

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

УДК 62-8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ЗАВИСАНИЯ ОДНОМОТОРНОГО БЕСПИЛОТНИКА

© 2016 А. О. Коршок, В. Б. Фурсов

Воронежский государственный технический университет

*В данной работе изучается вертикальное перемещение и зависание беспилотного аппарата вертолетного типа. Рассматриваются три одновинтовые модели вертолета с трехфазным, двухфазным и однофазным бесконтактными двигателями постоянного тока с учетом реальных аэродинамических данных и сравниваются их полетные характеристики.*

*Ключевые слова: беспилотник, уравнение динамики вертолета, бесконтактный двигатель постоянного тока, математическая модель.*

Существует большое разнообразие многомоторных беспилотных аппаратов с вертикальным взлетом. Однако, надежность таких беспилотников обратно пропорциональна количеству двигателей. Поэтому представляет интерес исследование полетных характеристик одновинтовых аппаратов, но возникают проблемы с устойчивостью таких систем. В данном случае проводится моделирование, пока только, вертикального перемещения и зависания аппарата с одним винтом, наиболее важное в отношении устойчивости.<sup>1</sup>

Одновинтовые модели совершают вертикальное перемещение с возможностью зависания на заданной высоте. Вертикальное движение осуществляется за счет силы тяги, создаваемой несущим двухлопастным винтом. Для сохранения неизменной оси вращения в пространстве установлен гироскоп, состоящий из грузиков и стабилизирующего стержня. Гашения крутящего момента, создаваемого несущим винтом, происходит за счет спрямляющих лопастей, установленных под ним и имеющими противоположный угол атаки. Высота зависания задается и регулируется с помощью датчика расстояния,

реализованного на светодиоде и приемнике инфракрасного излучения.

В беспилотнике используется бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Двигатель питается от инвертора, который управляется сигналами с датчиков Холла.

На беспилотник при движении в вертикальной плоскости действуют подъемная сила несущего винта [1], вес и трение о воздух, направленное против скорости движения аппарата.

Уравнение второго закона Ньютона для вертикального движения центра масс беспилотника:

$$m \cdot a = P - B - G, \quad (1)$$

где  $m$  – масса вертолета;  $a$  – ускорение аппарата;  $P$  – подъемная сила;  $B$  – сила трения о воздух;  $G$  – вес беспилотника.

Подъемная сила направлена строго вверх и определяется согласно теории аэродинамики [1] следующим образом:

$$P = C_p \cdot S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $V$  – скорость набегающего потока;  $S$  – характерная площадь (площадь средней поверхности винта);  $C_z$  – коэффициент подъемной силы; определяется экспериментально или принимается приближительно исходя из угла атаки, и зависят от высоты полета, при незначительных изменениях  $\rho$  он может быть принят постоянным.

Коршок Артем Олегович – Центрально-Черноземный государственный инженерный университет, магистрант, e-mail: Simirald@yandex.ru.  
Фурсов Владимир Борисович – Центрально-Черноземный государственный инженерный университет, к. т. н., доцент, e-mail: fvb273@inbox.ru.

Учитывая, что скорость точки на окружности равняется

$$V = \omega \cdot r, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость винта;  $r$  – радиус окружности.

Уравнение (2) можно привести к виду:

$$P = \frac{C_z \cdot S \cdot \rho \cdot r^2}{2} \omega^2 = k\omega^2, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент параметров подъемной силы.

Зависимость подъемной силы от угловой скорости несущего винта является нелинейной. Для исследуемого объекта управляющей функцией является  $\omega$  – угловая скорость несущего винта, а управляемой переменной  $H$  – высота зависания вертолета (рис. 1).

Поскольку изменяемой величиной является высота, уравнение динамики вертолета запишется следующим образом

$$m \frac{d^2 H}{dt^2} + b \frac{dH}{dt} + mg = k\omega^2, \quad (5)$$

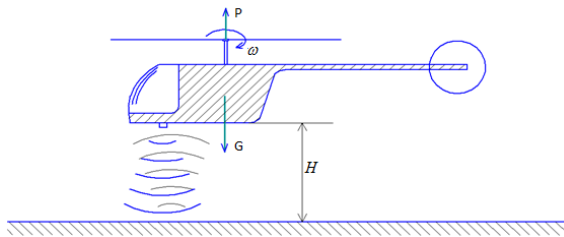


Рис. 1. Принцип управления беспилотником

Беспилотник оборудуется сенсорным инфракрасным датчиком для определения высоты, датчик предназначен для автоматического включения двигателя, при приближении на определенное расстояние к какой-либо поверхности и выключения при удалении от нее.

Математическое представление датчика

$$\begin{cases} f(H) = 1, \text{ если } H_z < H_p; \\ f(H) = 0, \text{ если } H_z > H_p, \end{cases} \quad (6)$$

где  $H_z$  – заданная высота;  $H$  – реальная высота.

Математическими моделями для трехфазного, двухфазного и однофазного БДПТ являются [2] системы уравнений (7), (7a) и (7б) соответственно.

$$\begin{cases} U_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} - \psi_m \cdot \sin(\varphi); \\ U_B = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} - \psi_m \cdot \sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_C = Ri_C + L \frac{di_C}{dt} - \psi_m \cdot \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right); \\ M_{\text{дв}} = -\psi_m [\sin(\varphi) \cdot i_A + \sin\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_B + \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_C]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_c, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} - p\omega \cdot \psi_m \sin(\varphi); \\ U_B = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} + p\omega \cdot \psi_m \cos(\varphi); \\ M_{\text{дв}} = p\psi_m [-\sin(\varphi) \cdot i_A + \cos(\varphi) \cdot i_B]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_c, \end{cases} \quad (7a)$$

$$\begin{cases} U = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega \cdot \psi_m \sin(\varphi); \\ M_{\text{дв}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\varphi} = -\psi_m \sin(\varphi) \cdot i; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_c, \end{cases} \quad (7б)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – напряжения на обмотках статора;  $L_A, L_B, L_C$  – собственные индуктивности фаз обмоток статора;  $R$  – активное сопротивление статора;  $i_A, i_B, i_C$  – токи протекающие через обмотку статора;  $\Psi_m$  – максимальный магнитный поток от постоянного магнита;  $\varphi$  – угол поворота ротора;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $M_{\text{дв}}$  – момент на валу двигателя;  $J$  – момент инерции ротора.

Основные параметры исследуемой модели:

Скорость вращения винта

$n = 2000$  об/мин;

Масса всей конструкции

$m = 0.04$  кг;

Мощность БДПТ

$N = 5.7$  Вт;

Коэффициент подъемной силы

$K = 10^{-5}$ ;

Коэффициент мощности

$K_m = 0.041$ .

Параметры среды:

Плотность воздуха

$\rho = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>;

Коэффициент вязкости

$$b = 6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}.$$

Математическая модель исследуемого беспилотника с трехфазным двигателем представлена на рисунке 2.

Совместные графики полета изображены на рисунке 3 (полет при постоянной высоте) и 4 (полет при переменной высоте 0,5-2-1,5 м).

### Выводы

1. Моделирование показало возможность стабильного подъема и зависания одномоторного беспилотного аппарата.

2. Из рассмотренных одно-, двух- и трехфазных БДПТ заданным условиям стабильности удовлетворяет беспилотный аппарат с трехфазным бесконтактным двигателем постоянного тока.

3. Модель с однофазным двигателем, не смотря на плохое качество полета, пригодна, например, для использования в качестве игрушки, широко известной как «летающая фея».

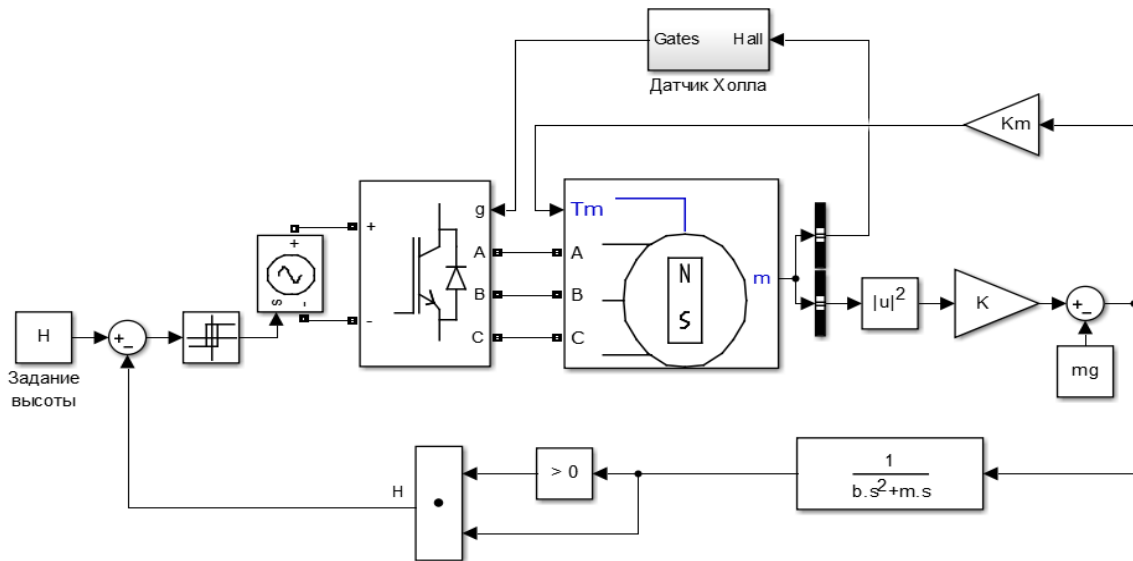


Рис. 2. Модель одновинтового беспилотника с трехфазным двигателем в среде Matlab

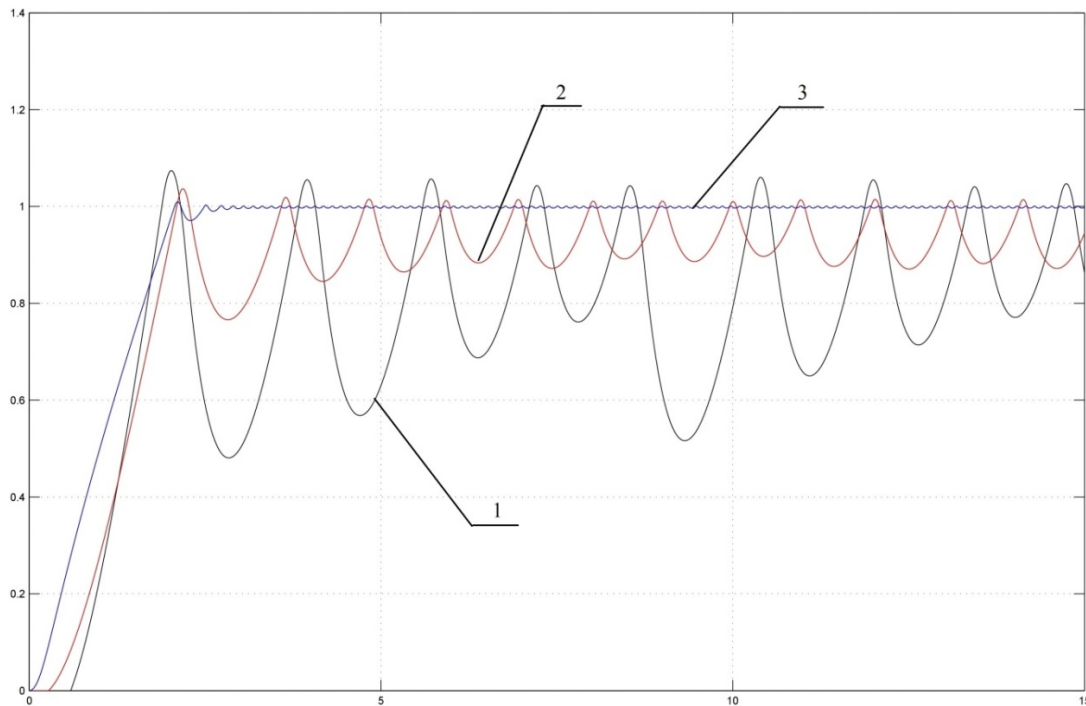


Рис. 3. Графики изменения высоты зависания  $H$  со временем при старте; однофазный (1), двухфазный (2) и трехфазный (3) двигатели при постоянной заданной высоте

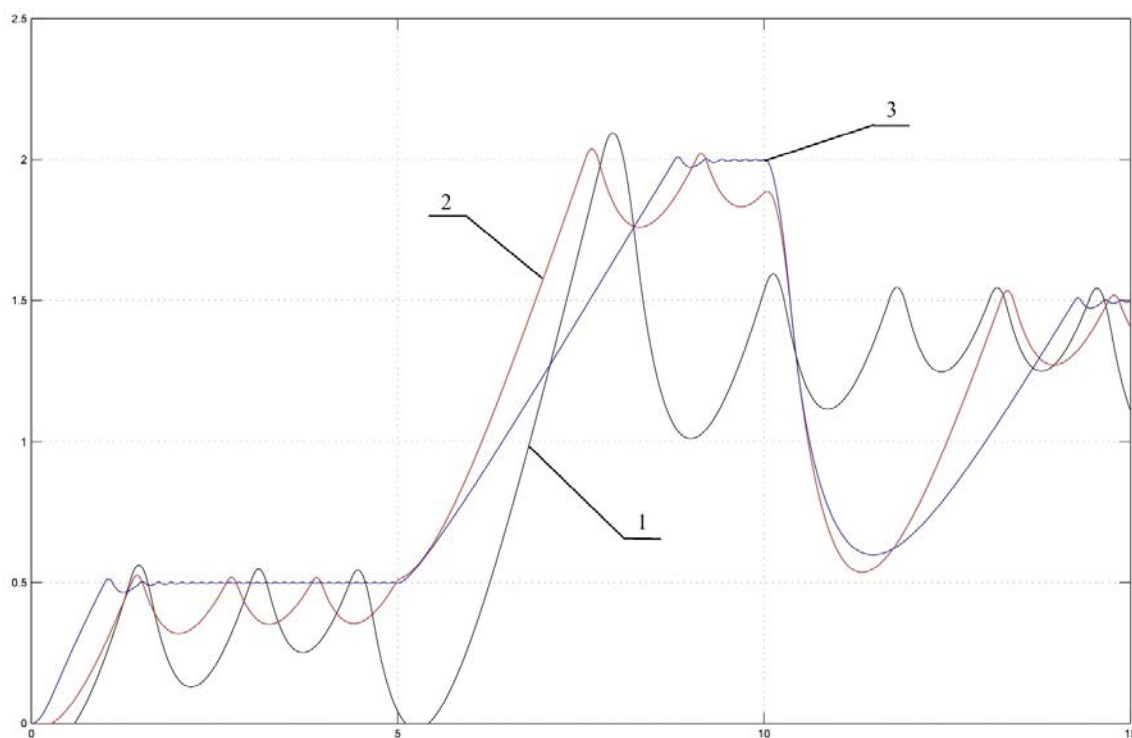


Рис. 4. Графики полета  $H(t)$ : однофазной (1), двухфазной (2) и трехфазной (3) модели при изменении задаваемой высоты

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спунда Б. Летающие модели вертолетов: Пер. с польск. / В. С. Каплина. – М.: Мир, 1988. – С. 23-30.
2. Фурсов, В. Б. Моделирование в системе SIMULINK: учеб. пособие / В. Б. Фурсов. – Воронеж: ВГТУ, 2008. – С. 35-39.

3. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 230 с.

#### MODELING VERTICAL MOVEMENT AND HOVERING OF SINGLE-ENGINE DRONE

© 2016 A. O. Korshok, V. B. Fursov

Voronezh State Technical University

*In this paper, we study the vertical movement and the hovering of unmanned helicopter type. We consider three models of single-rotor helicopter with three-phase, two-phase and single-phase contactless dc motor taking into account the actual aerodynamic data, and compared their flight characteristics.*

*Key words: drone, the dynamic equation of the helicopter, contactlessDC motor, mathematical model.*