

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 62.50 519.6

**МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ
АППАРАТОМ С ОПРЕДЕЛЕННЫМ ЗАПАСОМ ЖИВУЧЕСТИ**

Н. А. Северцев, И. В. Прокопьев

Для реализации управления беспилотных аппаратов (БПА), обладающих запасом живучести, необходимы интеллектуальные системы управления, способные функционировать в случае частичной потери работоспособности. Основой этих систем является наличие режимов принятия решения на основе логической обработки данных. Такая интеллектуальная система управления обеспечивает автономный режим управления БПА.

Проблема создания или синтеза интеллектуальных систем управления, функционирующих в случае частичной потери работоспособности, сегодня не решена. В подавляющем большинстве БПА управляются оператором вручную с помощью дистанционных систем управления.

Основной характеристикой живучих систем управления является то, что система управления должна обеспечивать достижение целей управления с сохранением качества в условиях существенного изменения математической модели объекта управления [1]. Формальная постановка задачи синтеза управления включает математическую модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, критерий качества управления и цель управления в форме терминальных условий. Для обеспечения требуемого запаса живучести необходимо предусмотреть синтез системы управления с учетом всех возможных изменений модели объекта [2].

Для решения задачи синтеза живучих систем управления предлагается использовать вычислительные методы символьной регрессии на основе последних достижений в области вычислительных алгоритмов. Методы символьной регрессии используют для поиска оптимального решения современные эволюционные алгоритмы: метод генетического программирования и его развитие, методы грамматической эволюции, аналитического программирования и метод сетевого оператора, которые во многих практических применениях позволяют сконструировать процедуры автоматического синтеза систем управления [3–5]. Данные методы позволяют находить структуру оптимальной системы управления для объектов управления любой сложности в виде кода формальной или программной записи.

Рассмотрим пример синтеза живучей системы управления квадрокоптером, одним из перспективных беспилотных летательных аппаратов.

Математическая модель объекта управления имеет вид

$$\dot{x} = V_x, \quad (1)$$

$$\dot{V}_x = -\frac{T_q}{m_q} \cos(\gamma) \sin(\vartheta), \quad (2)$$

$$\dot{y} = V_y, \quad (3)$$

$$\dot{V}_y = -\frac{T_q}{m_q} \cos(\gamma) \cos(\vartheta) - g, \quad (4)$$

$$\dot{z} = V_z, \quad (5)$$

$$\dot{V}_z = -\frac{T_q}{m_q} \sin(\gamma), \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \omega_x, \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_x = \frac{M_x}{I_x}, \quad (8)$$

$$\dot{\vartheta} = \omega_z, \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{M_z}{I_z}, \quad (10)$$

где x, y, z – координаты центра масс квадрокоптера в инерциальной системе координат; V_x, V_y, V_z – проекции вектора скорости; γ – угол поворота вокруг оси X ; ϑ – угол поворота вокруг оси Z ; ω_x – проекция угловой скорости вращения на ось X ; ω_z – проекция угловой скорости вращения на ось Z ; m_q – масса; I_x, I_z – постоянные величины; T_q – суммарная тяга винтов; M_x – момент вращения вокруг оси X ; M_z – момент вращения вокруг оси Z ; g – ускорение свободного падения.

Управление квадрокоптером осуществляется тягами четырех его винтов. Для расчета управления имеем следующие соотношения:

$$T_q = u_1 + u_2 + u_3 + u_4, \quad (11)$$

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0, \quad (12)$$

$$u_1 - u_3 = \frac{M_z}{l_b}, \quad (13)$$

$$u_2 - u_4 = \frac{M_x}{l_b}, \quad (14)$$

где l_b – постоянная величина.

Из соотношений (7)–(10) получаем

$$u_1 = \frac{T_q}{4} + \frac{M_z}{2l_b}, \quad (15)$$

$$u_2 = \frac{T_q}{4} + \frac{M_x}{2l_b}, \quad (16)$$

$$u_3 = \frac{T_q}{4} - \frac{M_z}{2l_b}, \quad (17)$$

$$u_4 = \frac{T_q}{4} - \frac{M_x}{2l_b}. \quad (18)$$

Для управления заданы ограничения

$$0 \leq u_i \leq u^+, \quad i = \overline{1,4}, \quad (19)$$

где u^+ – заданная максимальная тяга винтов.

Для системы (11)–(14) можно использовать обобщенное управление

$$\tilde{\mathbf{u}} = \left[T_q \quad M_x \quad M_z \right]^T \quad (20)$$

и пересчитывать реальные величины управляющих воздействий по формулам (15)–(18).

Пусть в процессе управления система подвергается воздействиям, в результате которых изменяются предельные тяги винтов u^+ . Тогда различия между системами будут заключаться в различных ограничениях на управления u_1^+ , u_2^+ .

Для системы заданы терминальные условия $(x_f, y_f, z_f, \gamma_f, \vartheta_f)$, а также начальные условия

$$X_0 = \{x_0^- \leq x(0) \leq x_0^+, y_0^- \leq y(0) \leq y_0^+, z_0^- \leq z(0) \leq z_0^+\}, \quad (21)$$

$$V_x(0) = 0, \quad V_y(0) = 0, \quad V_z(0) = 0, \quad \gamma(0) = 0, \quad \vartheta(0) = 0, \quad \omega_x(0) = 0, \quad \omega_z(0) = 0,$$

и определен критерий качества

$$J = t_f \rightarrow \min. \quad (22)$$

Необходимо синтезировать живучую систему управления [1, 2], не реагирующую на изменения ограничений на управление.

Для решения используем метод сетевого оператора [3–8].

При решении задачи использовали следующие значения параметров модели: $m_q = 1$ кг, $l_b = 0,5$ м, $I_{xx} = 0,03$ кг·м², $I_{zz} = 0,03$ кг·м², $u_1^+ = 4$ кг, $u_2^+ = 2,5$ кг.

В результате синтеза было получено следующее обобщенное управление

$$T_{q,1} = -15,19V_y - 15,51(y - y_f) + g + \arctan(V_y) + \sin(V_y) + \\ + (3\vartheta)^2 - \operatorname{sgn}(y - y_f) \sqrt{15,51|y - y_f|},$$

$$M_{x,1} = -1,075\omega_z - 3\vartheta + 0,527V_x + 0,324(x - x_f),$$

$$M_{z,1} = -1,075\omega_x - 3\gamma - 0,527V_z - 0,324(z - z_f).$$

Из-за симметричной конструкции квадрокоптера мы получили одинаковые управления для моментов вокруг осей X и Z .

Для определения качества управления было проведено моделирование полученной системы управления при движении квадрокоптера по траектории, заданной точками в пространстве. Результаты моделирования представлены на рис. 1–15.

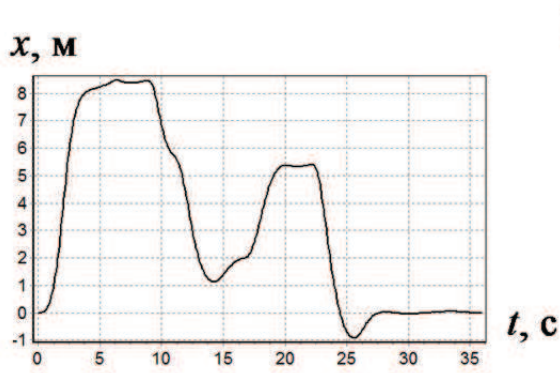


Рис. 1

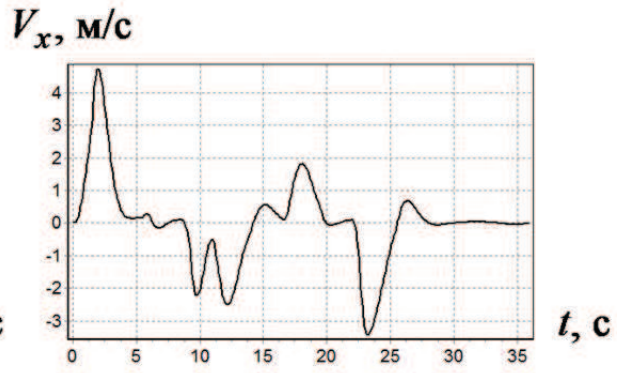


Рис. 2

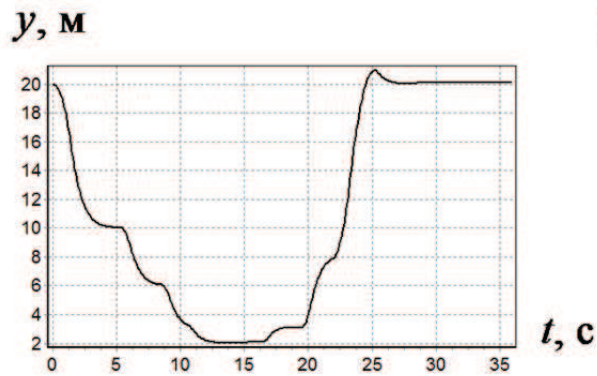


Рис. 3

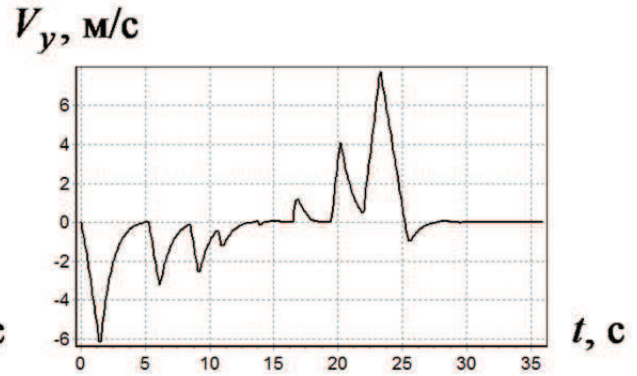


Рис. 4

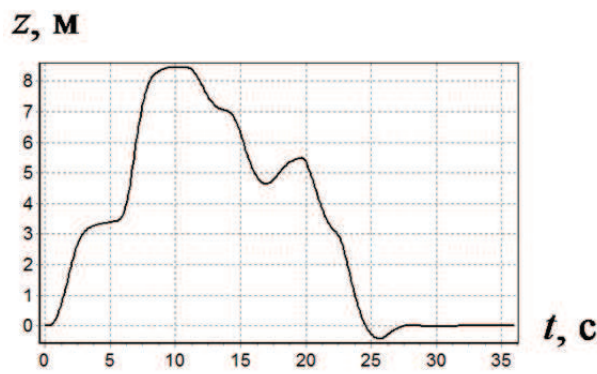


Рис. 5

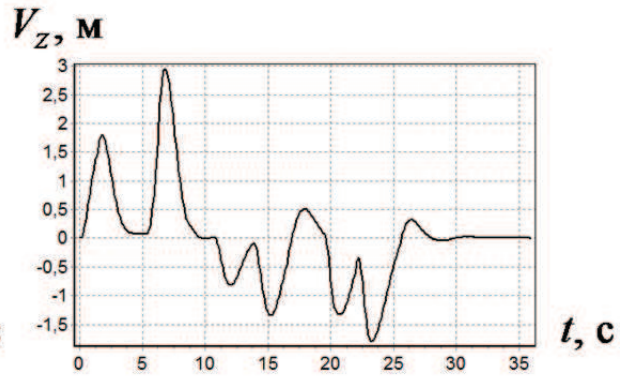


Рис. 6

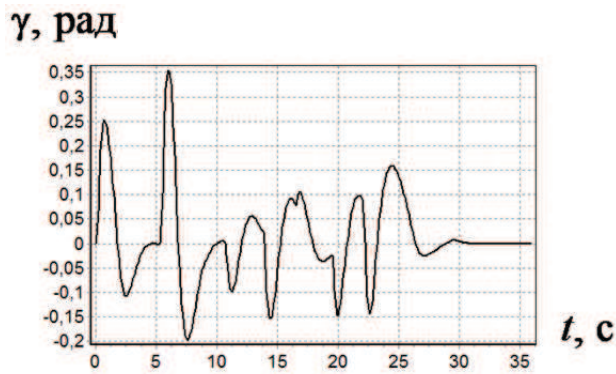


Рис. 7

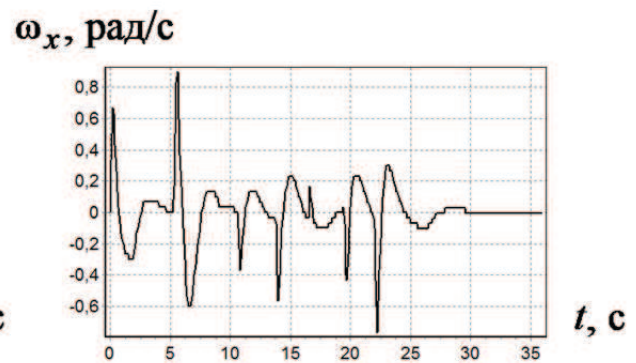


Рис. 8

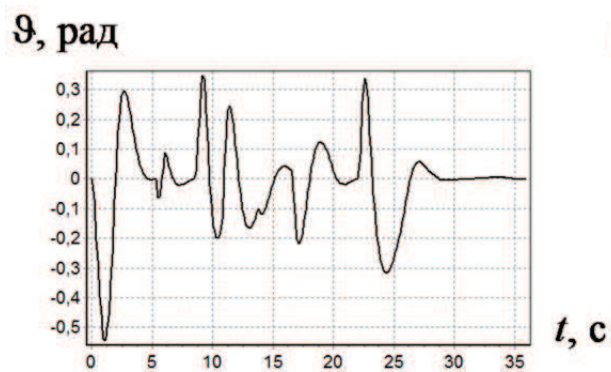


Рис. 9

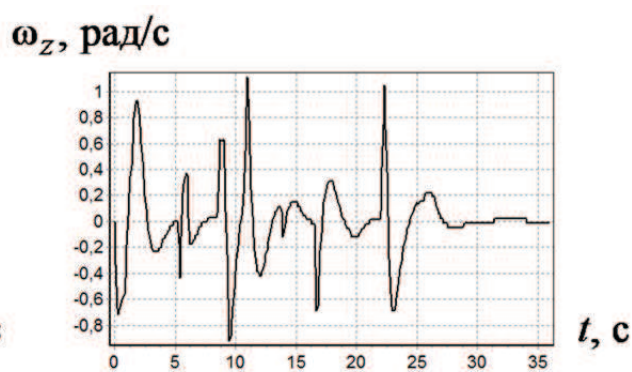


Рис. 10

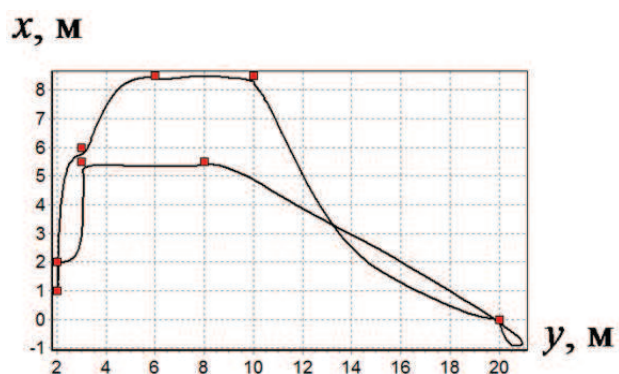


Рис. 11

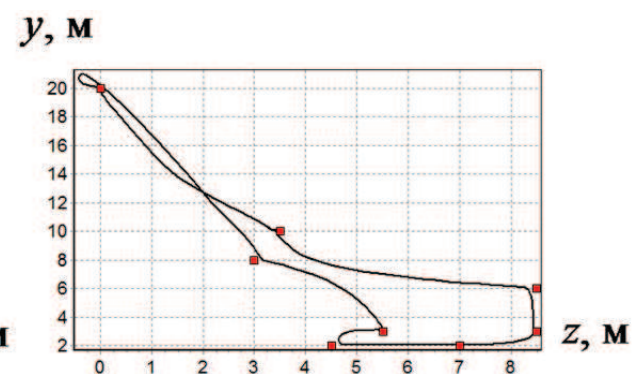


Рис. 12

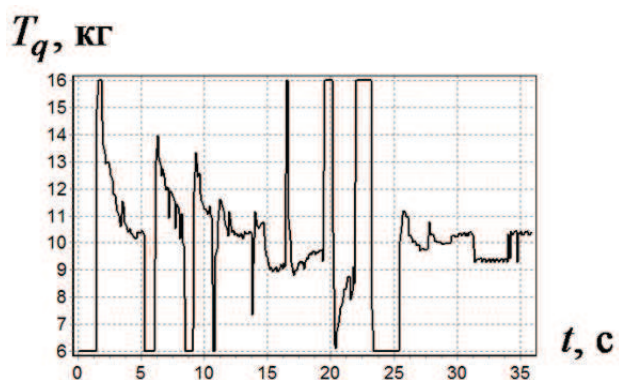


Рис. 13

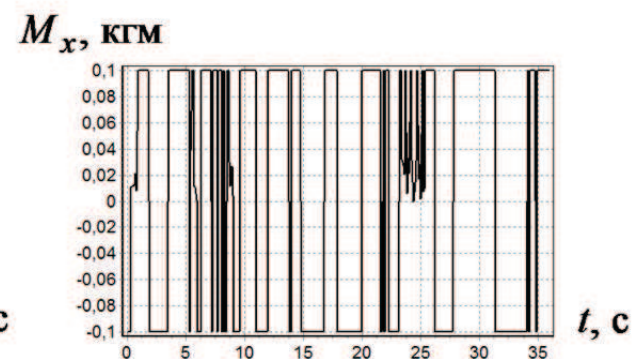


Рис. 14

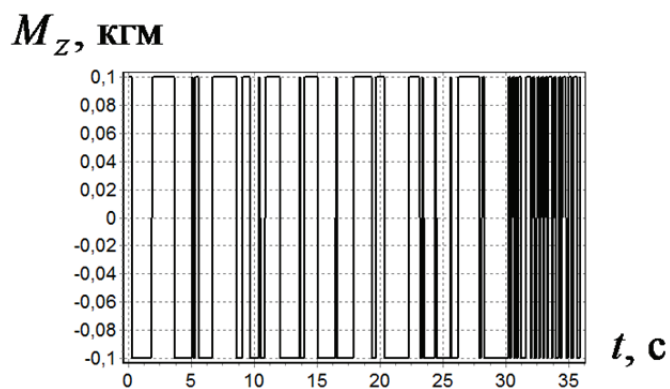


Рис. 15

Как видно из результатов моделирования, система управления справляется с задачей обеспечения движения квадрокоптера по пространственной траектории в условиях изменения параметров ограничения на управление.

Список литературы

1. Северцев, Н. А. Безопасность и отказоустойчивость динамических систем / Н. А. Северцев. – М. : Культура и техника, 2013. – 412 с.
2. Прокопьев, И. В. Интеллектуальная система обеспечения живучести и управления беспилотным летательным аппаратом. / И. В. Прокопьев, А. В. Бецков // Фундаментальные труды системной безопасности : сб. науч. ст. / Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН. – М. : Вузовская книга, 2012. – Вып. 3. – С. 430–433.
3. Дивеев, А. И. Метод сетевого оператора / А. И. Дивеев. – М. : ВЦ РАН, 2010. – 178 с.
4. Дивеев, А. И. Метод символьной регрессии на основе сетевого оператора в задаче синтеза управления / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: www.science-education.ru/109-9458 (дата обращения: 04.05.2014).
5. Софронова, Е. А. Метод многослойного сетевого оператора для синтеза системы управления летательным аппаратом / Е. А. Софронова, А. И. Дивеев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – URL: www.science-education.ru/103-6170 (дата обращения: 04.05.2014).
6. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
7. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения безопасности сложных систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 105–107.
8. Саханов, К. Ж. Автоматизация системы контроля бортового комплекса оборудования летательных аппаратов / К. Ж. Саханов, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов, А. С. Жумабаева // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 2. – С. 89–91.

УДК 62.50 519.6

Северцев, Н. А.

Метод управления беспилотным летательным аппаратом с определенным запасом живучести / Н. А. Северцев, И. В. Прокопьев // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1(5). – С. 43–49.

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники
Российской Федерации, лауреат премий
Правительства Российской Федерации
и Совета Министров СССР, лауреат международной
Золотой медали Леонардо Да Винчи
в области изобретательства,
заведующий отделом ВЦ РАН
им. А. А. Дородницына
(119333, Россия, г. Москва ул. Вавилова, 40)
(495) 135-55-08,
E-mail: severcev@mail.ru

Прокопьев Игорь Витальевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
ВЦ РАН им. А. А. Дородницына
(119333, Россия, г. Москва ул. Вавилова, 40)
(495) 135-55-08,
E-mail: fvi-2003@mail.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
the honored worker of science and equipment
of the Russian Federation, the winner of awards
of the Government of the Russian Federation
and Council of ministers of the USSR,
the winner of the international Gold medal
Leonardo Da Vinci in the field of invention,
the head of department
of VTs Russian Academy of Sciences
of A. A. Dorodnitsyn
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Prokop'ev Igor' Vital'evich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
VTs Russian Academy of Sciences
of A. A. Dorodnitsyn
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia)

Аннотация. Рассмотрена задача синтеза живучей системы управления квадрокоптера. Управление должно обеспечивать движения квадрокоптера по пространственной траектории в условиях изменения предельных тяг винтов или различных ограничениях на управление. Решение ищется методом сетевого оператора. Приведен численный пример решения задачи синтеза.

Ключевые слова: синтез системы управления, живучесть, ограничения на управление.

Abstract. The problem of synthesis tenacious management system quadrocopter. Management should ensure that traffic quadrocopter spatial trajectories in a changing limiting rods or screws various constraints on management. The solution is sought by the network operator. A numerical example of solving the problem of synthesis.

Key words: synthesis of control systems, survivability, control constraints.