

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

*Канд. техн. наук АНТАНЕВИЧ А. А., асп. ИКУАС Ю. Ф.,
докт. техн. наук, проф. ЛОБАТЫЙ А. А.*

*Белорусский национальный технический университет,
Военная академия Республики Беларусь*

Актуальной задачей при разработке системы автоматического управления (САУ) беспилотного летательного аппарата (БЛА) является синтез алгоритмов (законов) управления при стабилизации траектории полета БЛА. Задача синтеза алгоритмов управления заключается в выборе их структуры и состава сигналов, входящих в закон управления, которые обеспечивают необходимое качество управления БЛА и соответственно решение тактической задачи, которая, как правило, сводится к полету по заданному маршруту.

Для аналитического синтеза САУ БЛА необходимо иметь математическую модель траектории полета БЛА. Заданную траекторию можно аппроксимировать различными математическими зависимостями, в частности полиномами, аргументом которых является текущее время полета БЛА [1, 2]. В связи с тем, что в процессе полета, как правило, не предусмотрено энергичное маневрирование БЛА и его фазовые координаты при этом не достигают наложенных на них ограничений, используя методы линеаризации относительно опорной траектории, математическую модель динамики БЛА можно описать векторно-матричным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (1)$$

где X – n -мерный вектор состояния системы; U – m -мерный вектор управления; A , B – матрицы коэффициентов размерностями $n \times n$ и $n \times m$ соответственно. В общем случае: $X = X(t)$; $U = U(t)$; $A = A(t)$; $B = B(t)$. Для упрощения записи аргумент t опустим.

Управление БЛА определяется в виде

$$U = -KX, \quad (2)$$

где K – матрица коэффициентов управления размерностью $m \times n$.

Математическая модель замкнутой САУ БЛА имеет вид

$$\dot{X} = (A - BK)X. \quad (3)$$

Согласно [3] устойчивость замкнутой системы и заданные показатели ее качества достигаются за счет совпадения корней замкнутой системы (3) с корнями эталонной системы, описываемой уравнением

$$\dot{Y} = CY, \quad (4)$$

где Y – n -мерный вектор состояния; C – заданная матрица коэффициентов размерностью $n \times n$.

Одним из эффективных методов синтеза линейных управлений является метод модального управления [3, 4]. Цель синтеза законов управления – вычисление матрицы K , обеспечивающей заданное значение корней (мод) замкнутой системы (3). При этом необходимо обеспечить равенство характеристических полиномов систем (3) и (4)

$$\det(Es - A + BK) = \det(Es - C), \quad (5)$$

где E – единичная матрица; s – параметр преобразования Лапласа.

Необходимым условием выполнения равенства (5), т. е. совпадения корней систем (3) и (4), является полная управляемость системы (3) [1, 5].

В общем случае для оптимизации САУ на интервале $[t_0, t_k]$ можно использовать квадратичный функционал качества [3, 4] вида

$$J = \frac{1}{2} X^T(t_k) H X(t_k) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} (X^T(t) Q(t) X(t) + U^T(t) R(t) U(t)) dt, \quad (6)$$

где H , $Q(t)$, $R(t)$ – известные матрицы коэффициентов.

Оптимальное управление $U^* = U^*(t)$ для системы (1) и функционала (6) при этом определяется выражением

$$U^* = R^{-1} B^T P X, \quad (7)$$

где $P = P(t)$ – матрица, удовлетворяющая дифференциальному уравнению вида

$$\dot{P} = -PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q, \\ P(t_k) = -H. \quad (8)$$

При заданной траектории полета БЛА $H = 0$, $Q = 0$ и искомая матрица коэффициентов управления K в установившемся режиме (при $\dot{P} = 0$) в соответствии с (2) и (7) определяется следующим образом:

$$K = R^{-1} B^T P. \quad (9)$$

При этом матрица P удовлетворяет алгебраическому уравнению

$$PA + A^T P = PBR^{-1}B^T P. \quad (10)$$

В данном случае R – матрица размерностью $m \times m$ загрузки элементов вектора управления, которая характеризует степень участия каждого органа управления (управляющего воздействия) БЛА в обеспечении требуемых характеристик замкнутой системы; P – искомая матрица размерностью $n \times n$, обеспечивающая заданные свойства управляемой системы (3) и определяемая из условия равенства правых частей (3) и (4)

$$A - BR^{-1}B^T P = C, \quad (11)$$

которое при невырожденной матрице P является необходимым и достаточным условием эквивалентности систем (3) и (4).

При известных матрицах коэффициентов модели объекта управления A и B алгоритм вычисления матрицы коэффициентов управления K включает в себя следующие этапы:

- формирование матрицы C эталонной модели;
- решение (10) относительно матрицы P ;
- расчет матрицы коэффициентов управления K по формуле (9).

Для задания приемлемых значений корней замкнутой системы или коэффициентов характеристического полинома, которые определяют требования к эталонной матрице C , могут применяться различные способы. В данном случае удобно использовать полиномы Баттерворта [4]. Полученные таким образом характеристические полиномы не универсальны, но являются отправной точкой при отыскании оптимального расположения корней. Необходимо также учитывать, что в реальной системе управления величины управляющих воздействий ограничены, а значит, размещение корней эталонной матрицы не может быть произвольным.

Для исследования работоспособности разработанной методики синтеза модального управления БЛА использовалась математическая модель бокового движения гипотетического БЛА [5] с векторами состояния $X = [\omega_x, \gamma, \psi, Z]^T$ и $X = [\omega_x, \gamma, \psi, Z, \int Z]^T$. Здесь ω_x – угловая скорость вращения БЛА относительно продольной оси; γ – угол крена; ψ – угол рыскания; Z – боковая координата (боковое отклонение

БЛА от заданной траектории); $\int Z = \int_0^t Z dt$ – интегральный член, введение которого в вектор состояния обусловлено необходимостью обеспечения астатического регулирования боковой координаты при действии возмущений со стороны атмосферы.

Для вычисления передаточных чисел матрицы K матрица эталонной модели четвертого порядка C_4 задана в виде

$$C_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2,61 & 3,41 & 2,61 \end{bmatrix} \quad (12)$$

согласно полиному Баттерворта, представленному в следующем виде:

$$s^4 + 2,61\omega_0 s^3 + 3,41\omega_0^2 s^2 + 2,61\omega_0^3 s + \omega_0^4, \quad (13)$$

где ω_0 – число, определяющее ширину полосы пропускания САУ.

При исследовании системы пятого порядка выражения (12), (13) примут вид:

$$C_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 3,24 & 5,24 & 5,24 & 3,24 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$s^5 + 3,24\omega_0 s^4 + 5,24\omega_0^2 s^3 + 5,24\omega_0^3 s^2 + 3,24\omega_0^4 s + \omega_0^5. \quad (15)$$

Полученные передаточные числа обеспечивают точное совпадение корней замкнутой системы (3) с корнями заданной эталонной модели (4). Значения вычисленных коэффициентов управления (элементов матрицы $K = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]$) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов управления

Параметр	$\int Z$	Z	ψ	γ	ω_X
Значения коэффициентов управления	0,02	0,0647	-0,3334	1,0267	-0,5696

Реакция системы БЛА + САУ на действие ветрового возмущения атмосферы β_v исследовалась путем моделирования в среде MathLab процесса полета БЛА.

На рис. 1, 2 представлены графики изменения параметров бокового движения БЛА: ω_X , γ , ψ , Z , δ_z , β_v . Здесь δ_z – отклонение органов управления боковым движением БЛА (элеронов); β_v – ветровое возмущение атмосферы. Полученные результаты показали, что замкну-

тая система БЛА + САУ является устойчивой, переходный процесс соответствует предъявленным требованиям.

Кроме того, применение закона управления БЛА с интегральным членом (система пятого порядка) позволяет при действии ветрового возмущения стабилизировать боковую координату Z без установившейся ошибки (рис. 2).

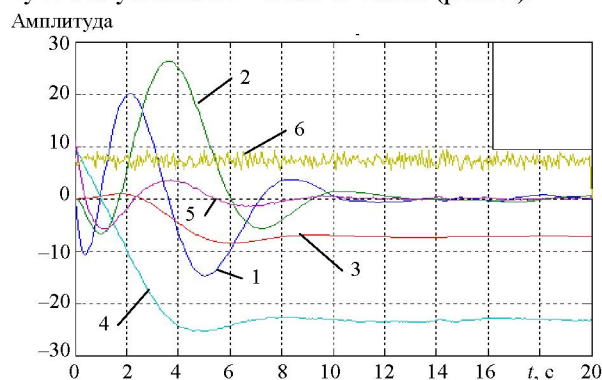


Рис. 1. Стабилизация БЛА при действии ветра (закон управления без интегрального члена): 1 – ω_X , град; 2 – γ , град; 3 – ψ , град; 4 – Z , м; 5 – δ_z , град; 6 – β_v , м/с

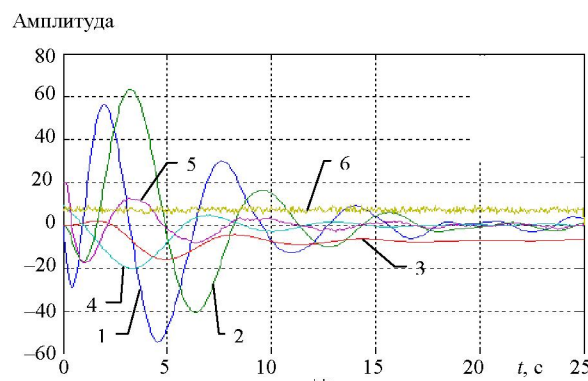


Рис. 2. Стабилизация БЛА при действии ветра (закон управления с интегральным членом): 1 – ω_X , град; 2 – γ , град; 3 – ψ , град; 4 – Z , м; 5 – δ_z , град; 6 – β_v , м/с

ВЫВОД

Разработана методика аналитического синтеза системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом на основе модального управления с использованием полиномов Баттерворта. Проведенное математическое моделирование процесса стабилизации БЛА показало работоспособность и эффективность данного подхода в условиях ветровых возмущений атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильщиков, М. Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков. – М.: Наука, 2005. – 280 с.
2. Лобатый, А. А. Аналитический синтез управления беспилотным летательным аппаратом: сб. науч. тр. Военной академии Респ. Беларусь / А. А. Лобатый, А. А. Антаневич, Ю. Ф. Икуас. – Минск, 2009. – № 17. – С. 62–66.
3. Красовский, А. А. Справочник по теории автоматического управления / А. А. Красовский. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

4. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / К. А. Пупков, Н. В. Егупов. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 640 с.

5. Красовский, А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский, Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986 – 477 с.

Поступила 12.02.2010

УДК 351

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Докт. техн. наук, проф. ГАНЭ В. А., асп. ДИЯБ АБДАЛЛАХ САИД

Белорусский национальный технический университет

Проблемы безопасности дорожного движения актуальны в решении транспортных задач, управлении транспортной логистикой, профилактике дорожно-транспортных происшествий. Первостепенными следует считать задачи, методы и способы выявления факторов, приоритетно определяющих эффективность управления автотранспортными средствами. В этом отношении информативными и малозатратными являются ситуационный подход и моделирование управления движением [1].

В задачах построения системных моделей основных контуров управления автотранспортным средством по каналам направления движения и скорости важнейшим функционально необходимым элементом выступает блок, отражающий индивидуальные особенности водителя как оператора управления. Сформулируем требования к формализации модельного блока «оператор – водитель» в структуре информационной технологии оценки эффективности управления автотранспортным средством:

1) отражение индивидуальных степеней восприятия дорожной обстановки;

2) учет дискретного характера и конечного времени принятия управленческого решения;

3) наглядное представление в форме структурной схемы на основе операторного представления элементов модели, организации локальных информационных обратных связей и главной отрицательной обратной связи, отражающей кибернетический принцип управления принятия водителем решения по измеренному целевому рассогласованию – отклонению.

Первое требование удовлетворяется структуризацией водителей как индивидов по степеням мотивационного восприятия дорожной обстановки, характеризуемой выбранной целевой функцией на входе модели и обобщенным возмущением, искажающим оценку целевого рассогласования – информации, необходимой для принятия управленческого решения [2]. Второе требование обеспечивается построением модели в классе дискретных следящих систем по отношению «вход – выход (результат управле-