиях оптимальные управления синтезируются на основе минимизации функционала качества с фиксированным временем наведения. Однако, задачи с фиксированным временем для задач управления в режиме наведения ТБЛА на цель не является корректной, так как это время при неизвестном поведении движущейся цели можно определить только приблизительно. Решения при этом получаются довольно сложными, что обусловлено интегрированием нелинейного уравнения в частных производных или громоздких систем нелинейных дифференциальных уравнений. Кроме того, качество процессов терминального управления не всегда получается удовлетворительным. Последнее объясняется тем, что процесс перевода в конечное состояние не имеет достаточного отражения в минимизируемом функционале, а введение граничных условий не до конца обосновано.

В данной статье при синтезе контура ТБЛА ставится нетерминальная задача, т. е.

необходимо оптимизировать переходные процессы вне зависимости от момента их возбуждения и минимизировать ошибки наведения не в заданный, а в произвольный момент времени. Рассматривается синтез нейтрального стационарного линейного контура ТБЛА на основе минимизации функционала обобщенной работы. Достоинство такого подхода заключается в том, что коэффициенты вектора оптимального управления определяются путем решения линейных уравнений. Это позволяет обнаружить общие закономерности оптимальных управлений и осуществлять целенаправленную корректировку минимизируемого функционала.

Постановка задачи

Структурная схема разомкнутого контура ТБЛА, с учетом модели задающего воздействия, состоит из последовательного соединения апериодического звена с постоянной времени T и двух интегрирующих звеньев. Динамические свойства устройства передачи команд и системы стабилизации ТБЛА считаются безинерционными. Передаточные функции измерительных устройств цели и ТБЛА представляются единичными за счет добавления ошибки сопровождения к оценке угловой координаты, как это показано в [6]. В качестве управления принимается действующее на ТБЛА нормальное ускорение. Для системы выполняется условие полной степени наблюдаемости, которое в данном случае заключается в том, что выходные величины x_1, x_2, x_3

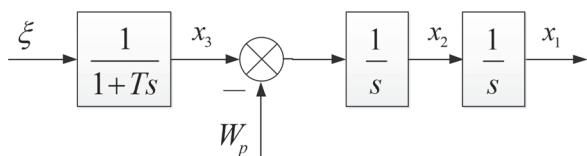


Рис. 1. Структурная схема разомкнутого контура ТБЛА

всех звеньев поддаются контролю (наблюдению) и могут быть использованы для управления. В отношении степени управляемости будем полагать, что она неполная, т. е. управление вводится только на второй точке (выходе апериодического звена) системы, а остальные точки недоступны для непосредственного ввода управляющих воздействий.

Систему уравнений для фазовых переменных с учетом модели задающего воздействия запишем в виде [2]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), & x_1(t_0) = x_{10}; \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) - W_p(t), & x_2(t_0) = x_{20}; \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{1}{T}x_3(t) + \frac{1}{T}\xi(t), & x_3(t_0) = x_{30}. \end{cases} \quad (1)$$

где $x_1(t)$ – ошибка наведения ТБЛА; $W_p(t)$ – нормальное ускорения ТБЛА; $x_3(t) = W_k(t)$ – требуемое ускорения ТБЛА.

В векторно-матричной форме (1) примет вид:

$$\dot{\mathbf{X}}(\hat{t}) = \mathbf{F}\mathbf{X}(\hat{t}) + \mathbf{G}\mathbf{U}(\hat{t}) + \mathbf{J} \zeta(\hat{t}), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где \mathbf{F} – динамическая матрица состояния размерности (3×3) ; \mathbf{G} – матрица эффективности управления размерности (3×3) ; \mathbf{U} – вектор сигналов управления; \mathbf{J} – матрица, учитывающая влияние дополнительных (неконтролируемых) случайных возмущений на фильтруемый процесс (3×3) ; \hat{t} – вектор дополнительных случайных возмущений, который описывается белым гауссовским шумом с нулевым математическим ожиданием и матрицей односторонних спектральных плотностей Q .

Данную разомкнутую следящую систему можно рассматривать как нейтральный объект (число нулевых корней характеристического уравнения здесь равно 2). Как известно из [1], применимость решения задач нетерминального управления по методу А. А. Красовского существенно зависит от устойчивости исходного объекта. Для обеспечения применимости метода А. А. Красовского произведем преобразование фазовых координат контура ТБЛА.

Ввиду наличия двух интегрирующих звеньев весовые функции контура имеют различные степени расходимости, а именно

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \begin{pmatrix} 1 & t & T \left(t - T \left(1 - T e^{-\frac{t}{T}} \right) \right) \\ 0 & 1 & T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \\ 0 & 0 & e^{-\frac{t}{T}} \end{pmatrix}.$$

Вследствие этого осуществим преобразование координат с различными коэффициентами пропорциональности. Введем фазовые переменные x_i^* , пропорциональные исходным x_i , по формуле [1]

$$x_i(t) = \chi_i(t) x_i^*(t), \quad (i=1, \dots, 3), \quad (3)$$

где скалярные функции $\chi_i(t) > 0$ и достаточно быстро монотонно возрастают. Функции $\chi_i(t)$ выбираем в виде [1]

$$\chi_i(t) = e^{\lambda_i(t-t_0)}, \quad (i=1, \dots, 3),$$

где λ_i – положительные действительные числа. Произведя такую замену переменных в уравнении (2), получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}^*(t) &= -\chi^{-1}(t) \dot{\chi}(t) \mathbf{X}^*(t) + \\ &+ \chi^{-1}(t) \mathbf{F} \chi'(t) \mathbf{X}^*(t) + \chi^{-1}(t) \mathbf{G} \mathbf{U}(t) + \\ &+ \chi^{-1}(t) \mathbf{J} \zeta(t), \\ \mathbf{X}^*(t_0) &= \mathbf{X}_0^*, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \chi'(t) = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2(t-t_0)} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_3(t-t_0)} \end{pmatrix}$$

При любой заданной интенсивности нарастания координат x_i , координаты x_i^* будут убывать и стремиться к нулю при достаточно быстром возрастании функции $\chi_i(t)$. Следовательно, невозмущенное состояние объекта (4) при достаточно быстро нарастающей функции $\chi_i(t)$ в новых координатах устойчиво [1].

Вектор состояния в начальный момент времени $\mathbf{X}^*(t_0)$ – гауссовский случайный вектор с характеристиками:

$$M[\mathbf{X}^*(t_0)] = 0, \quad M[\mathbf{X}^*(t_0)\mathbf{X}^{*\top}(t_0)] = \mathbf{P}_0.$$

где \mathbf{P}_0 – матрица априорных дисперсий фазовых координат наблюдаемой системы; M – операция математического ожидания

Будем считать, что измеряется ошибка наведения ТБЛА $x_1(t)$, а уравнение измерителя имеет вид:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}\eta(t), \quad (5)$$

где \mathbf{C} и \mathbf{N} заданные матрицы размерности (3×3) .

Шум наблюдения $\eta(t)$ будем считать гауссовским процессом типа белого шума, с нулевым математическим ожиданием и матрицей односторонних спектральных плотностей R .

Корреляционные матрицы некоррелированных белых шумов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} M[\xi(t)\xi^\top(t')] &= Q(t)\delta(t-t'); \\ M[\eta(t)\eta^\top(t')] &= R(t)\delta(t-t'), \end{aligned} \quad (6)$$

Задача состоит в определении вектора управления $\mathbf{U}(t)$, минимизирующего на произвольном интервале (t_0, t_k) математическое ожидание функционала

$$\begin{aligned} I(\mathbf{U}(t)) &= \frac{1}{2} M \left\{ \mathbf{X}^{*\top}(t_k) \mathbf{S} \mathbf{X}^*(t_k) + \right. \\ &+ \int_{t_0}^{t_k} \left(\dot{\mathbf{X}}^{*\top}(t) \mathbf{A} \mathbf{X}^*(t) + \mathbf{U}^\top(t) k^{-1} \mathbf{U}(t) + \right. \\ &\left. \left. + \mathbf{U}_{\text{опт}}^\top(t) k^{-1} \mathbf{U}_{\text{опт}}(t) \right) dt \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где первое слагаемое представляет собой вынужденное (не зависящее от граничных условий) решение уравнения

$$\mathbf{F}^\top \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{F} = -\mathbf{A}. \quad (8)$$

Первое слагаемое под интегралом в (7) определяет качество регулирования в контуре ТБЛА, а выбором матрицы штрафов \mathbf{A} , в виде

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix},$$

определяются требования к ошибке наведения и демпфированию в контуре управления (выбором коэффициентов штрафа a_{11} и a_{22} , соответственно). Второе слагаемое под интегралом в (7) характеризует суммарные энергетические затраты на управление, совершаемое управляющим воздействием за рассматриваемый

интервал времени. Требуемое ограничение на минимальный расход нормального ускорения ТБЛА $W_p(t)$, которое не учтено в постановке задачи, обеспечивается выбором коэффициента штрафа на управление k . Третье слагаемое под интегралом в (7) является взвешенной суммой работ сигналов управления на входах исполнительных устройств в оптимальной системе, которое аддитивно содержит значение функции \mathbf{S} на конце рассматриваемого интервала времени.

Синтез оптимального контура управления

Определение вектора оптимального управления. Оптимальное управление, минимизирующее на произвольном интервале (t_0, t_k) математическое ожидание функционала (7), определяется в виде [1, 7]

$$\mathbf{U}(t) = -\chi^{r-2}(t) k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}(t), \quad (9)$$

где \mathbf{S} – матрица коэффициентов оптимального управления.

Коэффициент k' определяется выражением

$$k' = \chi^{r-2}(t) k,$$

где умножение на $\chi^{r-2}(t)$ необходимо для получения стационарного оптимального управления.

Вектор оптимального управления (9) с учетом замены переменных в (2) примет вид

$$\mathbf{U}(t) = -\chi'(t) k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}^*(t).$$

Учитывая, что переменная $\hat{\mathbf{X}}^*(t)$ связана с переменной $\hat{\mathbf{X}}(t)$ формулой (3), вектор оптимального управления примет вид

$$\mathbf{U}(t) = -k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}(t), \quad (10)$$

Для получения нетерминальных управлений (10), коэффициенты которых зависят лишь от абсолютного времени t , необходимо найти вынужденное решение уравнения (8), не зависящее от граничного условия.

Так как контур ТБЛА стационарен, а матрица \mathbf{A} выбрана постоянной, то решение уравнения (8) может быть получено из матричного уравнения [1, 7]

$$(\mathbf{F}^\top - \lambda^*) \mathbf{S} + \mathbf{S} (\mathbf{F} - \lambda^*) = -\mathbf{A}, \quad (11)$$

где $\lambda^* = \begin{Bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{Bmatrix}$.

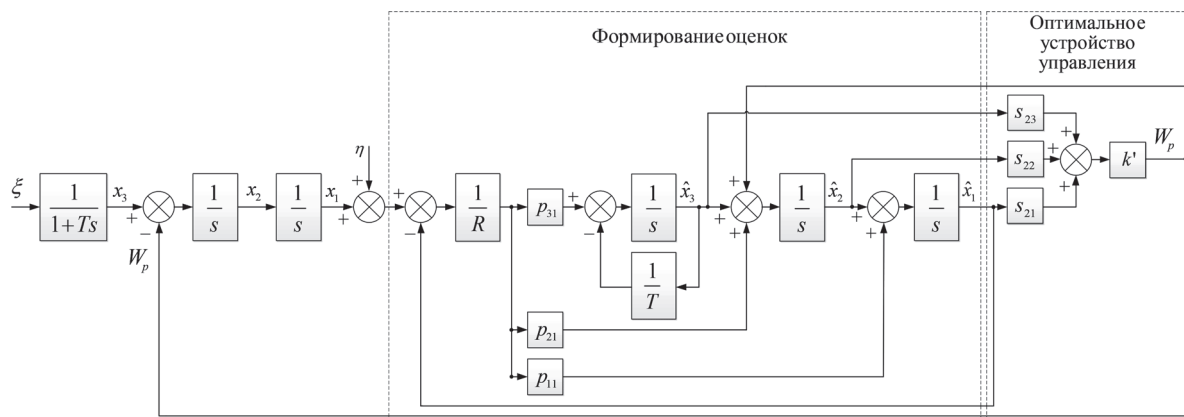


Рис. 2. Структурная схема оптимального контура ТБЛА

Матричное уравнение (11), учитывая симметричность матрицы **S**, запишется по координатно в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_{11} - 2\lambda_1 s_{11} = 0; \\ s_{11} - (\lambda_1 + \lambda_2) s_{12} = 0; \\ s_{12} - (\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T) s_{13} = 0; \\ 2s_{12} - 2\lambda_2 s_{22} + a_{22} = 0; \\ s_{13} + s_{22} - (\lambda_2 + \lambda_3 + 1/T) s_{23} = 0; \\ s_{23} - (\lambda_3 + 1/T) s_{33} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Коэффициенты матрицы *s*, входящие в вектор оптимального управления (10), с учетом (12) будут равны:

$$\begin{aligned} s_{12} &= \frac{a_{11}}{2\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ s_{22} &= \frac{a_{11} + a_{22}\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)}{2\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ s_{23} &= (a_{11}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 1/T) + \\ &+ a_{22}\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T)) / (2\lambda_1\lambda_2 \times \\ &\times (\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T)(\lambda_2 + \lambda_3 + 1/T)). \end{aligned} \quad (13)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты λ_i должны быть больше характеристического числа объекта (4) и в процессе синтеза выбираются таким образом, чтобы обеспечивались желаемые свойства последнего члена в функционале (7).

Определение вектора оценки $\hat{\mathbf{X}}(t)$. Для определения вектора оценки $\hat{\mathbf{X}}(t)$ воспользуемся уравнением линейного фильтра Калмана [1, 3, 7]

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) + \mathbf{B}(t)(\mathbf{Z}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)), \quad (14)$$

где **B**(*t*) – матрица оптимальных коэффициентов фильтрации, которая определяется соотношением

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T(\mathbf{NRN}^T)^{-1}, \quad (15)$$

здесь **P**(*t*) – матрица ошибок оценивания вектора состояния, которая определяется решением уравнений Риккати:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{F}^T - \\ &- \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T(\mathbf{NRN}^T)^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P}(t) + \mathbf{J}\mathbf{Q}\mathbf{J}^T, \quad (16) \\ \mathbf{P}(t_0) &= \mathbf{P}_0. \end{aligned}$$

Представив матричное уравнение (16) в виде системы алгебраических уравнений, определяющих установившиеся значения p_{11}, p_{21}, p_{31} , и решив их, получим:

$$\begin{aligned} p_{11} &\approx 2R \sqrt{\frac{Q}{RT^2}} - \frac{R}{T}, \\ p_{21} &= \frac{1}{2R} p_{11}^2, \\ p_{31} &= \sqrt{\frac{QR}{T^2}} - \frac{p_{21}}{T}. \end{aligned} \quad (17)$$

Структурная схема контура ТБЛА, соответствующая (10), приведена на рисунке 2.

Определение передаточной функции контура управления. Определив в уравнениях (10) и (14) произведения матриц и перейдя к изображениям по Лапласу при нулевых начальных условиях, получим систему уравнений описывающих контур управления ТБЛА в установившемся режиме:

$$\begin{cases} W_p(s) - k's_{21}\hat{x}_1(s) - k's_{22}\hat{x}_2(s) - k's_{23}\hat{x}_3(s) = 0; \\ \left(s + \frac{P_{11}}{R}\right)\hat{x}_1(s) - \hat{x}_2(s) = \frac{P_{11}}{R}x_1(s); \\ W_p(s) + \frac{P_{21}}{R}\hat{x}_1(s) + s\hat{x}_2(s) - \hat{x}_3(s) = \frac{P_{21}}{R}x_1(s); \\ \frac{P_{31}}{R}\hat{x}_1(s) + \left(s + \frac{1}{T}\right)\hat{x}_3(s) = \frac{P_{31}}{R}x_1(s). \end{cases} \quad (18)$$

Решив систему уравнений (18) получим передаточную функцию контура управления ТБЛА:

$$W(s) = \frac{k_w(1+sT_1)(1+sT_2)}{s^2(1+sT_3)(1+2\xi_2T_4s+T_4^2s^2)}. \quad (19)$$

Определение параметров передаточной функции (19) не представляет особых затруднений, однако, получающиеся выражения громоздки и поэтому здесь не приводятся.

Выбор коэффициентов штрафа функционала качества

Выбор коэффициентов штрафа функционала качества осуществляется эмпирическим способом, описанным в [8, 9]. Считается, что максимально допустимые отклонения фазовых координат в любой момент времени вносятся в функционал качества одинаковый вклад и приблизительно равняется вкладу максимально допустимого отклонения сигнала управления. Исходя из этих предположений, получим

$$a_{22} = \left(\frac{x_{1\max}}{x_{2\max}}\right)^2 a_{11};$$

$$a_{11}x_{1\max}^2 + a_{22}x_{2\max}^2 = kW_p^2.$$

Полученные по этим формулам значения коэффициентов штрафа рассматриваются как начальные оценки. Окончательный выбор коэффициентов штрафа производится после нескольких пробных расчетов обратных связей и последующего моделирования контура управления.

Данный подход позволяет найти аналитические зависимости между элементами матрицы S , а следовательно, динамическими свойствами контура управления (запасами устойчивости, колебательностью, временем переходного процесса и т. д.), и коэффициентами штрафа функционала качества.

При проведении анализа зависимости параметров контура телеуправления от коэффициентов штрафа функционала качества значение a_{11} выбирается таким образом, чтобы отклонения по всем координатам достигали своего максимума одновременно. Коэффициенты оптимального управления (10) вычисляются по формулам (13), (17) при следующих значениях параметров:

$$Q = 66020 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}, \quad T = 7 \text{ с},$$

$$R = 10,075 \text{ м}^2 \cdot \text{с}, \quad r_b = 10500 \text{ м},$$

$$\lambda_1 = 1,6, \quad \lambda_2 = 1,8, \quad \lambda_3 = 6,85.$$

где r_b – дальность до точки встречи.

В результате проведенного анализа выбраны следующие значения коэффициентов штрафа функционала качества (7):

$$a_{11} = 0,5, \quad a_{22} = 0,756 \text{ с}^2, \quad k = 0,035 \text{ с}^4.$$

Передаточная функция оптимального контура телеуправляемого БЛА имеет вид:

$$W(s) = \frac{2,076(1+1,038s)}{s^2(1+2 \cdot 0,908 \cdot 0,159s+0,159^2s^2)}.$$

Необходимо отметить, что от выбора коэффициентов штрафа a_{11} , a_{22} зависит качество регулирования контура управления. Так, например, положив $a_{22} = 0$, мы отказываемся от дополнительных требований к демпфированию контура управления. А положив $a_{11} = 0$, $a_{22} = 0$, мы исключаем требования к качеству регулирования, и оптимальное управление будет определяться только суммарными энергетическими затратами на управление.

Результаты сравнительного анализа математических моделей

Для проведения анализа оптимального контура ТБЛА разработана имитационная модель в среде визуального моделирования MATLAB (SIMULINK). Данная модель включает в себя: блоки задающего и возмущающего воздействий; блок устройства выработки команд управления (УВК).

Блок задающего воздействия. Процесс движения маневрирующей цели описывается гауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и известной корреляционной функцией [10]:

$$R(\tau) = De^{-\frac{|\tau|}{T}}, \quad (20)$$

где постоянная времени маневрирования цели T и дисперсия маневрирования цели D выбираются в соответствии с типом цели [10].

Случайный процесс с корреляционной функцией типа (20) формируется блоком Band-Limited White Noise с параметрами: мощность шума – $Q = 2DT$; такт дискретности – 0,01.

Блок возмущающего воздействия. Шум наблюдения $\eta(t)$ формируется блоком Band-Limited White Noise с параметрами: мощность шума – R ; такт дискретности – 0,01. Мощность шума определяется соотношением [2]:

$$R = 2r_b^2 \sigma_\varepsilon^2 T_{\text{ш}},$$

где σ_ε – среднеквадратическое отклонение ошибок измерения угловых координат;

$T_{\text{ш}}$ – интервал корреляции ошибок измерения угловых координат.

Блок УВК. Передаточная функция УВК рассчитывается аналитически, в ходе синтеза контура управления, и имеет вид:

$$W_{\text{увк}}(s) = \frac{2,076(1 + 1,038s)}{1 + 2 \cdot 0,908 \cdot 0,159s + 0,159^2 s^2}.$$

Анализ оптимального контура ТБЛА. Устойчивость контура управления определялась по логарифмическому критерию. Запас устойчивости контура управления по фазе $\Delta\varphi(\omega_c) = 30,6$ град, а по амплитуде $\Delta L = 16,6$ Дб.

За показатель точности выбрана дисперсия ошибки наведения ТБЛА, расчет которой производится по формуле [8]

$$D_{hi} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left(\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_{ij}(k) - x_{yj}(k))^2 \right),$$

где N – количество шагов в процессе моделирования одной реализации; J – количество ре-

ализаций; $x_{ij}(k) - x_{yj}(k)$ – разность требуемой и фактической ошибок наведения ТБЛА.

В ходе моделирования проведено 1300 опытов. Значение СКО ошибки наведения ТБЛА $\sigma_h = \sqrt{D_h} = 14,685$ м.

В таблице представлены значения СКО ошибки наведения при различных значениях спектральной плотности задающего воздействия Q . Расчет спектральной плотности Q проводился в зависимости от типа цели при совершении маневра с максимальной перегрузкой g_{max} . Из таблицы видно что, для целей с допустимой перегрузкой до $7g$ м/с² ($Q = 66020$, м²·с⁻³), СКО ошибки наведения не превышает 15 м.

Зависимость значения СКО ошибки наведения от спектральной плотности задающего воздействия

Показатель	Значения					
Q , м ² ·с ⁻³	2277	5389	12130	33680	66020	86230
g_{max} , м/с ²	1,3g	2g	3g	5g	7g	8g
σ_h , м	5,08	7,59	10,38	13,9	14,685	22,8

Заключение

В статье рассмотрен один из подходов к решению задачи нетерминального управления для нейтрального контура ТБЛА. Использование функционала обобщенной работы упростило процесс определения оптимального управления контура ТБЛА и позволило преодолеть трудности, которые возникали в работах [2, 4, 6] при решении систем нелинейных дифференциальных уравнений. Линейность уравнения (8) позволяет обнаружить общие закономерности оптимального управления и осуществлять целенаправленную корректировку функционала (7) выбором коэффициентов штрафа. Анализ оптимального контура ТБЛА показал, что при совершении маневра целью с максимальной перегрузкой до $7g$ м/с² обеспечивается работоспособность контура, а ошибки наведения не превышают допустимых значений.

Литература

1. Красовский, А. А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование / А. А. Красовский – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973. – 560 с.
2. Кун, А. А. Синтез квазиоптимального контура телеуправляемой ракеты / А. А. Кун [и др.] // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 26. – С. 95–102.
3. Кун, А. А. Основы построения систем автоматического управления: в 3 ч. / А. А. Кун, В. Ф. Лукьянов, С. А. Шабан; под ред. А. А. Куна. – Минск: Изд. акад., 2001. – 3 ч.
4. Орлов, Е. В. Проектирование систем телеуправления / Е. В. Орлов. – Ижевск: Удмурт. ун-т., 2000. – 272 с.
5. Батков, А. М. Системы телеуправления / А. М. Батков, И. Б. Тарханов. – М.: Машиностроение, 1971. – 192 с.
6. Кун, А. А. Синтез квазиоптимального контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата при инерционном измерителе / А. А. Кун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2014. – № 8(86). – С. 65–71.

7. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
8. Меркулов, В. И. Авиационные системы радиоуправления: в 3 т / В. И. Меркулов [и др.] под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 3 т.
9. Крутько, П. Д. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / П. Д. Крутько, А. И. Максимов, Л. М. Скворцов. – М.: Радио и связь, 1988. – 306 с.
10. Горшков, С. А. Сопоставление методов адаптивной дискретной фильтрации координат маневрирующих целей / С. А. Горшков, А. С. Солонар // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 6, т.4. – С. 14–30.

Поступила 8.7.2015

EROMIN A., SHABAN S., PODKOPAEV P.

ANALYTICAL ENGINEERING OF A TELECONTROLLED PILOTLESS AIRCRAFT CONTOUR IN ACCORDANCE WITH GENERALIZED WORK CRITERION

The article considers the non-terminal problem for neutral contour of a telecontrolled pilotless aircraft. Optimal control synthesis is provided on the basis of minimization of generalized work functional. The analysis of optimal telecontrolled pilotless aircraft contour is carried out.