

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

- 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;**  
**05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;**  
**05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;**  
**05.07.05 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;**  
**05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;**  
**05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов;**  
**05.07.10 – Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности**

УДК 629.7.015.4: 629.7.018.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-16-24

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В НАЗЕМНЫХ  
УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ ДАННЫХ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

**В.Н. АКИМОВ<sup>1</sup>, Д.Н. ИВАНОВ<sup>1,2</sup>, С.Г. ПАРАФЕСЬ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Долгопрудненское научно-производственное предприятие, г. Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

В статье предложена методика исследования динамического поведения беспилотного летательного аппарата (БЛА) в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента. Динамические исследования БЛА и отдельных компонентов его бортовой аппаратуры представляют одну из важнейших составляющих этапа наземной отработки БЛА. Наиболее достоверную информацию о вибрационном состоянии БЛА и его бортовой аппаратуры дает летный эксперимент. Однако для выявления реального вибрационного состояния БЛА требуется установка достаточно большого количества акселерометров, что технически может быть нереализуемо во время летных исследований. Решить данную проблему предлагается за счет проведения наземных динамических испытаний. Определив характер и уровень вибрации при натурном (летном) эксперименте в «опорных» местах, возможно далее в лабораторных условиях с высокой степенью достоверности получить вибрации (амплитудные и фазовые частотные характеристики, спектр и т. д.) и в других местах конструкции БЛА. Для этого по всему корпусу БЛА необходимо установить акселерометры, в том числе в «опорных» местах, которые были использованы в летном эксперименте. При помощи возбуждения БЛА поочередно вдоль продольной и поперечных осей вибрационным спектром, полученным в натурном эксперименте, воспроизводится вибрационный спектр в тех местах, где установлены акселерометры в лабораторном эксперименте. При этом задание вибрации осуществляется по «опорным» акселерометрам, как и в натурном эксперименте. В дальнейшем полученный вибрационный процесс может быть перенесен на автономные исследования системы автоматического управления и ее отдельных агрегатов, рулевого привода, системы «руль – привод» и др. для оценки их функционирования в данных условиях вибрации. Помимо основных положений методики в статье представлена принципиальная схема и приведен пример исследования динамического поведения БЛА в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат (БЛА), динамическое поведение, вибрационные испытания, летный эксперимент, наземный эксперимент, методика.

**ВВЕДЕНИЕ**

Динамические испытания беспилотного летательного аппарата (БЛА) и его отдельных агрегатов являются одной из важнейших составляющих этапа наземных испытаний. Они предназначены для проверки прочности конструкции БЛА и безотказности функционирования бортового оборудования в условиях динамического (переменного по времени) нагружения, а также выявления областей опасных резонансных и самовозбуждающихся колебаний. Рассматриваются наиболее маневренные БЛА классов «поверхность – воздух», «воздух – воздух», «воздух – поверхность», для которых проблемы динамики конструкций стоят особенно остро [1].

Динамические испытания по методологии использования их результатов принято делить на два класса [2]. К первому классу относятся исследовательские испытания, основными целями которых являются: определение динамических характеристик, необходимых для уточнения математических моделей исследования динамического состояния БЛА, нахождение коэффициентов систем уравнения движения БЛА при математическом моделировании, исследование характера динамической реакции конструкции на определенные виды воздействий. К таковым испытаниям в первую очередь относятся испытания по определению спектра собственных частот и форм колебаний конструкции (модальные испытания), исследованию частотных характеристик рулевых приводов и элементов тракта системы автоматического управления.

Ко второму классу относятся испытания по подтверждению работоспособности БЛА при воздействии переменных во времени нагрузок в условиях наземной эксплуатации и в полете. Таковыми являются испытания конструкции БЛА и бортового оборудования на вибропрочность и виброустойчивость, на ударную прочность и ударную устойчивость, на воздействие линейных инерционных нагрузок и акустического шума. Важнейшими среди перечисленных видов испытаний являются вибрационные испытания [2–5].

## ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БЛА В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ ДАННЫХ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Реальный вибрационный процесс весьма сложен и носит пространственный характер. Вибрационные процессы при экспериментальной наземной отработке БЛА могут существенно отличаться от реальных процессов и представляют лишь модели вибраций, направленные вдоль фиксированных осей. Во время наземной отработки используют модели периодической (синусоидальной) или более распространенной в настоящее время широкополосной случайной вибрации (ШСВ) [2].

Широкополосная случайная вибрация – это случайный процесс, в результате которого в сигнале возбуждения фигурируют частотные компоненты, амплитуда и фаза которых изменяется случайным образом. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) обрабатывает случайный сигнал возбуждения и определяет значение каждой его частотной составляющей (для вибрационного процесса – это ускорение, измеряемое, как правило, в единицах  $g$ ), которая далее возводится в квадрат. Тем самым при ШСВ задаваемое и воспроизводимые ускорения выражаются в среднеквадратических значениях  $g^2$  [6].

При проведении исследования динамического состояния БЛА необходимо выбрать оборудование (вибростенд), с помощью которого будут производиться воздействия на объект исследования. При ШСВ вибрационная система имеет номинальную толкающую силу, которая определяется среднеквадратическим значением вибрационной системы. Сила определяется по второму закону Ньютона  $F = m \cdot a$ , где  $m$  – масса,  $a$  – ускорение. Так как толкающая сила выражается среднеквадратическим значением, то и создаваемое вибрационной системой ускорение будет среднеквадратическим. Для проведения исследования необходимо знать максимально возможное перемещение вибратора, которое должно быть не более того, что указано в паспорте на вибростенд. С этой целью переходят от среднеквадратического значения воспроизводимого вибрационного ускорения к его амплитудному значению или размаху подвижной части стола вибростенда. Отношение пиковой (амплитудной) величины сигнала к его среднеквадратическому значению называется пик-фактором. Теоретическое значение пик-фактора для случайных процессов, равное бесконечности, на практике принимают равным трем, исходя из закона нормального распределения случайного сигнала. При этом ограничение интервала, равного  $\pm 3\sigma$ , позволяет охватить около 99,7 % всех возможных амплитудных значений реального случайного сигнала. Таким образом, максимальный размах вибратора составит шесть среднеквадратических перемещений, а максимальное пиковое значение амплитуды ускорения равно трем средне-

квадратическим значениям амплитуды. Под массой понимается суммарная масса подвижных частей: подвижная катушка вибратора, оснастка и испытуемый объект.

Таким образом, для воспроизведения ШСВ на БЛА при использовании вибрационного оборудования (вибростенда) необходимо знание уровня среднеквадратического ускорения и зависимости спектрального уровня мощности от частоты (спектр). Истинный спектр вибрации можно получить путем натурального (летного) эксперимента.

Действительно, наиболее достоверную информацию о вибрационном состоянии БЛА и его бортовой аппаратуры дает летный эксперимент. Однако для выявления реального вибрационного состояния БЛА требуется установка достаточно большого количества акселерометров, что технически может быть нереализуемо во время летных исследований. Решить данную проблему предлагается за счет проведения наземных динамических испытаний БЛА.

Определив характер и уровень вибрации при натурном (летном) эксперименте в «опорных» местах, возможно далее в лабораторных условиях с высокой степенью достоверности получить вибрации (амплитудные и фазовые частотные характеристики, спектр и т. д.) и в других местах конструкции БЛА. Для этого по всему корпусу БЛА необходимо установить акселерометры, в том числе в «опорных» местах, которые были использованы в летном эксперименте. Возбуждая БЛА поочередно вдоль продольной и поперечных осей вибрационным спектром, полученным в натурном эксперименте, воспроизводится вибрационный спектр в тех местах, где установлены акселерометры в лабораторном эксперименте. При этом задание и контроль вибрации осуществляется по «опорным» акселерометрам, как и в натурном эксперименте.

Принципиальная схема исследования динамического поведения БЛА в наземных условиях согласно предлагаемой методике представлена на рис. 1. БЛА подвешивается на упругом подвесе; на его корпусе устанавливаются акселерометры в интересующих исследователя местах.

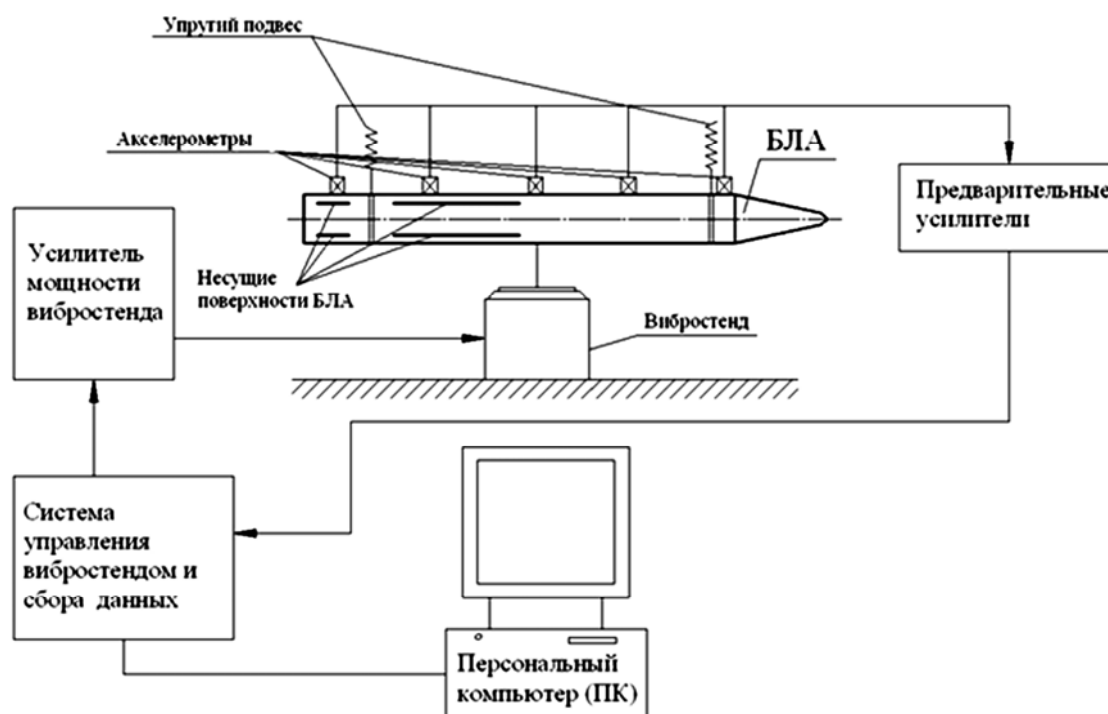


Рис. 1. Принципиальная схема исследования динамического поведения БЛА в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента

Fig. 1. The schematic diagram of the UAV dynamic behavior research in ground conditions account of the flight experiment data

Сигнал вибрационного процесса в «опорной» точке, записанный в ходе летных испытаний, посредством преобразования Фурье представляется [7]:

$$F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt, \quad (1)$$

где  $F\{x(t)\}$  – преобразование Фурье от сигнала;  $x(t)$  – сигнал вибрационного процесса во временном интервале. При этом для корректного преобразования, в соответствии с теоремой В.А. Котельникова (Найквиста – Шеннона) о выборках [8], частота выборок  $f_s$  должна быть как минимум вдвое больше максимальной частоты сигнала  $f_{\text{вх max}}$ :

$$f_s \geq 2 f_{\text{вх max}}.$$

На практике вместо интегрирования по времени от  $-\infty$  до  $+\infty$  применяют интегрирование от 0 до времени  $T$ . В этом случае формула (1) имеет вид

$$F\{x(t)\} = \int_0^T x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2)$$

В случае нахождения спектра вибрационного процесса на ограниченном отрезке времени формула (2) может быть записана как [9]

$$F\{X(k)\} = \int_0^T e^{-j\frac{2\pi k}{T}t} x(t) dt. \quad (3)$$

Учитывая, что вместо непрерывного сигнала вибрационного процесса используются его цифровые отсчеты, в выражении (3) интеграл заменяется на конечную сумму слагаемых. Длительность рассматриваемого сигнала определяется количеством цифровых отсчетов  $N$ . Преобразование Фурье для цифровых отсчетов сигнала вибрационного процесса имеет вид

$$F\{X(k)\} = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi}{T}kn} x(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{T}kn\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{T}kn\right) \right] x(n). \quad (4)$$

С помощью электродинамического вибростенда спектром, полученным в натурном эксперименте, производится виброн нагружение БЛА. В момент вибрационного нагружения БЛА с других акселерометров происходит запись сигналов во временной области.

### **ПРИМЕР ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БЛА В НАЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ С УЧЕТОМ ДАННЫХ ЛЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

С целью пояснения основных положений рассматриваемой методики приведем пример исследования динамического поведения БЛА в лабораторных условиях с учетом данных летного эксперимента. Запись вибрации БЛА во временной области, полученной в летном эксперименте, – график зависимости вибрационного относительного ускорения  $\bar{n}$ , выраженного в единицах ускорения свободного падения  $g$ , в зависимости от относительного времени  $\bar{t}$ , представлена на рис. 2.

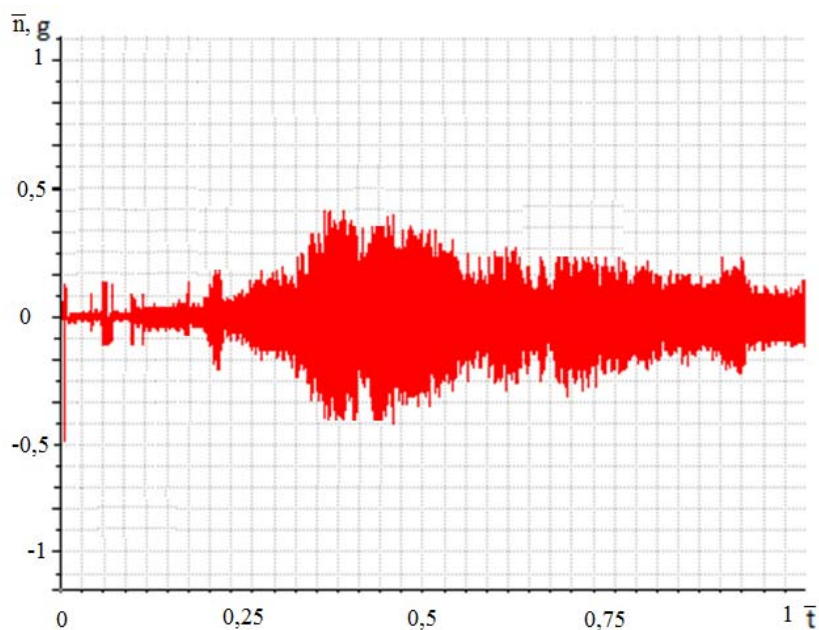


Рис. 2. Запись вибрации БЛА, полученная в летном эксперименте  
Fig. 2. The UAV vibration recording obtained in the flight experiment

Применяя алгоритм преобразования Фурье к записи вибрации БЛА во временной области, получим спектр вибрации БЛА в частотной области, рис. 3. Спектр – зависимость относительной спектральной плотности мощности  $\bar{S}$ , выраженной в  $g^2/Гц$ , от частоты  $f$  (Гц). Представленный спектр вибрации соответствует «опорной» точке – месту установки акселерометра при проведении летного эксперимента.

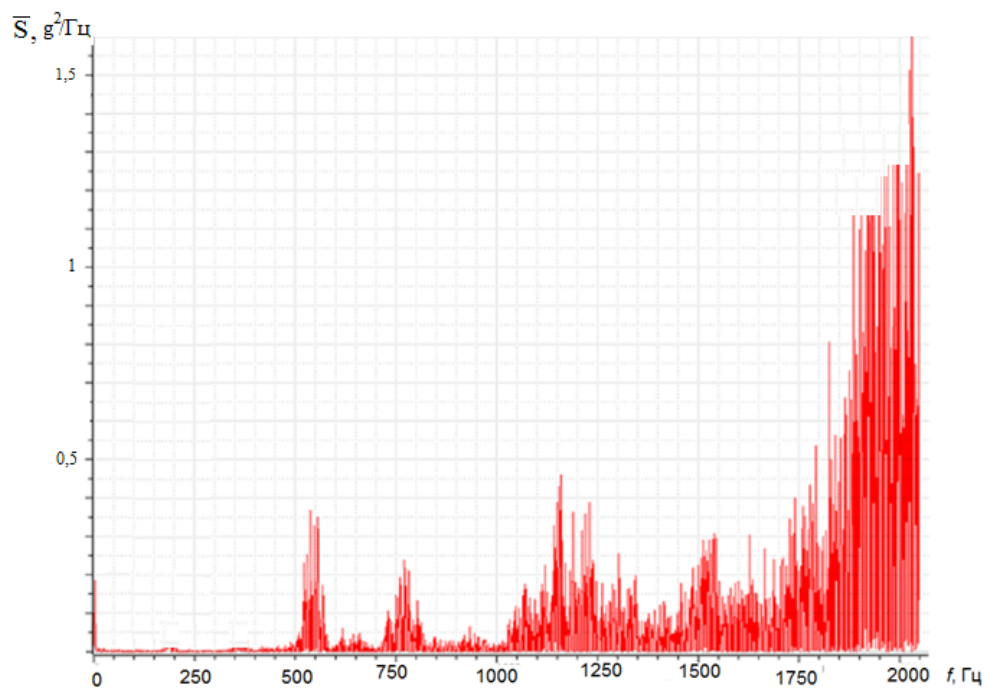


Рис. 3. Спектр вибрации БЛА в точке установки акселерометра в летном эксперименте  
Fig. 3. The UAV vibration spectrum at the point of accelerometer installation in the flight experiment

Возбуждение БЛА вдоль поперечной оси может иметь ряд трудностей, которые могут повлиять на результаты эксперимента. Правило возбуждения посредством вибростенда регламентирует прикладывать возбуждающую силу в месте центра тяжести изделия. Но при жестком закреплении БЛА к вибростенду изменяется и его амплитудно-частотная характеристика. Что делать в данном случае?

Предлагается применить принцип Сен-Венана, суть которого состоит в том, что при удалении от места приложения силы возбуждения на большее расстояние, будет уменьшаться и искажение, вызванное данной силой (закреплением). Таким образом, возбуждая далее БЛА поочередно вдоль продольной и поперечных осей вибрационным спектром, полученным в натурном эксперименте (рис. 3), воспроизводится вибрационный спектр в иных местах, а именно там, где установлены акселерометры в лабораторном эксперименте. Спектр, полученный в наземном эксперименте (в другом месте) при вибрационном возбуждении спектром, полученным в натурном эксперименте, представлен на рис. 4.

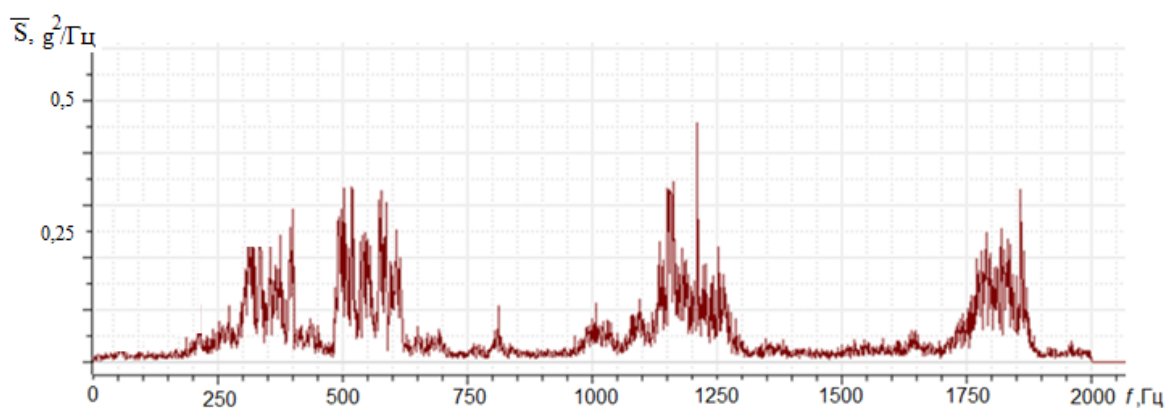


Рис. 4. Спектр вибрации БЛА в точке установки акселерометра в лабораторном эксперименте  
Fig. 4. The UAV vibration spectrum at the point of accelerometer installation in the laboratory experiment

Отметим, что в условиях воспроизводимого подобным образом вибрационного процесса возможно проведение в дальнейшем различных исследований, связанных с наземной отработкой БЛА и его бортовых систем, в частности: исследование системы автоматического управления; проверка функционирования бортовой аппаратуры; исследование характеристик системы «руль – привод» и ряд других.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика исследования динамического поведения БЛА в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента. Натурные условия, реализуемые в полете, дают наиболее достоверную информацию о вибрационном состоянии БЛА и его бортовой аппаратуры. Однако для выявления реального вибрационного состояния БЛА требуется установка достаточно большого количества акселерометров, что технически может быть нереализуемо во время летных исследований. Решить данную проблему предлагается за счет проведения наземных динамических испытаний. Методика позволяет по результатам измерения вибрации при натурном (летном) эксперименте в нескольких «опорных» местах воспроизводить далее в лабораторных условиях вибрации с высокой степенью достоверности и в других местах конструкции БЛА. При этом задание и контроль вибрации в лабораторном эксперименте осуществляется по «опорным» акселерометрам, как и в натурном эксперименте. В дальнейшем полученный вибрационный процесс может быть перенесен на автономные исследования системы автомати-

ческого управления и ее отдельных агрегатов, рулевого привода, системы «руль – привод» и других для оценки их функционирования в данных условиях вибрации.

Помимо основных положений методики представлена принципиальная схема и приведен пример исследования динамического поведения БЛА в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Парафесь С.Г., Туркин И.К.** Актуальные задачи аэроупругости и динамики конструкций высокоманевренных беспилотных летательных аппаратов. М.: МАИ, 2016. 184 с.
2. **Афанасьев П.П.** Испытания летательных аппаратов (беспилотные летательные аппараты) / А.Н. Геращенко, И.С. Голубев, В.В. Доронин, В.А. Жестков, И.П. Кириллов, С.Б. Левочкин, С.С. Левочкин, С.Г. Парафесь. Калуга: Издатель Захаров С.И. (СерНа), 2016. 528 с.
3. **Бакулин Я.Ю., Журавлев В.Ю.** Виброиспытания изделий ракетно-космической техники // Решетневские чтения. Часть 2. 2014. С. 123–124.
4. **Парпуц А.А., Панкеев Е.С., Мусонов В.М.** Вибрационные испытания конструкций летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 55-летия Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. В 2-х т. 2015. Т. 1. С. 714–715.
5. **Чухлебов Р.В.** Экспериментальное исследование вибрации конструкции авиационного изделия при действии полетных нагрузок / А.Н. Лошкарев, А.С. Сидоренко, В.Г. Дмитриев // Вестник МАИ. 2017. Т. 24. № 3. С. 51–59.
6. **Бейкер Р.** Введение в вибрацию. М.: LDS, 1994. 44 с.
7. **Блейхут Р.** Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.
8. **Зиятдинов С.И.** Восстановление сигналов по его выборкам на основе теоремы отсчетов Котельникова // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 5. С. 44–47.
9. **Rauscher C., Janssen V., Minihold R.** Fundamentals of spectrum analysis. 6<sup>th</sup> ed. München: Rohde & Schwarz, 2008, 208 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Акимов Владимир Николаевич**, доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке – главный конструктор Долгопрудненского научно-производственного предприятия, mail@dnnp.biz.

**Иванов Дмитрий Николаевич**, начальник испытательного центра Долгопрудненского научно-производственного предприятия, аспирант кафедры проектирования и прочности авиационно-ракетных и космических изделий МАИ, ivanov\_dn\_07@mail.ru.

**Парафесь Сергей Гаврилович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и прочности авиационно-ракетных и космических изделий МАИ, s.parafes@mail.ru.

## RESEARCH TECHNIQUE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE DYNAMIC BEHAVIOR IN GROUND CONDITIONS WITH ACCOUNT OF FLIGHT EXPERIMENT DATA

Vladimir N. Akimov<sup>1</sup>, Dmitry N. Ivanov<sup>1,2</sup>, Sergey G. Parafes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Dolgoprudny, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

### ABSTRACT

The authors of this article propose a research technique of unmanned aerial vehicle (UAV) dynamic behavior in ground conditions with account of flight experiment data. Dynamic researches of UAV and separate components of its onboard equipment are one of the most important tasks of the ground testing stage of UAV. The flight experiment gives the most reliable information about the vibration condition of the UAV and its onboard equipment. However to identify the real vibration condition of the UAV requires the installation of a sufficiently large number of accelerometers, which technically can be unrealizable during flight studies. It is proposed to solve this problem by conducting ground dynamic tests. Having determined the nature and level of vibration during the full-scale (flight) experiment in the "reference" places, it is possible further in the laboratory with a high degree of reliability to obtain vibrations (amplitude and phase frequency characteristics, spectrum, etc.) in other places of the UAV construction. To do this, it is necessary to install accelerometers throughout the UAV airframe, including the "reference" places that were used in the flight experiment. By exciting the UAV alternately along the longitudinal and lateral axes with the vibration spectrum obtained in the full-scale experiment, the vibration spectrum is reproduced in those places where accelerometers are installed in the laboratory experiment. In this case, the vibration task is carried out by "reference" accelerometers, as in the full-scale experiment. In the future, the resulting vibration process can be transferred to autonomous studies of the automatic control system and its individual units, actuator, rudder – drive system, etc. to assess their functioning in these vibration conditions. In addition to the main provisions of the technique, the article presents a schematic diagram and an example of the dynamic behavior research of UAV in ground conditions with account of flight experiment data.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV), dynamic behavior, vibration tests, flight experiment, ground experiment, technique.

### REFERENCES

1. Parafes', S.G. and Turkin, I.K. (2016). *Aktualnyye zadachi aerouprugosti i dinamiki konstruktivnykh vysokomanevrennykh bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Actual problems of aeroelasticity and dynamics of structures of highly maneuverable unmanned aerial vehicles]. Moscow: MAI, 184 p. (in Russian)
2. Afanas'ev, P.P., Gerashchenko, A.N., Golubev, I.S., Doronin, V.V., Zhestkov, V.A., Kirillov, I.P., Lyovochkin, S.B., Lyovochkin, S.S. and Parafes', S.G. (2016). *Ispytaniya letatelnykh apparatov (bespilotnyye letatelnyye apparaty)* [Testing of aircraft (unmanned aerial vehicles)]. Kaluga: Izdatel Zaharov S.I. (SerNa), 528 p. (in Russian)
3. Bakulin, Yu.Ya. and Zhuravlev, V.Yu. (2014). *Vibroispytaniya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Vibration tests of rocket and space technology products]. *Reshetnevskiyе chteniya* [Reshetnev's readings], part 2, pp. 123–124. (in Russian)
4. Parpuc, A.A., Pankeev, E.S. and Musonov, V.M. (2015). *Vibratsionnyye ispytaniya konstruktivnykh letatelnykh apparatov* [Vibration tests of aircraft structures]. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics], the Proceedings of the XI International Research to Practice Conference, to Mark the 55-th Anniversary of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology in 2 volumes, vol. 1, pp. 714–715. (in Russian)
5. Chukhlebov, R.V., Loshkarev, A.N., Sidorenko, A.S. and Dmitriev, V.G. (2017). *Ekspериментальное исследование вибрации конструкции авиационного изделия при действии полетных нагрузок* [Experimental research of an aviation product structure vibration under flight loads factor]. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], vol. 24, no. 3, pp. 51–59. (in Russian)



6. **Baker, R.** (1994). *Vvedeniye v vibratsiyu* [Introduction to vibration]. Moscow: LDS, 44 p. (in Russian)
7. **Blahut, R.E.** (1989). *Fast Algorithms for Digital Signal Processing*, Per. s angl. Moscow: Mir, 448 p.
8. **Ziatdinov, S.I.** (2010). *Vosstanovleniye signalov po ego vyborkam na osnove teoremy otschetov Kotelnikova* [Reconstruction of signals by its samples on the basis of Kotelnikov sampling theorem]. *Journal of Instrument Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 44–47. (in Russian)
9. **Rauscher, C., Janssen, V. and Minihold, R.** (2008). *Fundamentals of spectrum analysis*. 6<sup>th</sup> ed. München: Rohde & Schwarz, 208 p.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir N. Akimov**, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director for Science – Chief Designer of Dolgoprudny Research and Production Enterprise, mail@dnp.biz.

**Dmitry N. Ivanov**, Head of Testing Center, Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Postgraduate Student of the Design and Strength of Aircraft, Rocket and Space Products Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), ivanov\_dn\_07@mail.ru.

**Sergey G. Parafes'**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Design and Strength of Aircraft, Rocket and Space Products Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), s.parafes@mail.ru.

Поступила в редакцию 12.03.2019  
Принята в печать 21.05.2019

Received 12.03.2019  
Accepted for publication 21.05.2019