



**Фетисов В.С.**  
*Fetisov V.S.*

доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Мельничук О.В.**  
*Melnichuk O.V.*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Кудашов Д.Д.**  
*Kudashov D.D.*

аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа



**Сизоненко Р.В.**  
*Sizonenko R.V.*

студент-магистрант кафедры «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, г. Уфа

УДК 621.3.06

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ НА ПОСАДОЧНОЙ ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ ПОДЗАРЯДКИ ВОЗДУШНЫХ РОБОТОВ

Известны различные способы периодической подзарядки бортовых аккумуляторов воздушных роботов. Наиболее простой из них – это периодическая посадка воздушного робота на специальную зарядную станцию и зарядка от наземного источника питания.

Соединение бортовой и наземной частей зарядной системы можно выполнять на основе платформ с открытыми контактными площадками. Их преимущество по сравнению со штепсельными соединителями заключается в отсутствии жестких требований по точности посадки воздушного робота и возможности обслуживания на платформе одновременно нескольких аппаратов. Авторами была предложена, в частности, одна из схем организации таких платформ, названная схемой с плоскими параллельными электродами. Такая платформа содержит систему контактных площадок, выполненных в виде плоских параллельных электродов, разделенных узкими диэлектрическими прокладками. Половина наземных электродов подключена к «плюсу» наземного источника питания, а другая половина – к «минусу», причем их полярности чередуются. Воздушный робот содержит несколько (от 3-х и более) бортовых посадочных электродов, расположенных на концах опорных стоек. Бортовые электроды посредством диодно-распределительной системы подключены одновременно к положительному и отрицательному входному выводу зарядного контроллера, связанного с бортовым аккумулятором.

Расположение точек касания бортовых посадочных электродов на платформе должно подчиняться определенным геометрическим соотношениям. Соблюдение этих соотношений гарантирует исключение ситуаций, когда все бортовые электроды контактируют с наземными электродами одной и той же полярности. Таким образом, после посадки как минимум один из бортовых электродов будет иметь полярность, отличную от других, а значит, бортовые цепи получат напряжение от наземного зарядного источника.

С помощью специально разработанной программы имитационного моделирования проанализирована вероятность успешной посадки аппарата в зависимости от конфигурации расположения точек касания бортовых электродов с полосами платформы. Изучено также влияние на результат неопределенности координат точек касания. Исследовались 4 варианта схем расположения точек касания: 3-, 4-, 6- и 8-точечная схемы с расположением точек в вершинах правильных многоугольников. Для каждой из схем выявлены оптимальные диапазоны радиуса описывающей многоугольника окружности (при фиксированной ширине полосы), для которых вероятность успешной посадки составляет 100%.

*Ключевые слова:* воздушный робот, посадка, имитационное моделирование, аккумуляторная батарея, зарядка, открытая контактная площадка, посадочная платформа, электрод, статистические испытания, неопределенность.

## SIMULATION MODELING OF CONTACT SYSTEM STATE FOR AERIAL ROBOTS CHARGING PLATFORM

Various methods of aerial robot onboard accumulator recharging are known.

The simplest is aerial robot periodical landing on the special platform and charging it from the terrestrial source.

It is possible to connect onboard and terrestrial parts of the charging system by means of platforms with open contact pads. The advantage of such platforms with respect to plug couplers is unnecessary accuracy landing of robots and availability to serve a group of robots simultaneously.

Authors proposed one scheme of such platforms called scheme with coplanar parallel electrodes. The platform consists of contact pads implemented as flat coplanar parallel metal strips separated by narrow dielectric spacers. One half of the strips are connected to the positive clamp of the terrestrial charging source, the second half are connected to the negative one, and polarities of the strips are interlaced.

Onboard landing electrodes are metal tips on the ends of the aerial robot's supporting legs whose number and position may be various (3 legs and more). The special distributing diode circuit provides correct connection of onboard

landing electrodes, which contact with the landing platform strips, to positive and negative pole terminals of the charging controller connected with the onboard accumulator battery.

Some practical recommendations on choosing acceptable configurations of onboard landing electrodes are known. Such configurations have to exclude possibility of landing of all electrodes on the strips with the same polarity. So right landing ensures normal onboard circuits feeding from the charging source.

With the special simulation program analysis of successful landing probability versus onboard landing electrodes configuration was carried out. Also influence of contact points coordinates uncertainty on successful landing probability was investigated. Four variants of contact points positioning were considered: 3-, 4-, 6- and 8-point schemes with points in regular polygon vertexes. For each scheme optimal ranges of polygons' circumradius providing 100% successful landing probability were found out.

*Keywords:* aerial robot, landing, simulation modeling, accumulator battery, charging, open contact pad, landing platform, electrode, statistical test, uncertainty.

### Введение

Во всем мире быстрыми темпами развивается беспилотная авиация, в том числе в целом ряде гражданских областей применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Кроме применений БПЛА для задач аэрофотосъемки и видеомониторинга, ставших уже традиционными, появляются и новые области применения: доставка грузов, выполнение сельхозработ, вспомогательные работы в строительстве, выполнение рекламных функций

и т.д. Часто такие аппараты называют воздушными роботами. Они могут быть предназначены для выполнения различных работ как на открытых пространствах, так и внутри помещений.

Большую часть источников автономного питания воздушных роботов составляют перезаряжаемые аккумуляторные батареи. Как правило, это литий-полимерные многосекционные батареи, обеспечивающие время полета 20-40 мин (для аппаратов вертолетного типа).

Известны различные способы периодической подзарядки бортовых аккумуляторов [2]. Наиболее простой и эффективный из них – это периодическая посадка воздушного робота на специальную зарядную станцию и зарядка от наземного источника питания [3].

Соединение бортовой и наземной частей зарядной системы во многих случаях выгодно выполнять на основе платформ с открытыми контактными площадками [4, 5, 6]. Их преимущество по сравнению со штепсельными соединителями заключается в отсутствии жестких требований по точности посадки воздушного робота и возможности обслуживания на платформе одновременно нескольких аппаратов. Авторами была предложена, в частности, одна из схем организации таких платформ, названная схемой с плоскими параллельными электродами [7, 8]. Такая платформа содержит систему контактных площадок, выполненных в виде плоских параллельных электродов шириной  $a$ , разделенных узкими диэлектрическими прокладками шириной  $\delta$ . Половина наземных электродов подключена к «плюсу» наземного источника питания, а другая половина – к «минусу», причем их полярности чередуются (рис. 1). Воздушный робот содержит несколько (от 3-х и более) бортовых

посадочных электродов, расположенных на концах опорных стоек (рис.2). Бортовые электроды посредством диодно-распределительной системы подключены одновременно к положительному и отрицательному входному выводу зарядного контроллера, связанного с бортовым аккумулятором GB1.

Расположение точек касания бортовых посадочных электродов на платформе должно подчиняться определенным геометрическим соотношениям, подробно описанным в [9]. Соблюдение этих соотношений гарантирует с вероятностью 100% исключение ситуации, когда все бортовые электроды контактируют с наземными электродами одной и той же полярности. Таким образом, после посадки как минимум один из бортовых электродов будет иметь полярность, отличную от других, а значит, бортовые цепи получат напряжение от наземного зарядного источника.

Для примера на рис.3 показаны возможные положения точек касания бортовых электродов, расположенных в вершинах квадрата со стороной  $a+\delta$ . Именно такое расположение бортовых электродов для 4-точечной схемы обеспечивает успешную стыковку бортовой и наземной частей зарядной системы.

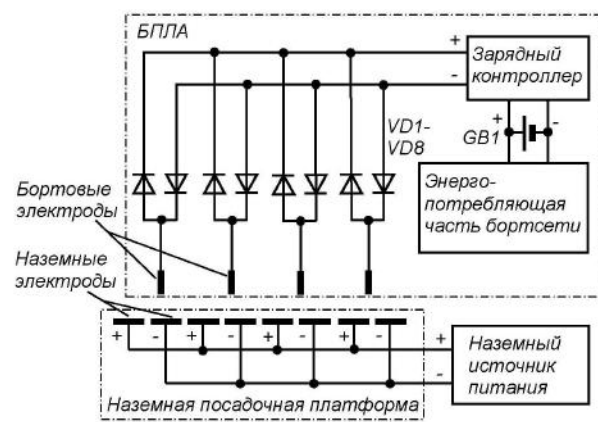


Рис.1. Структура зарядной станции

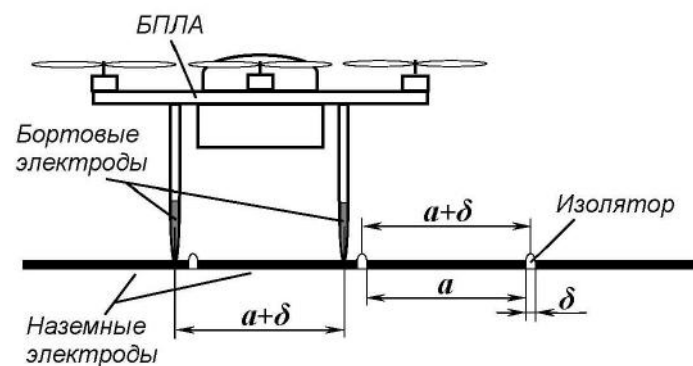


Рис.2. Схема установки отдельного аппарата на наземные электроды

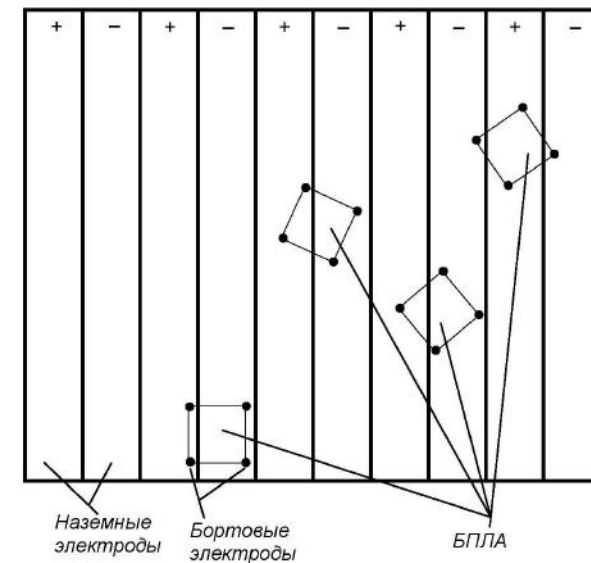


Рис. 3. Возможные положения точек касания бортовых электродов БПЛА на посадочной платформе (для случая 4-контактной схемы)

Наиболее употребительными схемами расположения точек касания бортовых электродов следует считать 3-, 4-, 6- и 8-точечные схемы, причем точки касания в них расположены в вершинах соответствующих правильных многоугольников (такие схемы соответствуют расположению опорных стоек аппаратов под несущими лучами роторов мультироторных аппаратов вертикального типа).

Представляет практический интерес то, каким образом вероятность удачной стыковки бортовой и наземной частей зарядной системы зависит от количества точек касания, размеров соответствующего

правильного многоугольника, а также неопределенности расположения точек касания. Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная статья.

### 1. Программное средство для имитационного моделирования

Оценивание вероятности правильного расположения аппарата на платформе в аналитическом виде достаточно проблематично. Поэтому такая оценка производилась с использованием программного имитатора посадки воздушного робота на платформу, представляющую собой набор полос с чередующейся полярностью. Программа, названная CoptersLanding, позволяет задать количество, длину и ширину полос, число бортовых электродов (точек касания), радиус описывающей окружности правильного многоугольника, в вершинах которого помещены точки касания, а также неопределенность координат точек касания (предельное случайное отклонение координат от заданных значений). В главном окне программы отображается результат имитации (рис.4). Можно задать однократную имитацию или прогон множества случайных положений с оценкой результата. Результат индицируется в отдельной области окна, где для всех попыток показывается полярность каждой из точек касания и результат посадки – удачный (I) или неудачный (O, в случае совпадения полярностей всех точек). Итоговый результат представлен в виде количества имитаций посадки и процента удачных посадок (рис.5). Оцениваются только те посадки, когда все точки касания аппарата помещаются на платформе.

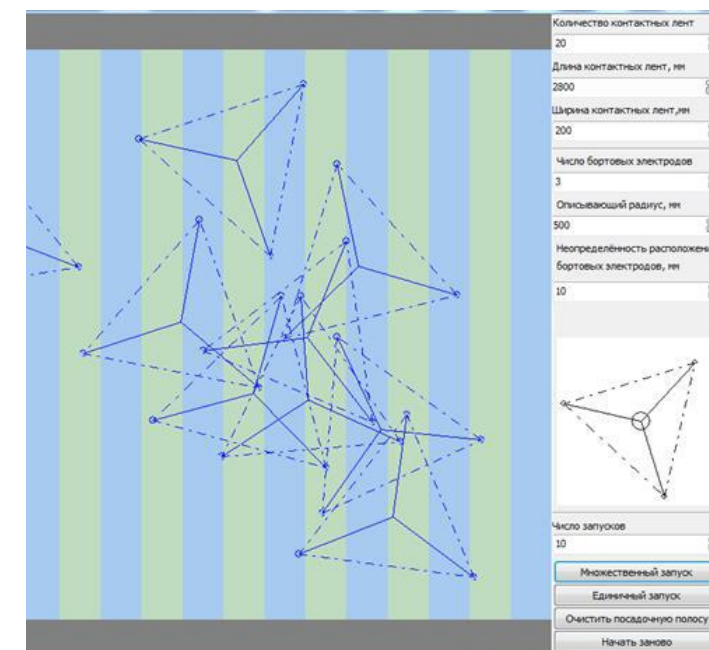


Рис. 4. Область задания параметров программы CoptersLanding



Практическая ценность программы в том, что она позволяет имитировать одновременно как случайное положение аппарата на платформе, так и случайные отклонения координат всех точек касания. При большом количестве статистиче-

ских испытаний (во всех имитационных экспериментах оно задавалось равным 10000) можно получить достаточно надежную оценку вероятности успешных посадок)

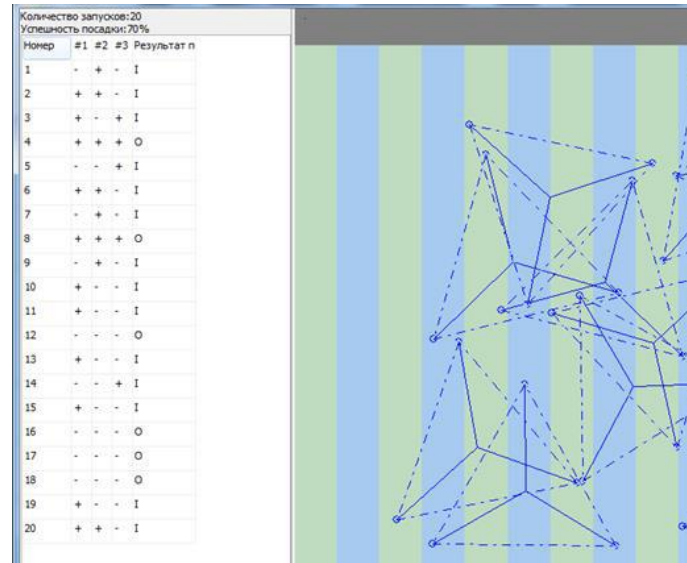


Рис.5. Область результатов программы CoptersLanding

Во всех оцениваемых случаях посадок постоянными задавались следующие геометрические параметры платформы:

- количество полос – 20,
- длина полос – 3000 мм,
- ширина полос – 200 мм.

Варьировались следующие параметры аппарата:

- число бортовых электродов (3, 4, 6, 8),
- радиус описывающей окружности (50-400 мм),
- неопределенность координат точек касания (предельные значения случайных отклонений координат 0, 3, 5, 7, 10 мм при случайном законе их распределения).

**2. Обсуждение результатов статистических испытаний**

В [9] были получены выражения, связывающие геометрический параметр воздушного робота (длину стороны правильного многоугольника с вершинами в точках контактов бортовых электродов) и ширину полосы, при которых обеспечивается стопроцентная вероятность наличия разнополярных бортовых электродов. Не повторяя здесь математических выкладок, приведем в табл.1 итоговые формулы с добавлением выражений для радиуса  $R$  описывающей многоугольник окружности, а также ожидаемые оптимальные значения  $R$  при ширине полосы  $a = 200$  мм.

Таблица 1

**Теоретически рассчитанные оптимальные соотношения геометрических параметров воздушного робота и ширины полосы**

Кол-во бортовых электродов	Оптимальные длина стороны многоугольника $c$ и радиус описанной окружности $R$ , выраженные через ширину полосы $a$	Ожидаемые оптимальные значения $R$ , мм при $a = 200$ мм
3	$c = 1,155a$ $R = 0,667a$	$R = 133,4$
4	$c = a$ $R = 0,707a$	$R = 141,4$

Окончание таблицы 1.

Кол-во бортовых электродов	Оптимальные длина стороны многоугольника $c$ и радиус описанной окружности $R$ , выраженные через ширину полосы $a$	Ожидаемые оптимальные значения $R$ , мм при $a = 200$ мм
6	$0,577a < c < a$ $0,577a < R < a$	$115,4 < R < 200$
8	$0,414a < c < a$ $0,541a < R < 1,307a$	$108,2 < R < 261,4$

Спрогнозированные таким образом результаты для случая полного отсутствия неопределенности были проверены путем имитационного моделирования в программе CoptersLanding. Результаты представлены на графиках (рис.6-9).

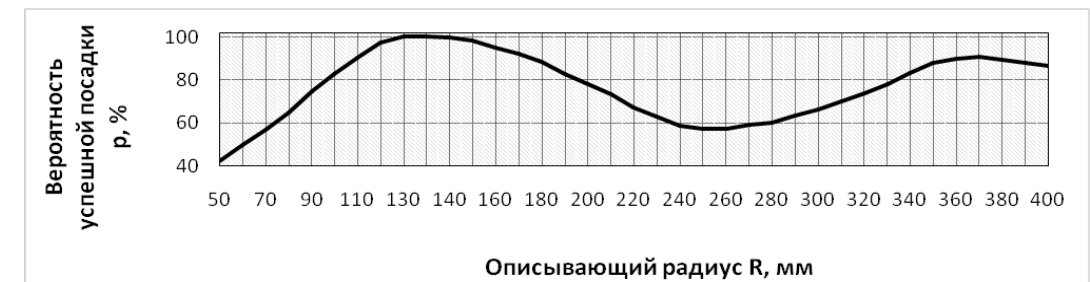


Рис.6. Вероятность успешной посадки для 3-точечного расположения точек касания

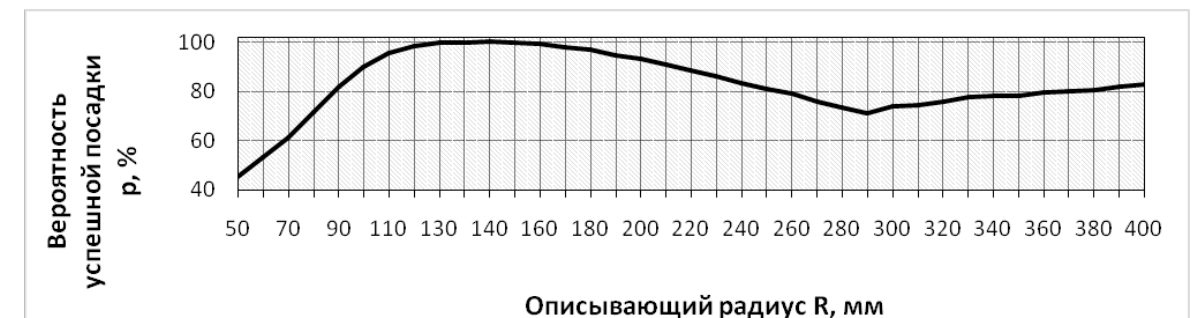


Рис.7. Вероятность успешной посадки для 4-точечного расположения точек касания

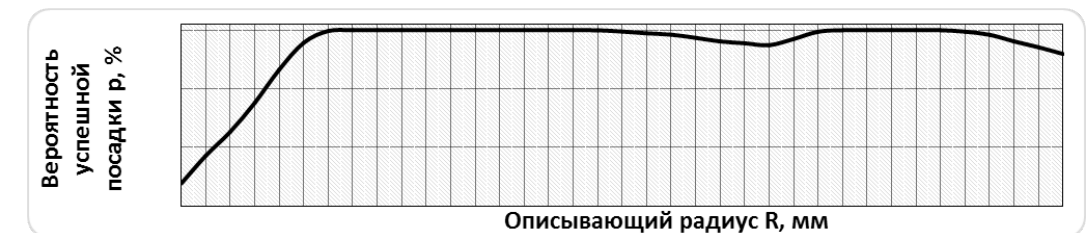


Рис.8. Вероятность успешной посадки для 6-точечного расположения точек касания

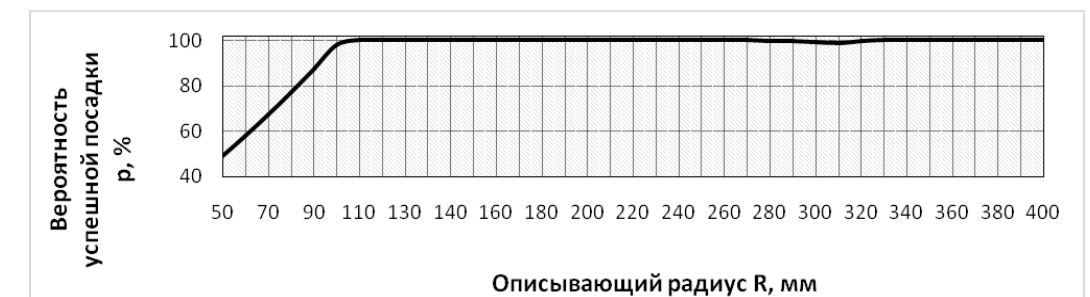


Рис.9. Вероятность успешной посадки для 8-точечного расположения точек касания



Теоретические прогнозы полностью подтвердились. Для всех испытуемых вариантов схем расположения точек касания электродов существуют оптимальные диапазоны размеров аппарата (радиуса описанной окружности  $R$ ), при которых посадка всегда будет успешной (в смысле правильной коммутации электродов зарядной системы). Причем при увеличении количества точек касания эта зона оптимальности расширяется. Несколько неожиданным оказалось наличие зоны минимума вероятности успешной посадки, следующей после зоны максимума (она в том или ином виде заметна на каждом из графиков рис.6-9. Затем снова следует повышение вероятности, хотя и не всегда до 100%. Теоретически такой характер поведения кривой на этом участке предсказать было бы довольно сложно. Поэтому имитационный вычислительный эксперимент для оценки исследуемых зависимостей – практически единственное надежное средство.

Отдельная серия имитационных экспериментов была проведена для оценки влияния на вероятность

успешной посадки  $p$  неопределенности координат точек касания электродов. Эта неопределенность ( $\gamma$ ) задавалась путем указания ее предельных значений в абсолютных единицах (миллиметрах). Наиболее интересными для изучения представлялись диапазоны  $R$  вблизи уже упомянутых оптимальных зон. Именно вблизи этих зон подробно изучалось поведение зависимостей  $p = f(R)$  для значений  $\gamma = 0, 3, 5, 7, 10$  мм. Это типичные значения для реальных условий, когда неопределенность координат может быть обусловлена такими факторами, как технологические погрешности монтажа бортовых электродов или нежесткость опорных стоек. Результаты для 3-, 4- и 6-точечных схем расположения точек касания электродов представлены на рис.10-12.

По графикам видно, что для 3- и 4-точечных схем, у которых зона оптимальных значений  $R$  относительно узкая, уже при  $\gamma = 5$  мм и более практически невозможно добиться стопроцентно успешной посадки.

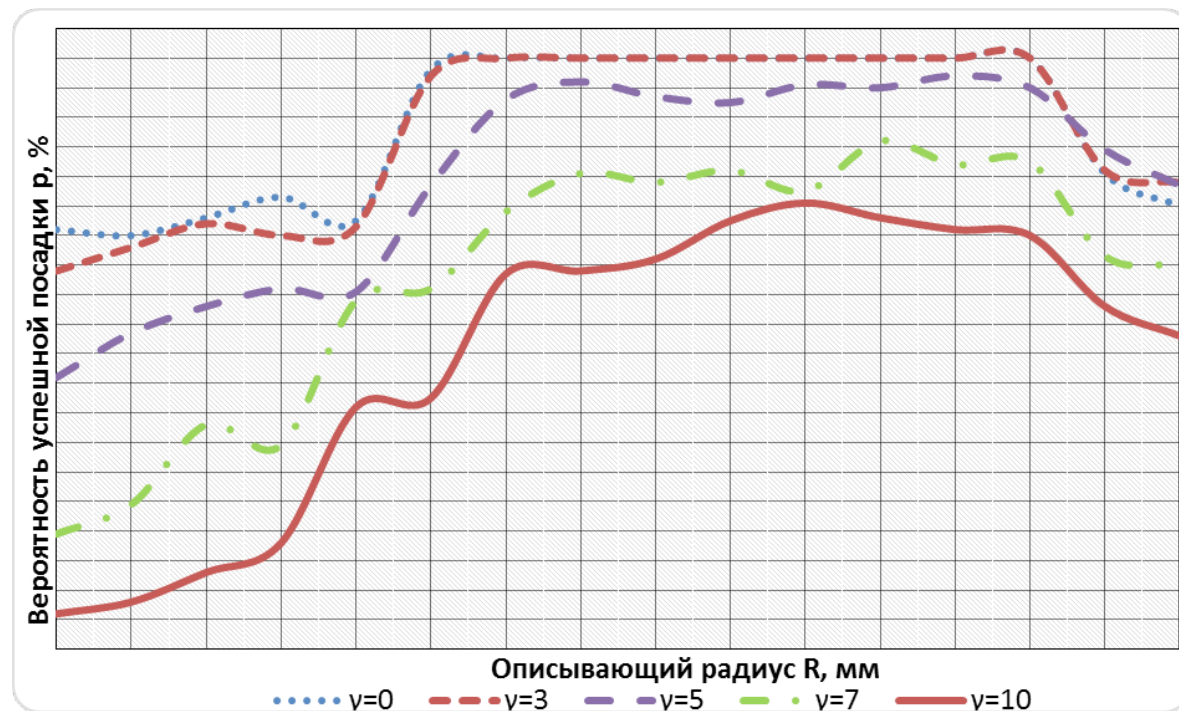


Рис.10. Зависимости вероятности успешной посадки от радиуса описывающей окружности  $R$  при различной неопределенности координат точек касания  $\gamma$  для 3-точечной схемы

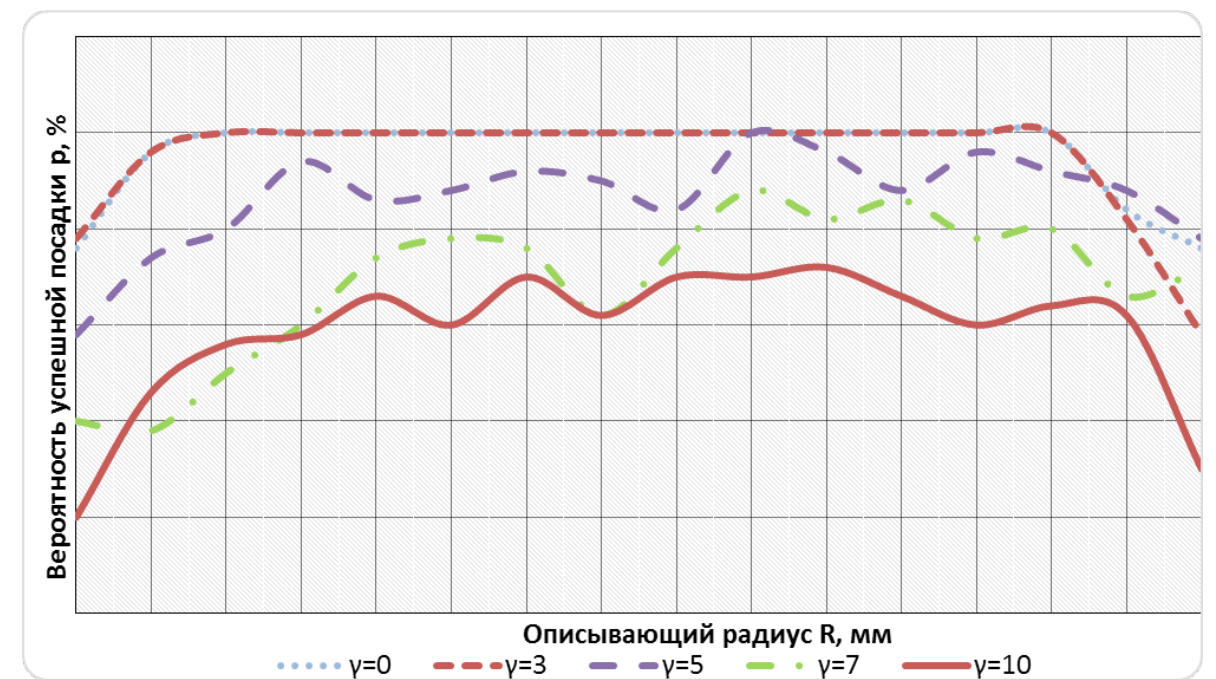


Рис.11. Зависимости вероятности успешной посадки от радиуса описывающей окружности  $R$  при различной неопределенности координат точек касания  $\gamma$  для 4-точечной схемы

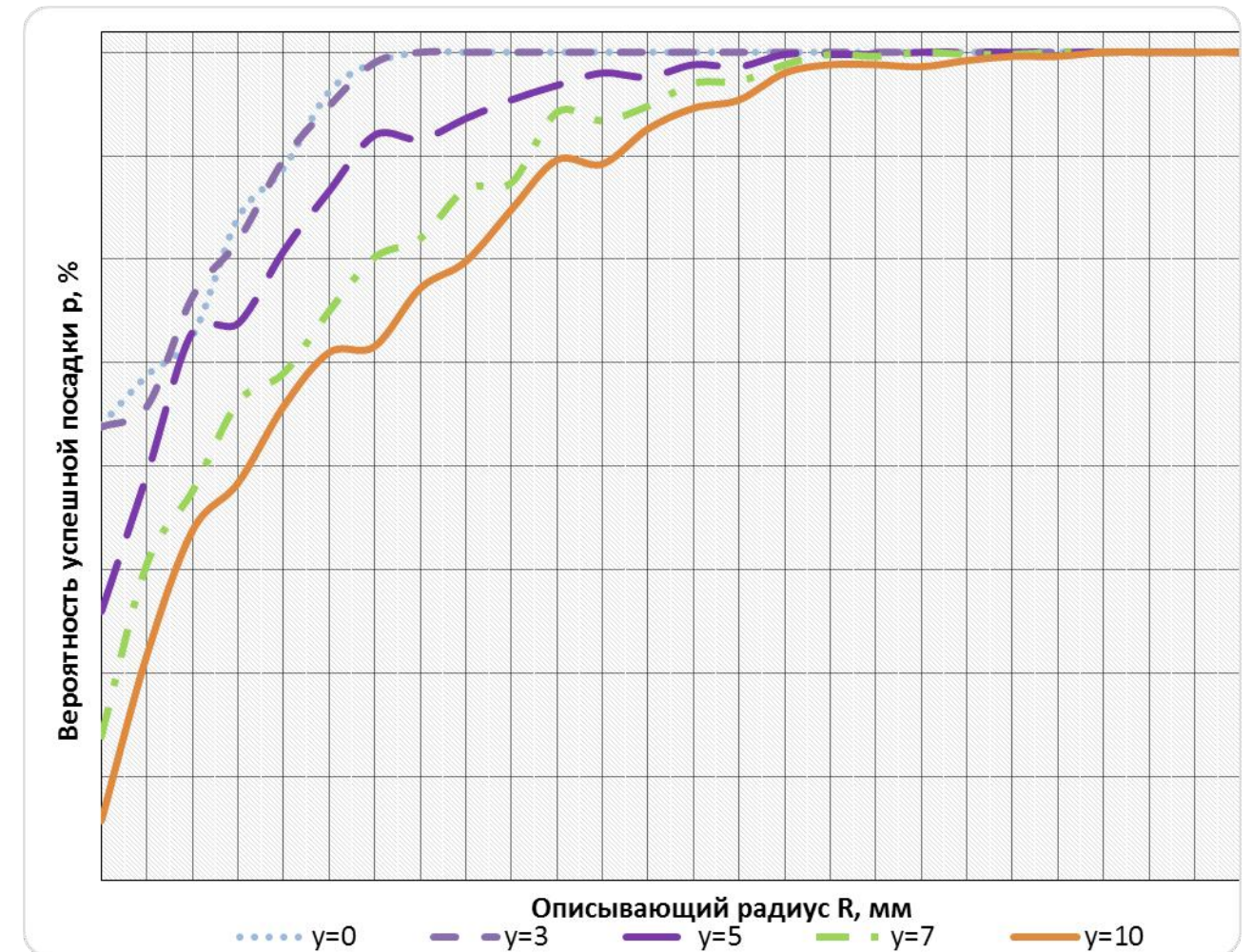


Рис.12. Зависимости вероятности успешной посадки от радиуса описывающей окружности  $R$  при различной неопределенности координат точек касания  $\gamma$  для 6-точечной схемы



Для 6- и 8-точечных схем (графики для 8-точечной схемы здесь не показаны, т.к. они аналогичны представленным для 6-точечной), начиная с определенных значений  $R$  (на рис.12 это значения  $R \approx 126$  мм) неопределенность  $\gamma$  перестает оказывать какое-либо влияние на вероятность успешной посадки. Диапазон значений  $R$ , при которых  $p = 100\%$  при любых значениях  $\gamma < 10$  мм, для 6-точечной схемы продолжается вправо до значений порядка 260 мм, т.е. до конца зоны оптимальности, а для 8-точечной он практически вообще не заканчивается.

#### Заключение

Разработанная имитационная программа позволила оценить вероятность успешной посадки воздушного робота, имеющего регулярное расположение бортовых электродов (точки касания которых расположены в вершинах правильного многоугольника), на посадочную платформу, имеющую плоские параллельные наземные электроды. Разработанный инструментарий помогает правильно выбрать соотношения между геометрическими параметрами посадочной платформы и воздушного робота.

#### Список литературы

1. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние [Текст] / В.С. Фетисов, Л.М. Неугодникова, В.В. Адамовский, Р.А. Красноперов; под ред. В.С. Фетисова. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.
2. Фетисов В.С. Подзарядка электрических беспилотных летательных аппаратов: обзор существующих разработок и перспективных решений [Текст] / В.С. Фетисов, М.И. Тагиров, А.И. Мухаметзянова // Авиакосмическое приборостроение. – 2013. – № 11. – С. 7–26.
3. Fetisov V.S. Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters [Text] / V. Fetisov, O. Dmitriyev, L. Neugodnikova, S. Bersenyov, I. Sakayev // Proceedings of XX IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”. – 9-14 Sept. 2012. – Busan, Republic of Korea. – P.86. – URL: [http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov\\_Dmitriyev\\_multicopters\\_final.pdf](http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov_Dmitriyev_multicopters_final.pdf)
4. Kemper P., Suzuki K., Morrison J. UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated Service Stations [Text] / P. Kemper, K. Suzuki, J. Morrison // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2011. – Vol. 61. – №1. – P. 369-397. – URL: [http://www.researchgate.net/publication/220062239\\_UAV\\_Consumable\\_Replenishment\\_Design\\_Concepts\\_for\\_Automated\\_Service\\_Stations](http://www.researchgate.net/publication/220062239_UAV_Consumable_Replenishment_Design_Concepts_for_Automated_Service_Stations)

5. Deploying Drones for the Enterprise: официальный сайт компании SkySense [Electronic resource]. – URL: <http://skysense.co>

6. Фетисов В.С. Моделирование электрических цепей интеллектуальной контактной матрицы [Текст] / В.С. Фетисов, О.В. Мельничук // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – № 4. – т. 11. – С.34-40.

7. Фетисов В.С. Наземные станции подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов на основе открытых контактных площадок [Текст] / В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров, Р.В. Сизоненко, Р.А. Красноперов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №2. – С. 44-53.

8. Патент РФ на полезную модель № 135469 Система подзарядки бортового аккумулятора воздушного робота [Текст] / В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров, А.И. Мухаметзянова; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (RU). – Заявл. 02.07.2013. – Опубл. 10.12.2013. – Бюл. № 34.

9. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р. Системы подзарядки электрических беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на основе посадочных платформ с плоскопараллельными открытыми контактными площадками [Текст] / В.С. Фетисов, Ш.Р. Ахмеров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2015. – № 7. – С. 41-49.

#### References

1. Bepilotnaya aviazia: terminologiya, klassifikaziya, sovremennoe sostoyanie [Unmanned aviation: terminology, classification, state-of-the-art] / Authors: V.S. Fetisov, L.M. Neugodnikova, V.V. Adamovsky, R.A. Krasnoperov; Editor V.S.Fetisov. Ufa: PHOTON, 2014. 217 p.
2. Fetisov V.S., Tagirov M.I., Mukhametzyanova A.I. Podzaryadka elektricheskikh bespilotnykh letatelnykh apparatov: obzor sushchestvuyushchikh razrabotok I perspektivnykh resheniy [Recharging of electrical unmanned aerial vehicles: overview of state-of-the-art developments and challenging solutions]// Aviakosmicheskoye priborostroyeniye [Aerospace Instrumentmaking]. 2013. № 11. P. 7–26.
3. Fetisov V.S., Dmitriyev O., Neugodnikova L., Bersenyov S., Sakayev I. Continuous monitoring of terrestrial objects by means of duty group of multicopters // Proceedings of XX IMEKO World Congress “Metrology for Green Growth”, 9-14 Sept. 2012, Busan,

Republic of Korea. P.86. Available at: [http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov\\_Dmitriyev\\_multicopters\\_final.pdf](http://vositef.url.ph/index.files/PUBL/Fetisov_Dmitriyev_multicopters_final.pdf)

4. Kemper P., Suzuki K., Morrison J. UAV Consumable Replenishment: Design Concepts for Automated Service Stations. Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2011. – Vol. 61. – №1. – P. 369-397. Available at: [http://www.researchgate.net/publication/220062239\\_UAV\\_Consumable\\_Replenishment\\_Design\\_Concepts\\_for\\_Automated\\_Service\\_Stations](http://www.researchgate.net/publication/220062239_UAV_Consumable_Replenishment_Design_Concepts_for_Automated_Service_Stations)

5. Deploying Drones for the Enterprise: official site of SkySense company. <http://skysense.co>

6. Fetisov V.S., Melnichuk O.V. Modelirovanie elektricheskikh zepeli intellektualnoi kontaktnoi matritsy [Electric circuit simulation for smart contact matrix] // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy [Electrical and data processing facilities and systems]. 2015. Vol. 11. № 4. P. 34-40.

7. Fetisov V.S., Akhmerov Sh. R., Sizonenko R.V., Krasnoperov R.A. Nazemniye stanzii podzaryadki elektricheskikh bespilotnykh letatelnykh apparatov na osnove otkrytykh kontaktnykh ploschadok [Terrestrial

charging station for electrical unmanned aerial vehicles based on open contact pads] // Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy [Electrical and data processing facilities and systems]. 2014. Vol. 10. № 2. P. 44–53.

8. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R., Mukhametzyanova A.I. Sistema podzaryadki bortovogo accumulyatora vozdushnogo robota [Charging system for aerial robot onboard accumulator] / Utility model patent (RU) № 135469. Appl. 02.07.2013. Publ.10.12.2013, Bul. № 34.

9. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R. Sistemy podzaryadki elektricheskikh bespilotnykh letatelnykh apparatov s vertikalnym vzlyotom-posadkoi na osnove posadochnykh platform s ploskoparallelnymi otkrytymi kontaktnymi ploschadkami [Charging stations for electrical unmanned aerial vehicles with vertical take-off-and-landing based on landing platforms with plane-parallel open contact pads] // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics]. 2015. № 7. P. 41-49.