

**Информация об авторах**

**Сеledgeв Константин Павлович** – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kostyans7kss@gmail.com

**Грузин Геннадий Григорьевич** – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: margeni@mail.ru

**Мельниченко Олег Валерьевич** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru

**Портной Александр Юрьевич** – д. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: portnoyalex@yandex.ru

**Линьков Алексей Олегович** – к. т. н., доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: linkovalex@mail.ru

**Information about the authors**

**Konstantin P. Seledtsov** – Graduate student of the Department Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kostyans7kss@gmail.com

**Gennadii G. Gruzin** – Graduate student of the Department Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: margeni@mail.ru

**Oleg V. Mel'nichenko** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru

**Aleksandr Yu. Portnoi** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: portnoyalex@yandex.ru

**Aleksei O. Lin'kov** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: linkovalex@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).136-143

УДК 373.167.1:519.1:004.9

## Создание модели беспилотного летательного аппарата для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области

О. В. Кузьмин, М. В. Лавлинский ✉

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ LavlinskiMV@mail.ru

**Резюме**

Пожары – одна из самых больших проблем Иркутской области. Ежегодно горят тысячи гектаров леса и с каждым годом ситуация ухудшается. В 2019 г. площадь лесов, уничтоженных огнем, составила примерно 1,5 млн га. Аэрофотосъемка для контроля окружающей среды использовалась еще в прошлом веке. Современные технологии позволили существенно расширить возможности мониторинга с воздуха и сделать его более доступным, что, в свою очередь, способствует оперативному предотвращению возникающих экологических проблем и оказанию помощи МЧС, в том числе и в решении ситуаций, связанных с лесными пожарами. Таким образом, целью статьи является описание разработки компьютерных методов проектирования беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для контроля МЧС пожарной обстановки в отдаленных и северных районах Иркутской области. Существует четыре вида лесных пожаров: подземный (торфяной), полевой (степной), верховой и низовой. Каждый вид имеет свои особенные характеристики – территория распространения, скорость, площадь, форма и температура очага. Однако, несмотря на различия, возможность эффективного применения беспилотных летательных аппаратов имеется в каждом случае. Классификация беспилотных летательных аппаратов помогла более точно определить оптимальную концепцию беспилотника для отдаленных и северных районов Иркутской области. Для визуализации и компьютерных испытаний была разработана трехмерная модель с помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks 2019. В дальнейшем планируется с использованием возможностей программы SolidWorks провести инженерный анализ модели, исследовать ее физические свойства и организовать компьютерные эксперименты. Применение данной программы также позволит создать полный комплект конструкторской документации в соответствии с Единой системой конструкторской документации.

**Ключевые слова**

беспилотный летательный аппарат, пожар, Иркутская область, трехмерная графическая модель, SolidWorks

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-41-385001.

**Для цитирования**

Кузьмин О.В. Создание модели беспилотного летательного аппарата для помощи в решении проблемы пожаров в Иркутской области / О.В. Кузьмин, М.В. Лавлинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 136–143. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).136-143

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 25.02.2020, поступила после рецензирования: 16.03.2020, принята к публикации: 29.03.2020

## Creating a model of an unmanned aerial vehicle for help in solving the fire problem in the Irkutsk region

O. V. Kuz'min, M. V. Lavlinskyi✉

Irkutsk State University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ LavlinskiMV@mail.ru

**Abstract**

Fires are one of the biggest problems in the Irkutsk region. Thousands of hectares of forest burn annually and the situation worsens every year. In 2019, the area of forests destroyed by fire is approximately 1.5 million hectares. Aerial photography for environmental control was used as early as in the last century. Modern technologies have made it possible to significantly expand monitoring capabilities from the air and make it more accessible, which, in turn, helps to quickly prevent and correct emerging environmental problems and help the Ministry of Situations, as well as in solving the problem of forest fires. Thus, the aim of the work is to develop computer-based unmanned aerial vehicle design methods designed to help the Ministry of Emergency Situations in solving the problem of fires in the remote and northern areas of the Irkutsk region. There are four types of forest fires: underground or peat, field or steppe, crown and creeping. Each type has its own special characteristics: propagation territory, speed, area, shape and temperature of the outbreak. However, despite the differences, the possibility of the effective use of unmanned aerial vehicles exists in each case. The classification of unmanned aerial vehicles helped to more accurately determine the optimal drone concept for remote and northern areas of the Irkutsk region. For visualization and computer testing, a three-dimensional model was developed using the SolidWorks 2019 computer-aided design system. In the future, it is planned, using the capabilities of the SolidWorks program, to carry out an engineering analysis of the model, investigate its physical properties and organize computer experiments. The use of this program also allows one to create a complete set of design documentation in accordance with the Unified system of design documentation.

**Keywords**

unmanned aerial vehicle, fire, Irkutsk region, three-dimensional graphic model, SolidWorks

**Acknowledgements**

The reported study was funded by RFBR and the Government of the Irkutsk Region, project number 20-41-385001.

**For citation**

Kuz'min O.V., Lavlinsky M.V. Creating a model of an unmanned aerial vehicle for help in solving the fire problem in the Irkutsk region [Sozдание modeli bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya pomoshchi v reshenii problem pozharov v Irkutskoi oblasti]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 136–143. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).136-143

**Article Info**

Received: 25.02.2020, Revised: 16.03.2020, Accepted: 29.03.2020

**Введение**

Пожары – одна из самых больших проблем Иркутской области. Ежегодно горят тысячи гектаров леса и с каждым годом ситуация ухудшается. В 2019 г. по данным ТАСС [1] площадь лесов, уничтоженных огнем, приблизительно составила 1,5 млн га. Согласно инфографике данных Правительства Иркутской области и Рослесхоза о площади пожаров за 2015–2017 гг. расхождения доходят до 182 тыс. га. Ситуация улучшилась в 2017 г., расхождение составило 16 тыс. га, однако в пиковый период активности пожаров данные могут различаться на 170 тыс. га.

Такое расхождение можно списать на дымный шлейф, идущий по уже выгоревшему или потушенному участку леса, однако, безусловно, бывали случаи, когда у Правительства региона просто не было данных о пожаре на участке.

Детектирование дыма на видеопоследовательности имеет существенное значение для раннего обнаружения пожара на открытых пространствах, так как дым обычно становится видимым раньше пламени. Основными признаками визуального обнаружения дыма являются наличие движения, специфические цвет и форма объектов на видеоизображении [2].

Для улучшения ситуации необходим мониторинг очагов возгораний в основные периоды пожаров для своевременного выявления пожара и минимизации ущерба. В свою очередь, мониторинг можно осуществить при помощи камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), затем обрабатывать информацию и определять, есть ли пожар в данной области [3, 4]. В случае густого дыма или торфяного пожара возможно использование датчика диоксида углерода CO<sub>2</sub>.

Аэрофотосъемка для контроля окружающей среды использовалась еще в прошлом веке. Современные технологии позволили существенно расширить возможности мониторинга с воздуха и сделать его

более доступным, что, в свою очередь, способствует оперативному предотвращению возникающих экологических проблем и оказанию помощи МЧС (поиск объекта на местности и оптимальных маршрутов, локализация очагов возгорания). Наличие таких возможностей связано с бурным развитием БПЛА и информационных технологий [5–7].

### Постановка задачи

В последние годы БПЛА приобретают все большую значимость и находят широкое применение в различных сферах жизнедеятельности общества. Автономные кибернетические системы, к которым относятся, в частности, и БПЛА, проектируются и разрабатываются с учетом специфики контекста планируемой работы, как правило, предполагающей затрудненные условия.

Целью данной работы является описание разработанных компьютерных методов проектирования БПЛА, предназначенных для помощи МЧС в решении проблемы пожаров в отдаленных и северных районах Иркутской области.

### Возможности применения беспилотных летательных аппаратов

Далее более детально рассмотрим возможности применения БПЛА в случае пожаров разных видов (табл. 1). Применение БПЛА возможно в случае пожаров всех видов.

### Выбор схемы беспилотного летательного аппарата

Далее был определен наиболее подходящий вид беспилотника для его эксплуатации в условиях отдаленных и северных районов Иркутской области. Для этого с опорой на работу «Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления» [8] была построена схема типа дерева классификации (рис. 1).

Затрудненные условия предполагают большую динамичность параметров объекта управления, автономность управления, запаздывания, разнообразие ситуаций, неполноту контроля внешних воздействий, наличие помех, изменчивость целей, критериев, ограничений. Технические возможности киберфизических систем должны разрабатываться с учетом условий работы, содержать продвинутые методы сбора и оценки данных, построения оптимальных путей принятия решений.

В качестве способа управления БПЛА был вы-

Таблица 1. Возможности применения беспилотных летательных аппаратов при пожарах  
Table 1. The possibility of using unmanned aerial vehicles in fires

<i>Вид пожара</i>	<i>Основные характеристики</i>	<i>Возможность применения беспилотных летательных аппаратов</i>
Подземный или торфяной	Территория болот, места добычи торфа, высушенные болота. Нет открытого огня и много дыма во время глени торфа. Пожар может протекать в любое время года по причине того, что очаг скрыт от осадков	Установление места пожара необходимо производить при помощи камеры, определяя место нахождения беспилотного летательного аппарата в дыму. После обнаружения облака дыма подключается датчик CO <sub>2</sub> для определения концентрации дыма, содержащегося в воздухе. На основе сделанных замеров концентрации дыма можно отличить дымный шлейф при отдалении пожара от беспилотника, а также по заранее написанный программе полета можно будет патрулировать территории болот
Полевой или степной	Территория сухостоя на полях или степях. Опасность в скорости распространения. Достаточно большая площадь пожаров в связи с большой скоростью возгорания. Вытянутая форма пожаров	Датчики дыма не всегда полезны по причине большой скорости пожара, вследствие чего дымный шлейф может быть сильно удален от очага. Камера может определять очаг возгорания с помощью искусственного интеллекта (ИИ) на основе снимков пожаров по форме, а также по скорости движения очага
Верховой пожар	Скорость распространения от 5 до 70 км/ч. Температура очага пожара примерно 900–1 200 °С. Возникает на территории разновозрастного леса, леса с низко опущенными кронами, с хвойным подростом. Пожар имеет яйцевидную форму	Установление пожара с помощью камеры за счет определенной формы данного типа пожара на основе ИИ. С помощью расчетов высоты относительно масштаба местности возможно научить ИИ отличать управляемые очаги (костры) от пожара. Возможно использование датчиков CO <sub>2</sub> для подтверждения наличия очагов возгорания или же управляемых очагов (костра)
Низовой пожар	Скорость распространения от 0,25 до 5 км/ч. Температура очага пожара примерно 700 °С. Пламя до 2,5 м. Возникает на территории разновозрастного леса, обходит влажные места	Определение шлейфа дыма и его повышенной концентрации на месте возгорания. Сухой кустарниковый и травяной ярусы в совокупности с большой скоростью дают вытянутый очаг возгорания. Определение пожара на основе заранее обученного ИИ за счет вытянутой формы пожара и большой скорости распространения

бран дистанционно-пилотируемый, который осуществляется в двух режимах:

– ручное управление оператором в режиме реального времени;

– автоматизированное управление, осуществляемое автономно, с возможностью его корректировки [9].

Во втором случае предварительно вводят координаты точек маршрута, определяя текущее положение летательного аппарата посредством навигации.

При исследовании и разработке сложных киберфизических систем, важным инструментом исследования является рассмотрение их как многоуровневых систем или систем с иерархической структурой [10, 11]. Иерархические структуры расцениваются при этом как частный случай частично упорядоченных множеств. Процесс поэтапного построения решения многокритериальных задач с иерархическими структурами часто может быть интерпретирован как траектория на конечной решетке [12, 13], описывающей соответствующее ему частично упорядоченное множество [14]. Важным частным случаем иерархической структуры является класс пирамидальных структур, называемых обобщенными пирамидами Паскаля [15]. Предложена схема построения комбинаторных чисел и полиномов на основе обобщенной пирамиды Паскаля. Разработка и исследование новых арифметических, комбинаторных и геометрических свойств арифметических треугольников и пирамид, являющихся обобщениями

треугольника Паскаля, имеют как фундаментальную, так и прикладную математическую ценность [16–18].

В статье О.В. Кузьмина [19] предложен способ построения и прогноза качественных характеристик навигационных маршрутов путем совмещения бинарных матриц и целочисленных решеток. Приводятся условия параметризации бинарной матрицы и целочисленной решетки с учетом практических задач.

Этот способ позволяет в режиме реального времени проводить исследования необходимой местности и объектов [20]. При этом оператор имеет возможность при необходимости управлять БПЛА или вносить изменения в заданный маршрут.

По типу конструкции существует два типа БПЛА: вращающегося и фиксированного крыла. При исследовании применялись БПЛА фиксированного крыла – это беспилотные самолеты, в которых для получения подъемной силы используется прямой толчок по фиксированному крылу. Такие БПЛА имеют преимущество в скорости и устойчивости к различным климатическим условиям.

По размеру и массе проектируемый беспилотник подходит в категорию тактических среднего диапазона: взлетная масса (кг) – 150–500; высота полета (м) – 3 000–5 000; время полета (ч) – 6–10.

После того, как мы установили вид БПЛА, определим необходимое оборудование для полета:

- главный силовой агрегат (ДВС);
- комплект «Arduino Uno»;

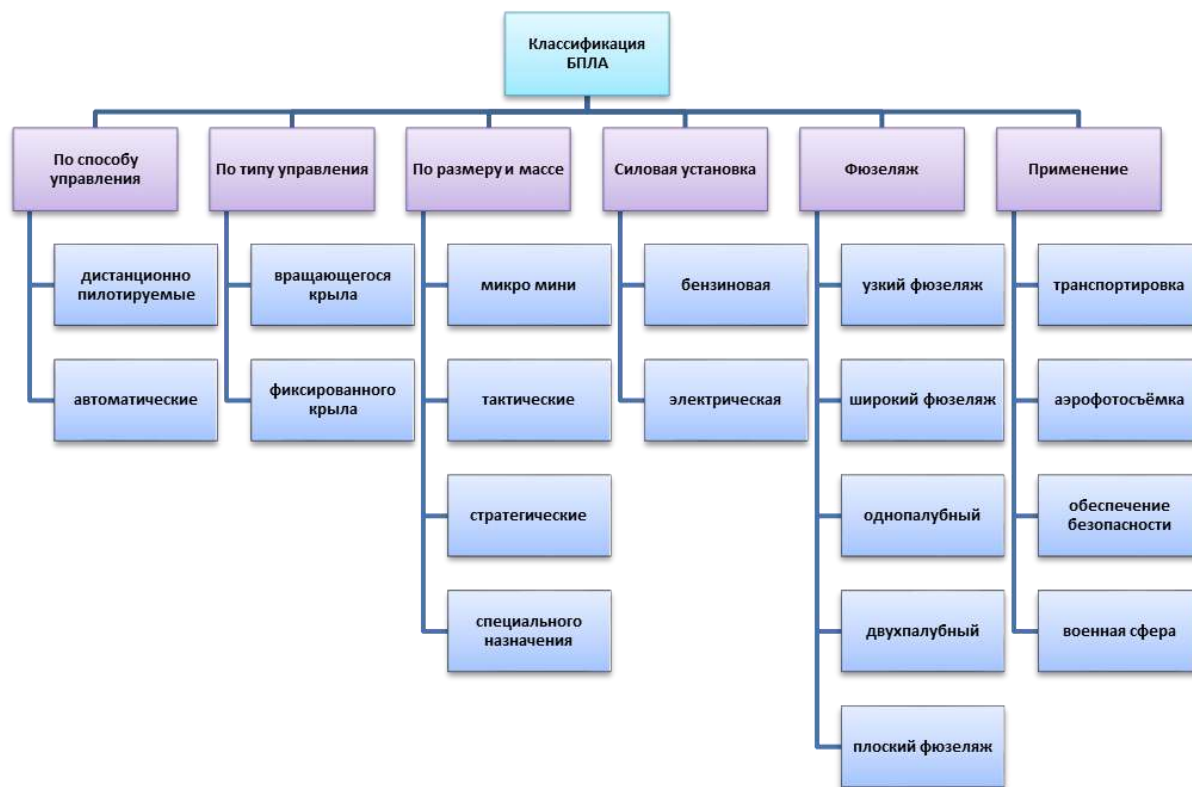


Рис. 1. Классификация беспилотных летательных аппаратов

Fig. 1. Classification of unmanned aerial vehicles

– сервомоторы для реализации таких органов управления, как руль крена / тангажа / рысканья и управление ДВС;

– передатчик сигнала для возможности управления на дальних расстояниях в случае сбоя автопилота;

– камера для возможности наблюдения за процессом полета в реальном времени;

– барометр для определения высоты полета;

– гироскоп для определения угла крена / тангажа / рысканья и углового ускорения для определения скорости;

– GPS-модуль для определения местоположения БПЛА.

При конструировании было выбрано следующее необходимое оборудование для определения очагов пожара: одноплатный компьютер (Raspberri Pi 4); датчик CO<sub>2</sub>; аккумуляторная батарея; камера; передатчик; антенна для возможности дальней передачи.

### Результаты исследования

Разработана концепция БПЛА и создана его компьютерная трехмерная модель (рис. 2–5) с помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks 2019, построенной на базе платформы Dassault Systèmes «3DEXperience». Система охватывает весь процесс разработки промышленных изделий и, в частности, помогает решать сложные задачи, возникающие при конструировании деталей.

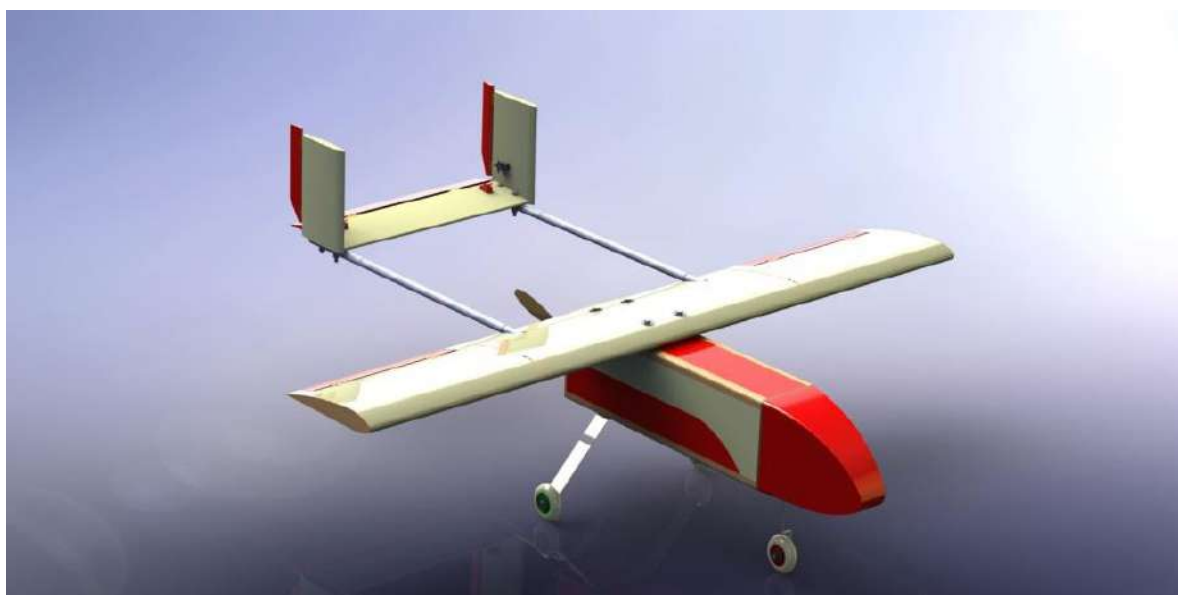


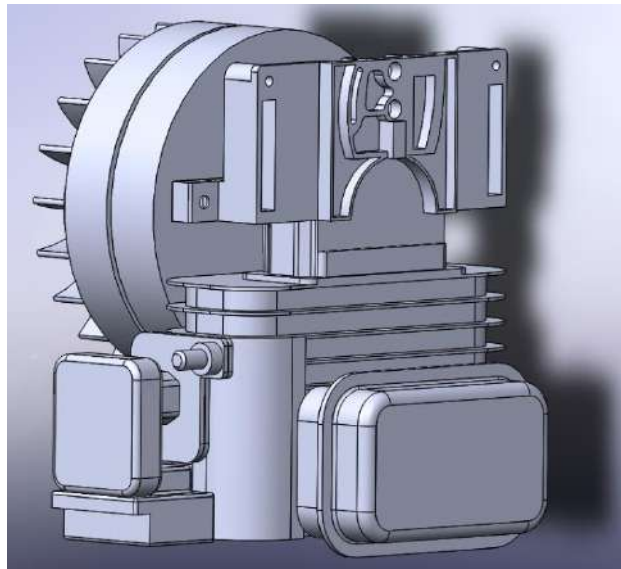
Рис. 2. Модель беспилотного летательного аппарата (вид спереди)

Fig.2. A model of an unmanned aerial vehicle (front view)



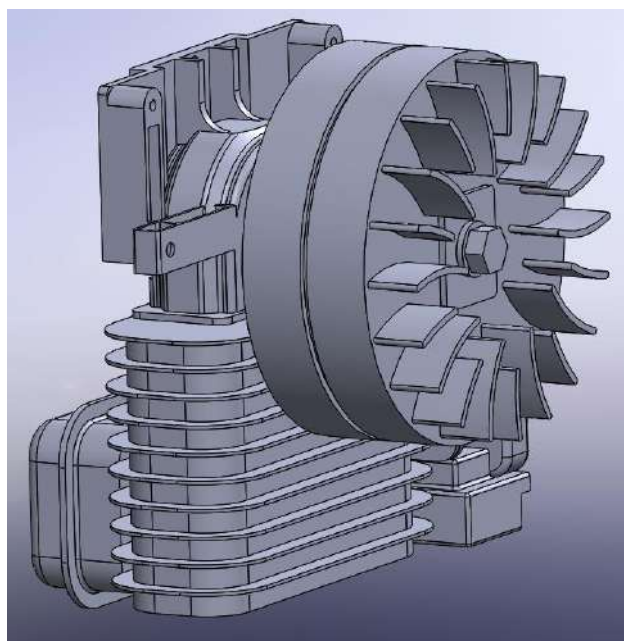
Рис. 3. Модель беспилотного летательного аппарата (вид сзади)

Fig. 3. A model of an unmanned aerial vehicle (rear view)



**Рис. 4.** Двигатель беспилотного летательного аппарата (вид с внешней стороны)

**Fig. 4.** The engine of the unmanned aerial vehicle (the view from the outside)



**Рис. 5.** Двигатель беспилотного летательного аппарата (вид с внутренней стороны)

**Fig. 5.** The engine of the unmanned aerial vehicle (view from the inside)

### **Заключение**

В дальнейшем планируется с использованием возможностей программы SolidWorks провести инженерный анализ модели, исследовать ее физические свойства и организовать компьютерные экспе-

рименты. Применение данной программы также позволит создать полный комплект конструкторской документации в соответствии с Единой системой конструкторской документации.

### **Список литературы**

1. ТАСС [Электронный ресурс] // ТАСС: сайт. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/6758232> (дата обращения: 20.04.2020).
2. Пятаева А. В. Сегментация областей задымления на видеопоследовательности / А. А. Пятаева // Вестник СибГАУ. – 2016. – № 3. – С. 625–630.

3. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018\\_10\\_CINAR\\_DILARA.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf) (дата обращения: 20.04.2020).
4. Хмельницкая К. А. Распознавание пламени с помощью оптоэлектронных систем в судостроении / К. А. Хмельницкая // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. Специальный выпуск 2. – С. 277–281.
5. Догерти М. Дроны: первый иллюстрированный путеводитель по БПЛА. М.: Эксмо, 2018. – 224 с.
6. Ле Динь Дат, Руденко М. Г., Данеев А. В. БПЛА для проведения мониторинга объектов нефтегазовой промышленности // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2018. – Т. 1. – С. 75–77.
7. Пеллинен В. А. Применение беспилотников при анализе криогенных форм рельефа долины реки Сенца Окинско-го плоскогорья / В. А. Пеллинен, А. А. Светлаков // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2020. – Т. 31. – С. 58–67.
8. Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления / С. И. Федоров, А. В. Хаустов, Т. М. Крамаренко, В. С. Долгих // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2016. № 74. – С. 12–21.
9. Zakharov D. V. The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems / D. V. Zakharov, O. V. Kuzmin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 760. – Pp. 1–8. – DOI:10.1088/1757-899X/760/1/0120589.
10. Mesarovi M., Mako D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. New York: Academic Press, 1970. 294 p.
11. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
12. Stanley R. P. Enumerative Combinatorics. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 335 p.
13. Birkhoff G. Lattice Theory. N. Y.: American Mathematical Society, 1967. 418 p.
14. Балагура А. А., Кузьмин О. В. Обобщенная пирамида Паскаля и частично упорядоченные множества // Обзорные прикладной и промышленной математики. 2007. Т. 14, вып. 1. С. 88–91.
15. Кузьмин О. В. Обобщенные пирамиды Паскаля и их приложения. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 2000. 294 с.
16. Кузьмин О. В., Серёгина М. В. Плоские сечения обобщенной пирамиды Паскаля и их интерпретации // Дискретная математика. 2010. Т. 22, вып. 3. С. 83–93.
17. Kuzmin O. V., Khomenko A. P., Artyunin A. I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Is. 3. Pp. 183–193.
18. Kuzmin O. V., Khomenko A. P., Artyunin A. I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis // Advances and Applications in Discrete Mathematics. 2018. Vol. 19, Is. 3. P. 229–242.
19. Кузьмин О. В. Иерархические структуры типа треугольника Паскаля и построение навигационных маршрутов / О. В. Кузьмин, Б. А. Старков // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. Вып. 3 / отв. ред. И.В. Бычков, А.Л. Казаков. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. – С. 119–123.
20. Лавлинская А.А., Филь Г.А., Камнев М.Д. Создание модели квадрокоптера-эколога // Прикладные вопросы дискретного анализа: сб. науч. тр. / под ред. О. В. Кузьмина. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. Вып. 5. С. 78–83.

### References

1. TASS [TASS]. [Electronic media]. URL: <https://tass.ru/info/6758232>. Accessed April 20, 2020.
2. Pyataeva A.V. Segmentatsiya oblasti zadymleniya na videoposledovatel'nosti [Smoke Segmentation in VIDEO sequences]. Vestnik SibGAU [Bulletin of Siberian State Aerospace University], 2016, Vol. 3, pp. 625–630.
3. Fire Detection in Trains Using Image Analysis: A Survey and a Novel Approach [Electronic media]. URL: [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018\\_10\\_CINAR\\_DILARA.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/142862/3/2018_10_CINAR_DILARA.pdf) Accessed April 20, 2020.
4. Khmel'nitskaya K. Raspoznavanie plameni s pomoshch'yu optoelektronnykh sistem v sudostroenii [Flame recognition with optoelectronic systems in shipbuilding]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Proceedings of the Krylov State Research Center], special edition 2, 2019, pp. 277–281.
5. Dougherty M. J. Drones: An Illustrated Guide to the Unmanned Aircraft That Are Filling Our Skies. Published by Amber Books Ltd, Hardcover, 2015, 224 p. [Russ. ed.: Dogerti M. Drony: pervyi illyustrirovannyi putevoditel' po BPLA. M.: Eksmo, 2018. – 224 s.].
6. Dat D. L., Rudenko M.G. and Daneev A.V. BPLA dlya provedeniya monitoringa ob"ektov neftegazovoi promyshlennosti [UAVs for the monitoring of objects of oil and gas industry]. Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technologies and scientific and technical progress], 2018, Vol. 1, pp. 75–77.
7. Pellinen V. A., Svetlakov A. A. Primenenie bespilotnikov pri analize kriogennykh form rel'efa doliny reki Sentsa Okinskogo ploskogor'ya [The Use of Drones to Investigate the Cryogenic Landforms of the Sentsa River Valley, the Oka Plateau]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle». [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2020, Vol. 31, pp. 58–67.
8. Fedorov S. I., Khaustov A.V., Kramarenko T. M. et al., Klassifikatsiya BPLA i sistemy ikh intellektual'nogo upravleniya [UAV Classification and Intelligent Management Systems]. Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii [Open information and computer integrated technologies], 2016, No. 74, pp. 12–21.
9. Zakharov D. V., Kuz'min O. V., The application of relational interactive logic in control operation problems by the example of monitoring the server equipment of transport systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 760, pp. 1–8.

10. Mesarovi M., Mako D., Takahara Y., Theory of Hierarchical Multilevel Systems. Academic Press, New York, 1970, 294 p.
11. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York, McGraw-Hill, 1980, 287 p.
12. Stanley R. P. Enumerative Combinatorics, Vol. 1. Cambridge University Press, Cambridge, 1997, 335 p.
13. Birkhoff G., Lattice Theory. American Mathematical Society, New York, 1967, 418 p.
14. Balagura A.A., Kuz'min O. V. Obobshchennaya piramida Paskalya i chastichno uporyadochennye mnozhestva [Generalized Pascal pyramid and partially ordered set]. Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki [Surveys on Applied and Industrial Mathematics], Vol. 14, No. 1, pp. 88–91 (2007).
15. Kuz'min O. V. Obobshchennyye piramidy Paskalya i ikh prilozheniya [Generalized Pascal Pyramids and their Applications]. Nauka Publ., Novosibirsk, 2000. 294 p.
16. Kuz'min O. V., Seregina M. V. Ploskie secheniya obobshchennoi piramidy Paskalya i ikh interpretatsii [Plane sections of the generalised Pascal pyramid and their interpretations]. [Discrete Mathematics and Application], 2010, Vol. 20, No. 4, pp. 377–389.
17. Kuz'min O. V., Khomenko A. P., Artyunin A. I. Discrete model of static loads distribution management on lattice structures. Advances and Applications in Discrete Mathematics, 2018, Vol. 19, Iss. 3, pp. 183–193.
18. Kuz'min O. V., Khomenko A. P., Artyunin A. I. Development of special mathematical software using combinatorial numbers and lattice structure analysis. Advances and Applications in Discrete Mathematics, 2018, Vol. 19, Iss. 3, pp. 229–242.
19. Kuz'min O. V., Starkov B. A. Ierarkhicheskie struktury tipa treugol'nika Paskalya i postroenie navigatsionnykh marshrutov [Hierarchical structures of the Pascal triangle type and the construction of navigation routes]. [Current problems of science in the Baikal region]. Irkutsk State University Publ., Irkutsk, 2020, Vol. 3, pp. 119–123.
20. Lavlinskaya A. A., Fil' G. A., Kamnev M. D. Sozдание modeli kvadrokoptera-ekologa [Creation of a quadcopter-ecolog model]. Prikladnye voprosy diskretnogo analiza: sb. nauch. tr. [Applied issues of discrete analysis: collection of research papers]. Irkutsk State University Publ., Irkutsk, 2020, Vol. 5, pp. 78–83

### Информация об авторах

**Кузьмин Олег Викторович** – д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и дискретной математики, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: quzminov@mail.ru

**Лавлинский Максим Викторович** – соискатель, кафедра теории вероятностей и дискретной математики, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, e-mail: LavlinskiMV@mail.ru

### Information about the authors

**Oleg V. Kuz'min** – Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Prof., Head of the Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: quzminov@mail.ru

**Maksim V. Lavlinskii** – external Ph.D. student, the Subdepartment of Probability Theory and Discrete Mathematics, Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: LavlinskiMV@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).143-150

УДК 62-97/98

## Методика исследования несимметричных режимов синхронных машин на основе интегральных уравнений Вольтерра второго рода

А. В. Данеев<sup>1</sup>, Р. А. Данеев<sup>2</sup>, В. Н. Сизых<sup>1</sup>✉

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ sizykh\_vn@mail.ru

### Резюме

В промышленности решение многих проблем напрямую связано с разработкой и исследованием синхронных машин, которые работают на выпрямительную (несимметричную) нагрузку. В них играют фундаментальную роль переходные процессы, которые в синхронных машинах описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений. При исследовании синхронных машин достаточно рассмотреть электромагнитные переходные процессы в силу большой инерционной постоянной машины. Уравнения становятся линейными, но с периодическими коэффициентами, которые также не имеют общего решения, поскольку содержат периодические коэффициенты. Возможности практического применения таких уравнений ограничиваются в общем случае трудностями, связанными с определением собственных чисел. В работе применяется преобразование дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами на основе представления системы с периодическими коэффициентами матричным интегральным уравнением Вольтерра второго рода. Исследование проводится на примере трехфазного магнитоэлектрического генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку. В статье на основе сопоставления с классической теорией систем с периодическими коэффициентами установлено, что постоянная матрица  $B$  не является строго определенной в рассмотренном методе. Предложенный метод моделирования позволяет исследовать как симметричные, так и несимметричные переходные процессы в синхронных машинах. Метод не имеет ограничения, связанного с синусоидальным пространственным распределением магнитодвижущих сил обмоток синхронных машин, и может быть применен с учетом высших гармоник индуктивностей таких машин.

### Ключевые слова

синхронные машины, переходные процессы, несимметричные режимы, уравнение Вольтерра второго рода