

DOI 10.53364/24138614_2021_21_2_19

УДК 629.735.3

¹Семенюк В. В., ²Риттер Д.В., ³Петров П. А., ⁴Риттер Е.С., ⁵Сагимов А.Е.
^{1,2,3,4}Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, РК
⁵Авиационная администрация Казахстана, г. Нур-Султан, РК.

¹E-mail: Evdimid@mail.ru*

²E-mail: dritter@mail.ru

³E-mail: paolo1988@mail.ru

⁴E-mail: eritter@gmail.com

⁵E-mail: Arman.sagimov@aaq.kz

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПЕЧАТЬ БПЛА С АЛГОРИТМАМИ ЛОКАЛЬНОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ЖЕРГІЛІКТІ ПОЗИЦИЯЛАУ АЛГОРИТМДЕРІМЕН 3D МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ
БАСЫП ШЫҒАРУ
3D MODELING AND PRINTING OF UAVS WITH LOCAL POSITIONING
ALGORITHMS**

Аннотация. В данной статье рассматривается поэтапный процесс создания беспилотного летательного аппарата, включая выбор комплектующих, математическое моделирование, проектирование 3D-модели, высокоточная 3D-печать, тестирование, разработка ПО автопилота, проверка кода программы в локальной системе навигации. Авторы в заключительном разделе приводят направления совершенствования блока навигации БПЛА, а также перечисляет сферы применения данного устройства.

Ключевые слова: БПЛА (беспилотный летательный аппарат), локальная навигация, 3D-модель, 3D-печать, автопилот, испытание.

Аңдатпа. Бұл мақалада ұшқышсыз ұшу аппаратын құрудың біртіндеп процесі қарастырылады, оның ішінде компоненттерді таңдау, математикалық модельдеу, 3D модельді дизайн, жоғары дәлдіктегі 3D басып шығару, тестілеу, автопилоттық бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу, жергілікті навигацияда бағдарлама кодын тексеру. жүйе. Қорытынды бөлімде авторлар ұшқышсыз ұшу аппараттарының навигациялық қондырғысын жетілдіру бойынша нұсқаулар береді, сонымен қатар осы құрылғыны қолдану аймақтарын тізімдейді.

Түйін сөздер: ҰШҚ (ұшқышсыз ұшу аппараты), жергілікті навигация, 3D модель, 3D басып шығару, автопилот, тестілеу.

Abstract. This article discusses the step-by-step process of creating an unmanned aerial vehicle, including the choice of components, mathematical modeling, 3D model design, high-precision 3D printing, testing, autopilot software development, and program code verification in the local navigation system. The author in the final section gives directions for improving the UAV navigation unit, and also lists the scope of this device.

Keywords: UAV (unmanned aerial vehicle), local navigation, 3D-model, 3D-printing, autopilot, testing.

1. Введение. БПЛА (беспилотный летательный аппарат) в мире радиоэлектроники позиционируется как новое направление в программно-аппаратном проектировании

устройств и систем. Это обусловлено вовлечением подобной техники как в народное хозяйство, так и для личного пользования. Для инженеров-конструкторов компаний, производящих дроны (БПЛА) важно освоить полный цикл конструирования данных устройств, так как внедрение нового в «старый девайс» пройдет более безошибочно, если эксперт в курсе об особенностях программного обеспечения и элементной базы последнего.

2. Методы. Полный цикл разработки дрона инновационного типа включается в себя методы анализа характеристик устройств БПЛА, синтеза (создание из отдельных параметров единое целое), метод моделирования, метод научного эксперимента [2, 3]. Вышеперечисленные компоненты способствуют реализации целостного комплекса сборки беспилотного летательного аппарата: выбор комплектующих, математическое моделирование, проектирование 3D-модели, высокоточная 3D-печать, тестирование, разработка ПО автопилота, проверка кода программы в локальной системе навигации.

3. Результаты. Начиная с первого этапа создания новой модели БПЛА необходимо априори поставить задачи синтеза, так называемые параметры, на которые должен равняться дрон на всех стадиях проектирования. К таким техническим характеристикам относятся:

- дальность полета: 1 км;
- продолжительность полета: 20-25 мин.;
- режим FPV;
- режим автопилота;
- бортовой режим обработки данных нейронной сети;
- взлетный вес 1500-1800 гр.

Оценив вышеуказанные требования подобраны следующие комплектующие БПЛА:

- Мотор DYS D2822-14 1450KV Brushless Motor. 4 штуки;
- Регулятор DYS 30A 2-4S Brushless Speed Controller ESC Simonk Firmware;
- Пропеллеры DYS E-Prop 8×6 8060 SF ABS Slow Fly Propeller Blade For RC Airplane;
- NAZA M LITE + GPS Модуль управления + GPS-приемник;
- Аккумуляторная батарея GENS ACE TATTU LIPO 5200 MAH 11.1 V 35C 3S1P;
- Пульт управления в комплекте с приемо-передатчиком DJI DT7 + DR16;
- Модуль автопилота Emlid Navio2;
- Камера Runcam Split.

При проектировании корпуса дронов необходимо учитывать ряд требований:

- оптекаемая форма с целью минимизации пагубного влияния вихревых воздушных потоков;
- герметичный корпус, защищающий внутренние радиоэлектронные компоненты от влияний условий среды: дождь, сильный ветер, снег;
- механическая прочность, обеспечивающая надежную защиту дрона при падениях, столкновениях в период испытаний [1, 9, 10].

Учитывая отмеченные факторы, в программе CINEMA 4D R19068 STUDIO на основе операций экструдирования и вдавливания во внутрь над графическими примитивами Cube (куб), Torus (тор), Cylinder (цилиндр) разработаны следующие 3D-модели;

- шасси (4 ножки);
- основание для крепления рамы (рис. 1а);
- нижняя крышка корпуса БПЛА (рис. 1б);
- верхняя крышка корпуса;
- кронштейны (рис. 1в) для крепления шасси к раме (4 шт.);
- рамы (4 шт.);

- крепеж для камеры;
- сборочная 3D-модель (рис. 1г).

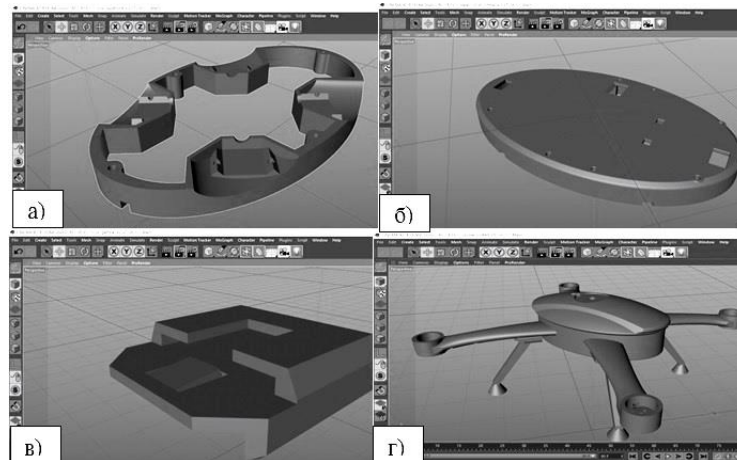


Рисунок 1. а) Основание для крепления рамы; б) Нижняя крышка корпуса БПЛА; в) Кронштейн для крепления шасси к раме; г) Сборочная 3D-модель

Выбор метрических параметров (высота с шасси 28 см, длина и ширина 15 см, длина рамы 11 см), формы БПЛА обусловлен предварительным математическим анализом, исходя из структурно-функциональной схемы модели (рисунок 2) [3, 4]. На данном эскизе представлены угловые скорости винтов ω , подъемная сила Z_b и крутящий момент моторов τ_{M_1} .

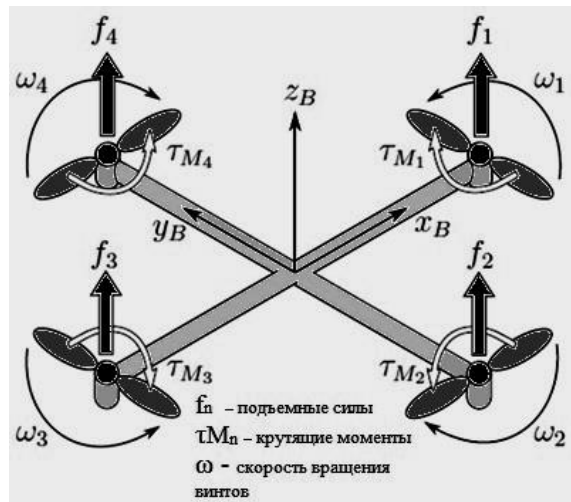


Рисунок 2. Структурно-функциональной схемы модели БПЛА

Согласно общей формуле (1) определяется подъемные силы и крутящие моменты:

$$f_i = k\omega_i^2, \tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega}_i. \tag{1}$$

Где где k – подъемный коэффициент и b – коэффициент крутящего момента моторов, а I_M - момент инерции винта. Так как винт очень легкий, эффект $\dot{\omega}_i$ обычно опускается. Будем считать, что величины k и b известны нам неточно. Объединяя подъемные силы четырех моторов, получим тягу T , направленную вдоль оси аппликат в связанной с телом системе координат (z_B). Общий крутящий момент τ_B состоит из крутящих моментов, направленных по углам Эйлера связанной системы координат τ_φ , τ_θ и τ_ψ (угол крена, тангажа и рыскания соответственно) [5].

Сборка модели БПЛА и тестирование его функциональных возможностей включает следующие этапы:

- 3D-печать готовых элементов БПЛА с помощью слайсера CURA 15.04.06 и принтера Ultimaker 2+ ;
- Соединение отдельных распечатанных элементов каркаса дрона в единую модель (рис.3) и расположение радиоэлектронных компонентов внутри герметичного корпуса;
- Тестирование устройства (рис. 4): набор высоты, поворот по углу крена, тангажа, рыскания, динамика скорости, торможения, проверка работоспособности автопилота.



Рисунок 3. БПЛА после процесса сборки

В процессе тестирования устройства расчеты подтверждены опытным путем, которые основаны на математическом анализе согласно формулам (2-4).

$$m\dot{V}_B + v \times (mV_B) = R^T G + T_B \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T}{m} \begin{bmatrix} C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi \\ S_\psi S_\theta C_\phi + C_\psi S_\phi \\ C_\theta C_\phi \end{bmatrix} - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = g\theta - \frac{A_x}{m} \dot{x} \\ \ddot{y} = g\phi - \frac{A_y}{m} \dot{y} \\ \ddot{z} = \frac{k}{m} (u_1 + u_2 + u_3 + u_4) - \frac{A_z}{m} \dot{z} \\ \ddot{\phi} = \frac{kl}{l_x} (u_4 - u_2) \\ \ddot{\theta} = \frac{kl}{l_y} (u_3 - u_1) \\ \ddot{\psi} = \frac{b}{l_z} (u_1 - u_2 + u_3 - u_4) \end{array} \right. \tag{4}$$

Согласно формуле (2) сила, необходимая для ускорения массы $m\dot{V}_B$ и центробежная сила $v \times (mV_B)$ равны гравитации $R^T G$ и общей тяге моторов T_B .



Рисунок 4. Фрагмент с испытания БПЛА

Формула (3) получена с упрощением сложных динамических взаимодействий. Для того, чтобы добиться более реалистичного поведения БПЛА, учитывается сила сопротивления воздуха. Где A_x, A_y и A_z коэффициенты сопротивления воздуха в направлении соответствующих осей абсолютной системы координат [6, 7].

Формулой (4) представлена линеаризованная математическая модель дрона, где u – квадрат угловой скорости винта.

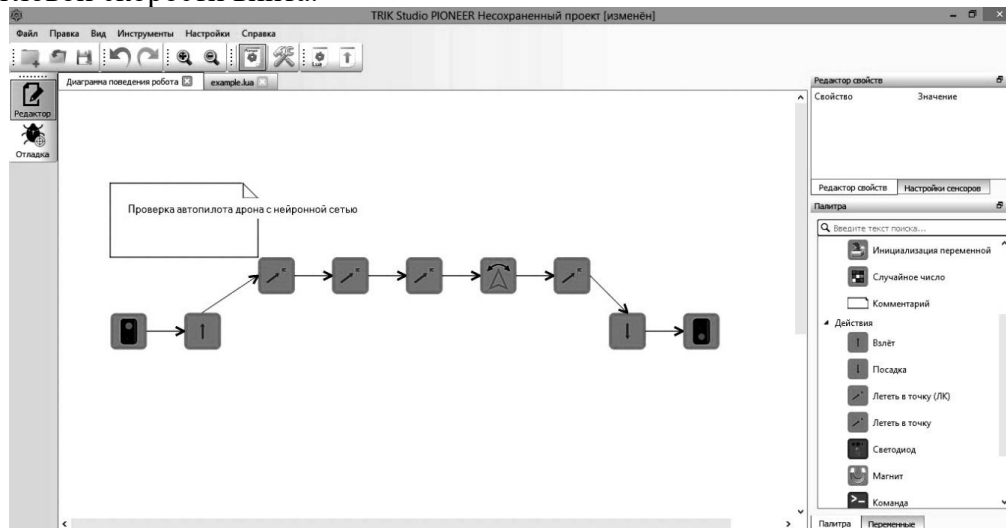


Рисунок 5. Создание маршрута автопилота в программе TRIK Studio

Проверка автопилота осуществлялась с помощью приложения Trik Studio, Pioneer Station, программы LPS, навигационной системы: плата USNav_2.1, бокс с натянутой сеткой, 4 ультразвуковых датчиков для местной навигационной системы [8].

В приложении TRIK Studio в объектно-ориентированном режиме собирается схема (рис. 5), которая соответствует автоматическому полету дрона по координатам: A (1;1;1),

В (1;1,5;1), С (1;2;1), D (2;1;1,5), изменение угла рыскания на 30 градусов. Далее автопилот через приложение Pioneer Station загружает написанный скетч и демонстрирует полет БПЛА в пределах локальной навигационной системы.

Листинг кода, задающий траекторию автопилота в приложении Pioneer Station представлен на рис 6, 7. На рис. 6 показан фрагмент кода, определяющий функции перехода в новое состояние (перелет с одной точки в другую по координатам, поворот на угол 30 градусов). На рисунке 7 демонстрируется функции обработки состояний (команды взлета, траектории полета дрона, посадки).

```
36
37     -- переход в следующее состояние
38     curr_state = "_GEO_LANDING_1"
39 end,
40 ["_GEO_LANDING_1"] = function (x)
41     ap.push(Ev.MCE_LANDING)
42
43     -- переход в следующее состояние
44     curr_state = "_FINAL_NODE_1"
45 end,
46 ["_FINAL_NODE_1"] = function (x)
47     -- выключение двигателей и конец программы
48     ap.push(Ev.ENGINES_DISARM)
49     curr_state = "NONE"
50
51 end,
52 }
53
54 -- функция обработки событий, автоматически вызывается автопилотом
55 function callback(event)
56     if (event == Ev.ALTITUDE_REACHED) then
57         action[curr_state]()
58     end
59
60     if (event == Ev.POINT_REACHED) then
61         action[curr_state]()
62     end
63
64     if (event == Ev.COPTER_LANDED) then
65         sleep(2)
66         action[curr_state]()
67     end
68 end
69
70 -- вызов функции из таблицы состояний, соответствующей первому состоянию
71 action[curr_state]()
<
```

Рисунок 6. Функции перехода в новое состояния

```
54 -- функция обработки событий, автоматически вызывается автопилотом
55 function callback(event)
56     if (event == Ev.ALTITUDE_REACHED) then
57         action[curr_state]()
58     end
59
60     if (event == Ev.POINT_REACHED) then
61         action[curr_state]()
62     end
63
64     if (event == Ev.COPTER_LANDED) then
65         sleep(2)
66         action[curr_state]()
67     end
68 end
69
70 -- вызов функции из таблицы состояний, соответствующей первому состоянию
71 action[curr_state]()
```

Рисунок 7. Функции обработки событий

4. Заключение. Согласно проведенным испытаниям модели БПЛА в реальных условиях в режиме LPS полета, заданий по GPS траекториям, построению ортофотопланов микрорайонов города Петропавловск (Республика Казахстан) выявлены недостатки:

- отсутствие сенсорной системы преодоления препятствий;

- отсутствие возможности удаленного слежения за объектом в режиме клиента (только оператору в режиме реального времени доступна возможность визуализации полетного задания на экране планшета или смартфона);

- модель не эффективно применять в поисковых работах по причине отсутствия программной базы идентификации личности, различения объектов.

Вышеуказанные недостатки можно упразднить за счет внедрения программно-аппаратного комплекса искусственной нейронной сети (сиамские алгоритмы), IP-протокола передачи данных на базе цифровой мобильной связи 4G, микрополосковых фазированных антенных решеток (ФАР) или ультразвуковых датчиков.

Текущую модель без прогрессивных модификаций в виде ФАР и искусственного интеллекта можно использовать в следующих целях:

- построения ортофотопланов местности;
- создания 3D-моделей объектов города;
- определении площади посевных площадей в крестьянских хозяйствах и ТОО;
- в сфере кадастрового учета;
- в учебных целях (организация кружков авиамоделирования в сфере дополнительного и высшего образования);
- в спортивных целях (хакатон по беспилотным летательным аппаратам).

Список литературы

1. Ронцзюнь Цинь, Сяньфэн Хуан, Армин Грюн. Проект БПЛА - Создание реалистичной 3D-модели кампуса Национального университета Сингапура // 33-я Азиатская конференция по дистанционному зондированию 2012, ACRS 2012.

2. Гурьянов А.Е. Моделирование системы автоматического управления квадрокоптером на основе Л1 адаптивного управления // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. №8. С. 522-533.

3. Колотов М.Е. Синтез робастных регуляторов для управления квадрокоптером. Выпускная квалификационная работа. СПбГУ. 2016. С. 4-12. (<https://nauchkor.ru/uploads/documents/587d365b5f1be77c40d58d99.pdf>)

4. Семенова Л.Л. Моделирование фильтра калмана для оценки вектора состояний, описывающего перемещение БПЛА // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций севера России – 2020. Сборник статей I всероссийской с международным участием научно-практической онлайн-конференции. 2020. С. 305-309.

5. Попов А., Миллер А., Степанян К., Миллер Б. Моделирование процесса навигации БПЛА с использованием двух бортовых камер, смещенных по высоте / Сборник трудов 41-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН "Информационные технологии и системы 2017". 2017. 260 с.

6. Дауылбаев Б.А. Особенности использования БПЛА для 3д моделирования // Формул молодых ученых. Учредители: ООО "Институт управления и социально-экономического развития" (Саратов). 2018. №4(20). С. 402-407.

7. Хлебникова Т.А., Опритова О.А. Экспериментальные исследования современных программных продуктов для моделирования геопространства по материалам БПЛА // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. №4(1). С. 3-6.

8. Нгуен К.Т., Нгуен Т.Л., Ву А.Х., Нгуен Н.З. Имитационное моделирование многоцелевой системы БПЛА оптимальной структуры на основе обобщенного метода динамических сгущений / Дистанционные образовательные технологии. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор В.Н. Таран. Симферополь, 2020. С. 248-252.

9. Иглесиас Л., Де Сантос-Бербель С., Паскуаль В., Кастро М. Моделирование программного обеспечения автопилота БПЛА на основе моделей // Использование малого беспилотного летательного аппарата в 3D-моделировании автомобильных дорог с обочинами, покрытыми деревьями, для оценки дальности видимости // Дистанционное зондирование. 2019. 11(22), 2625. Стр. 1-13.

References

1. Ronszn Sin, Sяnfen Huan, Armin Grn. Proekt BPLA - Sozdanie realistichnoi 3D-modeli kampuasa Nasionalnogo universiteta Singapura // 33-я Aziatskaja konferensija po distansionnomu zondirovani 2012, ACRS 2012.

2. Gurяnov A. E. Modelirovanie sistemy avtomaticheskogo upravlenija kvadrokopterom na osnove L1 adaptivnogo upravlenija // Inženernyi vestnik. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. jurn. 2014. №8. S. 522-533.

3. Kolotov M.E. Sintez robastnyh reguljatorov dlja upravlenija kvadrokopterom. Vypusknaja kvalifikacionnaja rabota. SPBGU. 2016. S. 4-12. (<https://nauchkor.ru/uploads/documents/587d365b5f1be77c40d58d99.pdf>)

4. Semenova L.L. Modelirovanie filtra kalmana dlja osenki vektora sostojanii, opisyvaego peremeenie BPLA // Problemy elektroenergetiki i telekommunikasii severa Rossii – 2020. Sbornik statei I vsrossiiskoi s mejdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoi onlain-konferensii. 2020. С. 305-309.

5. Popov A., Miller A., Stepanяn K., Miller B. Modelirovanie prosessa navigasii BPLA s ispolzovaniem dvuh bortovyh kamer, smeennyh po vysote / Sbornik trudov 41-i mejdissiplinarnoi školy-konferensii İPPI RAN "İnformasionnye tehnologii i sistemy 2017". 2017. 260 s.

6. Dauylbaev B.A. Osobennosti ispolzovanija BPLA dlja 3d modelirovanija // Formul molodyh uchenyh. Uchrediteli: ООО "İnstitut upravlenija i sosialno-ekonomicheskogo razvitija" (Saratov). 2018. №4(20). S. 402-407.

7. Hlebnikova T.A., Opritova O.A. Eksperimentalnye issledovanija sovremennyh programmnyh produktov dlja modelirovanija geoprostranstva po materialam BPLA // İnterekspo GEO-Sibir. 2017. №4(1). S. 3-6.

8. Nguen K.T., Nguen T.L., Vu A.H., Nguen N.Z. İmitasionnoe modelirovanie mnogoselevoi sistemy BPLA optimalnoi struktury na osnove obobënnogo metoda dinamicheskikh sguenii / Distansionnye obrazovatelnye tehnologii. Sbornik trudov V Mejdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferensii. Otvetstvennyi redaktor V.N. Taran. Simferopol, 2020. 2020. S. 248-252.

9. İglesias L., De Santos-Berbel S., Paskual V., Kastro M. Modelirovanie programmogo obespechenija avtopilota BPLA na osnove modelei // İspolzovanie malogo bespilotnogo letatel'nogo apparata v 3D-modelirovanii avtomobilnyh dorog s obochinami, pokrytymi derevjami, dlja osenki dalnosti vidimosti // Distansionnoe zondirovanie. 2019. 11(22), 2625. S. 1-13.