

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 629.7.015.7

DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15

ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ НАВИГАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Андрей Вячеславович Богословский¹, Сергей Николаевич Разиньков²,

Элеонора Викторовна Сёмка^{3✉}

^{1, 2, 3} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

¹ bogosandrey@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Аннотация. Проведен анализ задач навигационного обеспечения воздушных объектов. Выполнен синтез маршрута полета беспилотного летательного аппарата с выбором курсовых углов полета в поворотных пунктах по результатам пеленгования сигналов неподвижного наземного источника. По результатам летных экспериментов, оценены среднеквадратические ошибки определения местоположения излучателей при многократной оценке угловых координат в пространственно-разнесенных точках приемниками-пеленгаторами, размещенными на беспилотных летательных аппаратах «Орлан-10», «Феникс» и «Грант-М». Исследованы способы коррекции автономного полета при возрастающей и убывающей точности оценки направлений прихода сигналов, позволяющие минимизировать ошибки местоопределения за фиксированное время наблюдения.

Предложена схема автогенератора на полевом транзисторе для резервного командного средства управления с автоматическим регулированием курсового угла. Обосновано правило построения модели автогенератора, удовлетворяющего требованиям по минимуму среднеквадратичного отклонения, рассчитанного с помощью электрической схемы и заданного курсового угла при ограничении на физическую реализуемость параметров макета заданной структуры. Сформулированы рекомендации по реализации электронной схемы и определены режимы самовозбуждения автогенератора.

Ключевые слова: критерий синтеза маршрута, беспилотный летательный аппарат, автономный полет, автогенератор, электронная компонентная база, полевой транзистор

Для цитирования: Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. Обоснование электронной компонентной базы для автогенераторов при навигационном обеспечении беспилотных летательных аппаратов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 6–15. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15.

Original article

VALIDATION OF THE ELECTRONIC COMPONENT BASE FOR SELF-EXCITED OSCILLATORS IN NAVIGATING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Andrey V. Bogoslovsky¹, Sergey N. Razinkov², Eleonora V. Syomka^{3✉}

^{1, 2, 3} Military Educational and Scientific Center of Air Forces

“N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, Russia

¹ bogosandrey@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. The study analyzes the tasks of air objects navigation support. The authors conducted a synthesis of a flight route of an unmanned aerial vehicle with the choice of heading angles of flight at turning points using the direction finding signals received from a stationary ground source. The root-mean-square errors are estimated based on the flying tests. These errors determine a location of emitters during multiple estimation of angular coordinates at points separated in space by direction-finding receivers placed on board of unmanned aerial vehicles “Orlan-10”, “Phoenix”, and “Grant-M”. Methods for correcting autonomous flight with increasing and decreasing accuracy in estimating signal arrival directions are studied, which make it possible to minimize positioning errors for a fixed observation time.

The study proposes a scheme of a self-excited oscillator on a field-effect transistor for backup command control with automatic heading angle control. A rule is substantiated for constructing a model of a self-excited oscillator that meets the requirements for a minimum standard deviation calculated using an electrical circuit and a given heading angle with a restriction on the physical feasibility of the layout parameters of a given structure. Recommendations for the implementation of the electronic circuit are formulated and the modes of self-excitation of the oscillator are determined.

Keywords: route synthesis criterion, unmanned aerial vehicle, autonomous flight, self-excited oscillator, electronic component base, field-effect transistor

For citation: Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V. Validation of the Electronic Component Base for Self-Excited Oscillators in Navigating Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings in Cybernetics*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 6–15. DOI 10.35266/1999-7604-2023-1-6-15.

ВВЕДЕНИЕ

Техническую основу навигационного обеспечения беспилотных летательных аппаратов (БЛА), совершающих автономный полет по заданной программе или командам, поступающим с наземного пункта управления (НПУ) по информационно-управляющим каналам, составляют комплекты аппаратуры глобальных систем спутниковой навигации (ГССН). Координатная информация поступает на бортовые приемники от спутниковых группировок ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BEIDOU/COMPASS (Китай), GALILEO (ЕС), NAVIC (Индия), QZSS (Япония) [1].

Наиболее высокие показатели надежности навигационного обеспечения достигнуты для навигационных систем, в которых передача псевдодиапазонных сигналов со спутников ГССН на борт БЛА выполняется без привлечения наземных ретрансляторов. Улучшение точности ГССН достигается за счет интеграции данных, поступающих от внешних навигационных источников, в процедурах определения местоположения и параметров траекторий полета в системах дифференциальной коррекции [2]. Вместе с тем при потере сигналов ГССН условие автономного полета не выполняется.

Пространственная ориентация БЛА устанавливается в микронавигационных и управляющих модулях, реализующих робастные

алгоритмы рекуррентной линейной фильтрации Калмана и интегрирования кинематических уравнений Эйлера [3].

Задачи автономного пилотирования беспилотных авиационных комплексов эффективно решаются с применением платформ АВАКС-ГеоСервис АП-5 (Россия) на операционной системе QNX с линиями связи на основе интерфейса RS-485, RUAV STA3x с графической средой программирования Simulink, SWIFT AI с FPV (First Person View) трансляцией видеоизображения в режиме реального времени.

В интересах автономной навигации используются:

- а) инерциальные измерительные блоки IMU с акселерометрами, магнитометрическими и барометрическими датчиками;
- б) интегрированные навигационные системы INS, сочетающие спутниковые данные о местоположении с данными инерциальных измерительных устройств;
- в) системы определения курса и пространственного положения AHRS, построенные на базе микроэлектромеханических систем.

Использование инерциальных навигационных систем в БЛА малой и средней дальности ограничивается жесткими массогабаритными требованиями к бортовой радиоэлектронной аппаратуре, а также наличием ошибок определения координат при автономной работе.

Ошибка счисления координат системами высокой точности при прямолинейном полете в течение одного часа составляет порядка двух километров, что не позволяет обеспечить высокоточное определение координат объектов [4].

Возможности повышения точности позиционирования БЛА за счет использования систем оптической коррекции типа «Отблеск-У» по спутниковым снимкам затруднено, поскольку оптико-электронные системы способны эффективно функционировать только в светлое время суток при весьма жестких ограничениях по погодным условиям. Радиотехнические системы коррекции, в основе работы которых лежит сопоставление текущих изображений профиля подстилающей поверхности с эталонными картами, не могут применяться при полетах над равнинной местностью. Зависимости уровней информационных сигналов рельефометрических систем от сезонных флуктуаций электрофизических параметров радиоканалов также могут являться источниками ошибок навигационного обеспечения.

Таким образом, остаются открытыми вопросы реализации функции автономного полета БЛА при коррекции маршрута с применением комбинированных систем управления [5, 6].

Цель предлагаемой работы – разработка способов автономного поддержания траектории движения БЛА самолетного типа при высокоточном выходе в позиционный район.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В [6–9] представлены алгоритмы коррекции траектории полета БЛА при приеме и обработке излучений наземных источников и сборе данных о позиционировании в динамике движения. На основе линейной фильтрации параметров траекторий [5, 7, 8] в системе координат, связанной с излучающим объектом, реализованы процедуры определения направлений движения БЛА в поворотных пунктах маршрута. Построен алгоритм оптимизации маршрута полета БЛА самолетного типа по критерию минимума дисперсии местоопределения наземного источника радиоизлучений (ИРИ) по результатам пеленгования в пространственно-разнесенных точках.

1. Алгоритм коррекции полета беспилотного летательного аппарата при пеленговании источника радиоизлучения в поворотных пунктах маршрута.

Критерий оптимизации маршрута БЛА для достижения наилучшей точности местоопределения ИРИ имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}_n = \arg \min_{\gamma_n} \sigma_R^2; \\ \gamma_n \neq \pi m, \end{cases} \quad \begin{matrix} n = 1, 2, 3, \dots, \\ m = 0, 1, 2, \dots, \end{matrix} \quad (1)$$

где $\hat{\gamma}_n$ – направления движения с лучшей точностью местоопределения, γ_n – курсовой угол в текущий момент времени, σ_R^2 – дисперсия оценки местоположения излучателя. Второе уравнение в (1) исключает полет БЛА непосредственно на ИРИ [9].

Дисперсия оценки местоположения излучателя имеет вид [8]:

$$\sigma_R^2 = \frac{(\sigma_{\varphi n}^2 R_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2 (2R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n)) \times (R_n^2 + L^2 - 2R_n L \cos \gamma_n)}{L^2 \sin^2 \gamma_n}, \quad (2)$$

где R_n и R_{n+1} – наклонные дальности, L – дистанция между точками пеленгования, $\sigma_{\varphi n}$ и $\sigma_{\varphi(n+1)}$ – среднеквадратические ошибки (СКО) пеленгования сигналов.

Согласно уравнению, при обращении первой производной (2) в нуль получим минимальную дисперсию местоопределения объекта для курсового угла $\hat{\gamma}_n$:

$$\cos^2 \gamma_n - \beta_n \cos \gamma_n + 1 = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где

$$\beta_n = \frac{(\sigma_{\varphi n}^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^4 + (2\sigma_{\varphi n}^2 + 5\sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^2 + \sigma_{\varphi(n+1)}^2}{(\sigma_{\varphi n}^2 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2) \alpha_n^3 + 2\sigma_{\varphi(n+1)}^2 \alpha_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Решение (3) получим в виде:

$$\gamma_n = \pm \arccos \left(\frac{\beta_n - \sqrt{\beta_n^2 - 4}}{2} \right) + 2\pi m, \quad n = 1, 2, 3, \dots, m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

На рис. 1а, 1б сплошной линией приведены маршруты БЛА, рассчитанные при $\sigma_R^2 = 1^\circ$, пунктиром обозначены траектории для $\sigma_R^2 = 3^\circ$.

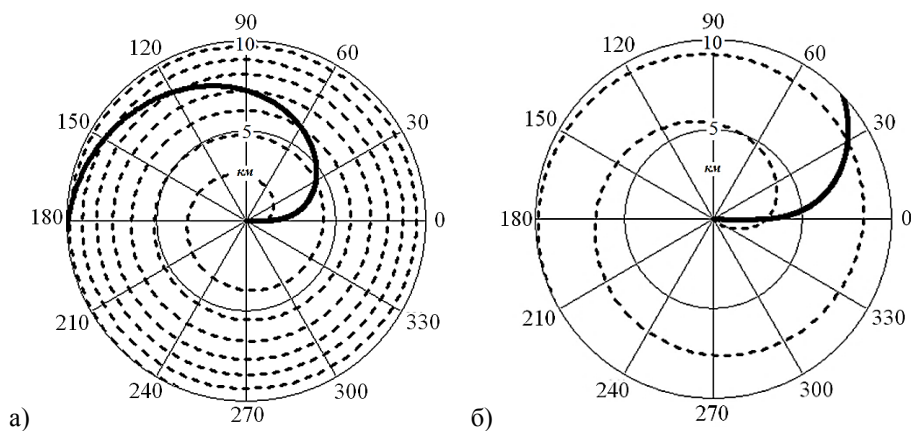


Рис. 1. Траектории полета БЛА в заданное положение:

а) $L = 1$ км; б) $L = 2$ км

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Анализ траекторий движения БЛА позволяет сделать вывод, что повышение СКО пеленгования с 1 до 3° приводит к увеличению длины маршрута полета не менее чем в 6 раз. Рост дистанции между точками пеленгования с 1 до 3 км повышает точность оценки угловых координат и сокращает дальность полета в 2 раза.

Результаты расчетов подтверждены экспериментальными данными, полученными в серии летных экспериментов с обнаружителями-пеленгаторами, применяемыми в качестве целевых нагрузок БЛА «Орлан-10» (ООО «СТЦ», г. Санкт-Петербург). На рис. 2а изображены БЛА на этапе запуска, на рис. 2б

показаны автоматизированные рабочие места (АРМ) их операторов на НПУ.

Пеленгование ИРИ осуществлялось в режиме сканирования диапазона частот от 30 до 3 000 МГц при полете БЛА по траекториям, заданным критерием (1), на высотах 400 м и 1 000 м. Курсовая скорость составляла порядка 100 км/ч.

В качестве ИРИ использовались имитаторы источников непрерывного излучения (ИНИ) с фиксированной частотой (ФЧ), радиостанции Р-845, Midland СТ-400. Продолжительность сеансов связи радиостанции составляла 90 секунд с паузой до 7 минут.



Рис. 2. Летный эксперимент запуска БЛА «Орлан-10»:

а) БЛА «Орлан-10» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ

Примечание: составлено авторами.

Значения СКО определения местоположения передатчиков сигналов с борта БЛА

«Орлан-10» (в процентах от дальности) приведены в табл. 1.

Таблица 1

СКО местоопределения ИРИ

Тип ИРИ	Диапазон, МГц	СКО (% от дальности)	
		400 м	1 000 м
Имитатор ИНИ на ФЧ 68 МГц	30 ... 100	7,9	8,2
Имитатор радиостанции на ФЧ 68 МГц		8,9	9,3
Имитатор ИНИ на ФЧ 160 МГц	100 ... 200	5,5	5,7
Имитатор ИНИ на ФЧ 301 МГц	200 ... 400	2,5	2,8
Радиостанция Р-845 на частоте 254,3 МГц		8,7	9,0
Имитатор ИНИ на ФЧ 440 МГц	400 ... 700	2,4	2,8
Две радиостанции Midland СТ-400 на ФЧ 459 МГц		9,3	9,4
Имитатор ИНИ на ФЧ 870 МГц	700 ... 3 000	2,2	3,6

Примечание: составлено авторами по [6].

Установлено, что точность местоопределения передатчиков сигналов составляет до 9,4 % от дальности [6].

В целях оценки эксплуатационных характеристик аппаратуры были проведены тождественные эксперименты при ее размеще-

нии на БЛА «Феникс» (ООО «НПП «НТТ», г. Санкт-Петербург), БЛА «Грант-М» (ООО «НПКЦ «НОВИК-91», г. Егорьевск).

На рис. 3–4 представлены: а) указанные образцы БЛА на стартовых позициях, б) АРМ их операторов на НПУ.

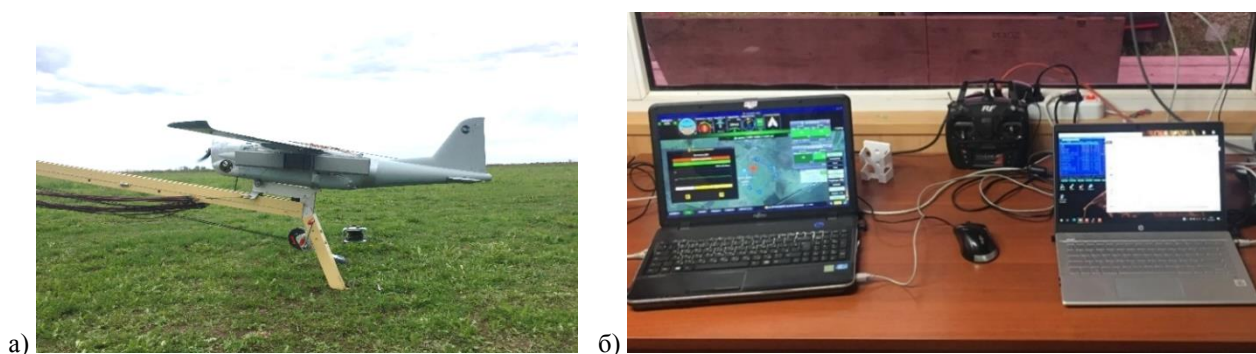


Рис. 3. Летный эксперимент запуска БЛА «Феникс»:
 а) БЛА «Феникс» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ
 Примечание: составлено авторами.

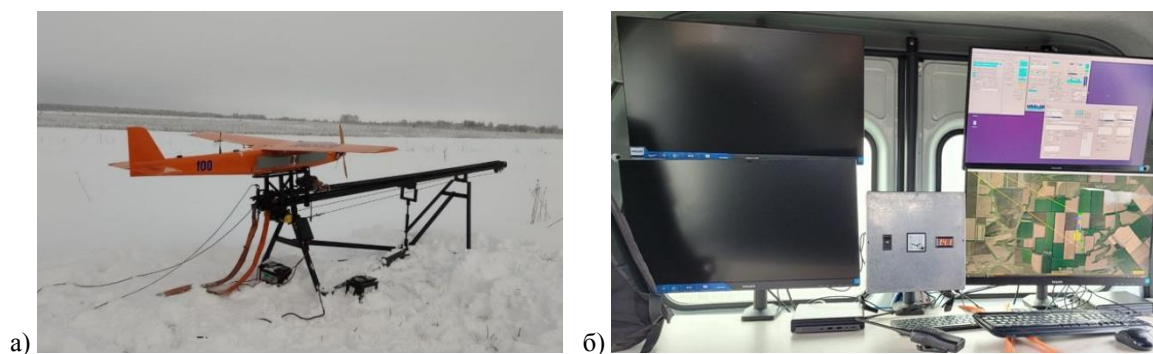


Рис. 4. Летный эксперимент запуска БЛА «Грант-М»:
 а) БЛА «Грант-М» на этапе запуска; б) АРМ оператора на НПУ
 Примечание: составлено авторами.

По результатам летных экспериментов установлено, что БЛА «Орлан-10» обладает наиболее высокими показателями надежности. При этом целевые нагрузки наибольшей массы способны нести БЛА «Феникс» и «Грант-М». Минимальное время достижения (набора) рабочего эшелона высоты зафиксировано для БЛА «Грант-М», что способствует успешному выполнению задач в условиях пересеченной местности и высотной городской застройки.

Вместе с тем при наличии активных преднамеренных помех регистрировались отказы основных и резервных систем навигации для всех образцов БЛА. Наиболее благоприятным вариантом возвращения носителя становилось немедленное снижение планированием. Продолжение полета до выработки топлива с ожиданием восстановления приема сигналов ГССН существенно усложняло процесс своевременного обнаружения и эвакуации из-за большой длины маршрута неконтролируемого полета, который мог составлять сотни километров. Поэтому для повышения надежности функционирования беспилотных комплексов, наряду с повышением помехоустойчивости навигационной аппаратуры ГССН, необходимо применять альтернативные способы навигационного обеспечения БЛА.

2. Обоснование принципов применения и электронной компонентной базы для построения автогенератора при обеспечении автономного полета беспилотного летательного аппарата.

Обеспечить автономное движение по определенным траекториям предлагается с применением системы управления на основе автогенератора. Номиналы управляющих токов и напряжений могут быть рассчитаны с применением электрической схемы на полевом транзисторе (рис. 5) [10].

Источник питания тока E_C и источник смещения затвора E_3 определяют режим работы схемы. Индуктивно связанные L_C и L_k образуют положительную обратную связь в цепи затвора. Через R_k обозначено внутреннее сопротивление катушки индуктивности – сопротивление потерь. Тогда основные выражения для автогенератора будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_{CT} &= Su_3, \quad u_3 = M \frac{di_L}{dt}, \\ i_{CT} &= SM \frac{di_L}{dt}, \quad u_3 = R_k i_L + L_k \frac{di_L}{dt}, \\ i_C &= C_k \frac{du_C}{dt} = R_k i_k + L_k \frac{d^2 i_L}{dt^2}, \\ i_{CT} &= i_L + i_C = \\ &= i_L + R_k C_k \frac{di_L}{dt} + L_k C_k \frac{d^2 i_L}{dt^2} = SM \frac{di_L}{dt^2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где u_C – напряжение на конденсаторе контура, i_C – ток в конденсаторе и i_{CT} – ток стока – зависят от времени, S – крутизна полевого транзистора, M – взаимная индуктивность.

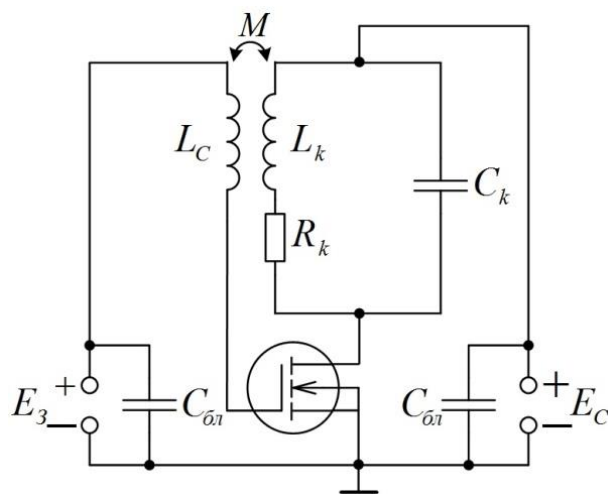


Рис. 5. Схема автогенератора

Примечание: составлено авторами по [10].

После несложных алгебраических преобразований, с учетом обозначений для резонансной частоты $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$ и коэффициента затухания контура $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_k}{L_k} - \frac{SM}{L_k C_k} \right)$ выражение для i_{CT} примет вид:

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{di_L}{dt} + \omega_0^2 i_L = 0. \quad (7)$$

Решение (7) получим в виде $i_L = I_{mL} e^{at} \sin \omega t$, где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2}$ – частота колебаний, оно найдено с использованием метода Рунге – Кутты.

При расчете маршрута значения R_n и L в выражении (2) заменялись на значения r_{An} и l_{An} автогенератора с учетом перехода из декартовых координат в полярные, описываемые выражениями:

$$r_{An} = \sqrt{\left(\frac{di_{Li_n}}{dt} \right)^2 + i_{Li_n}^2},$$

$$l_{An} = \sqrt{\left(\frac{di_{L1_1}}{dt} - \frac{di_{L2_2}}{dt} \right)^2 + (i_{L2_n} - i_{L1_n})^2},$$

где текущему значению токов на фазовой кривой i_{Li_n} ставятся в соответствие положения поворотных пунктов маршрута l_{An} на траектории полета БЛА.

Критерий построения схемы автогенератора задается системой уравнений:

$$\begin{cases} (R_k, C_k, L_k, L_C, M, S) = \arg \min \hat{\delta}; \\ R_k \in \mathbf{R}; C_k \in \mathbf{C}; L_k, L_C \in \mathbf{L}; M \in \mathbf{M}; S \in \mathbf{S}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\hat{\delta} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\gamma_n - \hat{\gamma}_{An})^2} / N$ – среднеквадратическое отклонение курсового угла,

$\hat{\gamma}_{An} = f\left(\frac{di}{dt}, i\right)$ – значения курсового угла,

полученные с помощью автогенератора.

Первое уравнение является целевой функцией, обеспечивающей минимум среднеквадратического отклонения, рассчитанного с использованием автогенератора курсового угла, второе – является внешне системным ограничением как условие физической реализуемости автогенератора. Расчет траекторий по критерию (7) достигается решением системы уравнений относительно множества физически реализуемых параметров автогенератора заданной структуры.

В результате расчетов получено временное распределение тока в индуктивности, отображающее процесс возникновения колебаний (рис. 6а). Гармоническим колебаниям в системе соответствует замкнутая фазовая траектория на фазовой плоскости. На рис. 6б приведен фазовый портрет автогенератора, который соответствует траектории полета БЛА (рис. 6в) при возрастающей точности оценки направления прихода сигналов.

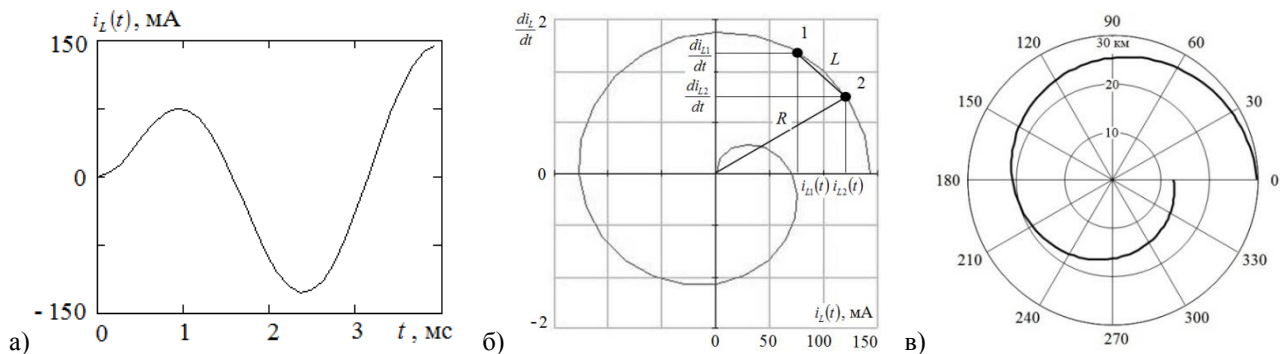


Рис. 6. Распределение тока в индуктивности в процессе возникновения колебаний:

а) возрастающее временное распределение тока в индуктивности; б) фазовый портрет, возникающих колебаний в автогенераторе; в) траектория движения БЛА при высокоточном пеленговании

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 приведены: а) временное распределение тока в индуктивности, б) фазовый портрет при затухании колебаний в автогене-

раторе, в) маршрут полета БЛА при убывающей точности оценки направления прихода сигналов.

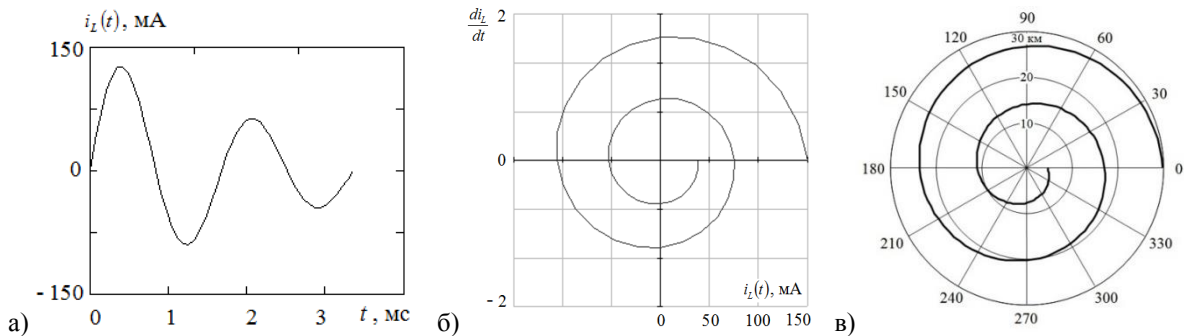


Рис. 7. Распределение тока в индуктивности при затухании колебаний в автогенераторе колебаний:
 а) убывающее временное распределение тока в индуктивности; б) фазовый портрет при затухании колебаний в автогенераторе; в) траектория движения БЛА при низкой точности пеленгования
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Для разработки рекомендаций по применению автогенераторов в качестве датчиков движения по спирали проведены лабораторные исследования схем их реализации.

На рис. 8 изображены: а) временная развертка переходного процесса установления колебаний в автогенераторе, б) фазовый портрет.

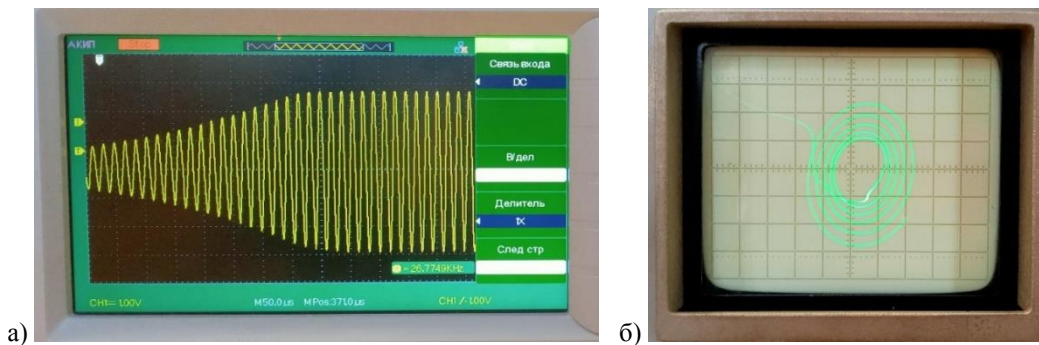


Рис. 8. Лабораторные исследования по реализации схемы автогенератора:
 а) временная развертка переходного процесса установления колебаний в автогенераторе; б) фазовый портрет
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Установлено, что E_z может использоваться в качестве управляющего напряжения, которым изменяются условия самовозбуждения и вид фазовых диаграмм. При сборке электронной схемы необходимо как можно ближе располагать $C_{\text{бл}}$ к источнику для исключения прохождения высокочастотных токов через источник питания. В работе использовались керамические конденсаторы емкостью 0,22 мкФ.

Для преодоления температурной зависимости частоты генерируемых колебаний, прогнозируемых сложностей перестройки одновременно двух и более контуров в многоконтур-

ных схемах, выборе и стабилизации рабочей точки рекомендуется использовать емкостную трехточечную схему Клаппа. Из-за уменьшения коэффициента включения коллекторной цепи в колебательный контур в ней используется контур с высокой добротностью и возможна отдельная регулировка коэффициентов положительной обратной связи и включения. Высокую стабильность первой гармоники схема показала в диапазоне 1 ... 10 МГц. На частотах не более 900 МГц в целях минимизации компонентов целесообразно использовать схему Хартли [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве активного элемента предложено использовать МОП-транзисторы отечественного производства типа 2П301А, 2П301Б, 2П301В (АО «НПП «Завод Искра», г. Ульяновск). При расчете схем следует учитывать, что максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность в электрических режимах эксплуатации указанных транзисторов не превышает 200 мВт. Факт генерации без использования осциллографа можно определить по измерениям тока стока.

Установлено, что фазовые свойства автогенератора с заданной точностью могут использоваться для восстановления траекторий движения БЛА. В зависимости от дисперсии ошибки оценки угловых координат ИРИ выбирается режим возбуждения автогенератора.

При уменьшении дисперсии ошибки оценки угловых координат ИРИ выбирается мягкий режим возбуждения автогенератора с расчетом управляющих токов, а с увеличением ошибок рекомендован жесткий режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы основные задачи навигационного обеспечения воздушных объектов и проведен анализ принципиальных сложностей их решения в интересах автономного полета малогабаритных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа.

Построен алгоритм коррекции траектории полета беспилотных летательных аппаратов по результатам многократного пеленгования источника радиоизлучений в поворотных пунктах маршрута. На основе летных экспериментов с комплексами на БЛА «Орлан-10», «Феникс» и «Грант-М» оценены значения среднеквадратической ошибки местоопределения.

Проведен анализ схем автогенераторов, которые могут использоваться в качестве резервных средств автономного полета в условиях отсутствия радиокомандной коррекции маршрута. По результатам лабораторных испытаний обоснованы параметры схем автогенераторов.

Список источников

1. Кинкулин И. Е. Глобальные навигационные спутниковые системы // Алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. М. : Радиотехника, 2018. 325 с.
2. Карпик П. А., Сернов В. Г., Вдовин В. С. Система дифференциальной коррекции и мониторинга как основа перспективной национальной инфраструктуры навигации и позиционирования с повышенной точностью // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 9, № 2. С. 3–9.
3. Кузнецов А. Г., Измайлов Е. А., Портнов Б. И. Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы двух классов точности // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2014. № 8. С. 24–32.
4. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. М. : Наука, 1979. 291 с.
5. Коренной А. В. Методы анализа и синтеза в прикладных задачах навигации, связи и управления. М. : Радиотехника, 2015. 162 с.
6. Разиньков С. Н., Богословский А. В., Гордиенко С. А. Экспериментальное определение местоположения источников радиоизлучений с применением высоко мобильного цифрового обнаружителя-пеленгатора // Вестник Рязанского радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 21–31.
7. Осипов Е. Б. Способ вывода летательного аппарата на радиоизлучающий объект с использованием оптимальной обработки результатов много-

References

1. Kinkulin I. E. Globalnye navigatsionnye sputnikovye sistemy. Algoritmy funktsionirovaniia apparatury potrebitelia. Moscow : Radiotekhnika, 2018. 325 p. (In Russian).
2. Karpik P. A., Sernov V. G., Vdovin V. S. System for Differential Correction and Monitoring as the Base of the Next Generation National Infrastructure for Navigation and High-Precision Positioning. Interexpo Geo-Siberia. 2019. Vol. 9, No. 2. P. 3–9. (In Russian).
3. Kuznetsov A. G., Izmailov E. A., Portnov B. I. Modern Strapdown Inertial Navigation Systems of Two Accuracy Classes. Trudy MIREA. Navigatsiia i upravlenie letatelnyimi apparatami. 2014. No. 8. P. 24–32. (In Russian).
4. Bromberg P. V. Theory of Inertial Navigation Systems. Moscow : Nauka, 1979. 291 p. (In Russian).
5. Korennoi A. V. Metody analiza i sinteza v prikladnykh zadachakh navigatsii, svyazi i upravleniia. Moscow : Radiotekhnika, 2015. 162 p. (In Russian).
6. Razinkov S. N., Bogoslovsky A. V., Gordienko S. A. Experimental Determination of Radio Emission Sources Location Using Highly Mobile Digital Direction Finder Detector. Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University. 2022. No. 81. P. 21–31. (In Russian).
7. Osipov E. B. Sposob vyvoda letatel'nogo apparata na radioizluchaiushchii obekt s ispolzovaniem optimalnoi obrabotki rezultatov mnogokratnogo pelen-

- кратного пеленгования // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия: Системы автоматизированного проектирования и системы автоматизации производства. 2003. № 3. С. 21–25.
8. Коренной А. В. Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы. М. : Радиотехника, 2012. 112 с.
9. Гулевич С. П., Александровский Б. В., Веселов Ю. Г. Обоснование основных требований к характеристикам движения беспилотных летательных аппаратов двойного назначения // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 8. С. 25–39.
10. Змий Б. Ф. Радиотехнические цепи и сигналы. Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. 336 с.
- govaniia. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serii: Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniia i sistemy avtomatizatsii proizvodstva. 2003. No. 3. P. 21–25. (In Russian).
8. Korennoi A. V. Obnaruzhenie, raspoznavanie i opredelenie parametrov obrazov obektov. Metody i algoritmy. Moscow : Radiotekhnika, 2012. 112 p. (In Russian).
9. Gulevich S. P., Aleksandrovsky B. V., Veselov Yu. G. Obosnovanie osnovnykh trebovanii k kharakteristikam dvizhenii bespilotnykh letatelnykh apparatov dvoynogo naznachenii. Problemy bezopasnosti poletov. 2008. No. 8. P. 25–39. (In Russian).
10. Zmiy B. F. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. Voronezh : Military Educational and Scientific Center of Air Forces “N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy”, 2017. 336 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Богословский – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники.

С. Н. Разиньков – доктор физико-математических наук, доцент, профессор.

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Bogoslovsky – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Radioelectronics.

S. N. Razinkov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor.

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.