

УДК 629.7.018.4

А. В. ЧУМАЧЕНКО, И. В. КОРСИЧЕНКО, Ю. И. МАЛЕЕВА*НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Украина*

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ НА СЛУЧАЙНУЮ ВИБРАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

Проводится исследование вибрационных нагрузок на аппаратуру системы управления беспилотных летательных аппаратов во время полета. Выполняется разложение полученной спектральной плотности вибрационных нагрузок путем определения синусоидальной и случайной составляющей. Рассматривается обработка полученных результатов различными методами сглаживания. Устанавливаются технические требования к аппаратуре системы управления беспилотного летательного аппарата вертолетного типа исполнения класса «микро».

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, вибрационная нагрузка, медианная фильтрация, синусоидальная вибрация, система управления, широкополосная случайная вибрация.

Введение

Усиливающийся интерес военных и гражданских потребителей к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) вовлекает в их проектирование и производство все большее количество предприятий. С каждым годом область применения БПЛА расширяется. Они используются в сельском, лесном хозяйстве (мониторинг пожаров), энергетике, вооруженными силами (для контроля границ) и т.д.

На сегодняшний день в Украине данное направление является одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся, что подтверждается текущими работами [1-3].

Перед разработчиками стоит важная задача обеспечения функциональной безопасности при проектировании БПЛА. Для этого при разработке данного типа аппаратов необходимо заложить достаточные требования для выполнения задачи по безопасной работе.

Ввиду сложности и высокой стоимости летных испытаний, актуальной является задача проведения стендовых испытаний БПЛА в целом и его составных частей, в частности – на воздействие вибрации. Использование штатной технологической цепочки отработки аппаратуры системы управления (СУ) БПЛА в наземных условиях позволит сократить сроки разработки и снизить ее стоимость.

Постановка задачи

Целью настоящей исследовательской работы является определение технических требований к аппаратуре системы управления беспилотного летательного аппарата вертолетного типа исполнения

класса «микро» (масса до 10 кг, время полета около 1 часа и высотой полета до 1 км) при воздействии вибрации; норм параметров воздействий, соответствующих определенным условиям эксплуатации; категорий и методов стендовых испытаний оборудования.

Данная работа выполняется в рамках разработки НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД системы управления для малого беспилотного вертолета, представленного на рисунке 1.

Анализ требований в основных отраслях авиационно-космической промышленности

Несмотря на динамику развития отрасли, проведенный анализ показал, что нормативными документами Украины не регламентированы технические требования в части проведения испытаний аппаратуры СУ БПЛА.

Таким образом, для разработки методики испытаний был осуществлен сравнительный анализ существующих требований, регламентированных нормативно-технической документацией в ракетно-космической [4], самолетостроительной [5] и вертолетостроительной отраслях [6]. В результате было выявлено, что наибольший режим нагружения относится к вертолетной технике и в 100 раз превышает режимы нагружения для ракетно-космического направления и в 50 раз превышает для самолетостроительной отрасли.

В связи с этим можно сделать заключение, что при проектировании БПЛА вертолетного типа необходимо закладывать требования, сформированные в вертолетостроительной отрасли [7].

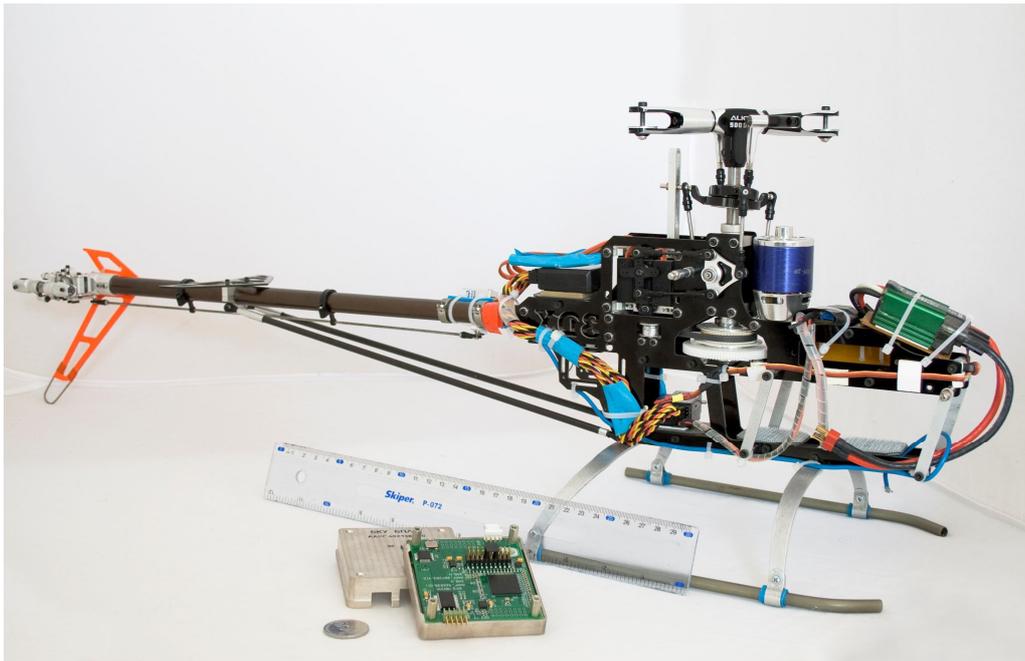


Рис. 1. Малый беспилотный вертолет

Для дальнейших исследований наибольший интерес представляет задача получения значений, определяемых при измерении реальных вибронагрузок в различных режимах полета.

Замер вибрационных нагрузок

Для определения вибрационных нагрузок была разработана программа-методика набора статистических данных.

Замер вибрационных нагрузок производился в месте установки аппаратуры СУ БПЛА поэтапно. Для этого производилась установка вибрационных датчиков в местах размещения аппаратуры СУ на БПЛА и подключение их к комплексу регистрации и обработки виброизмерений. Измерение проводилось с применением 6 вибропреобразователей, установленных по трем взаимно перпендикулярным осям, как показано на рисунке 2 (в дальнейшем количество датчиков было увеличено до 9).

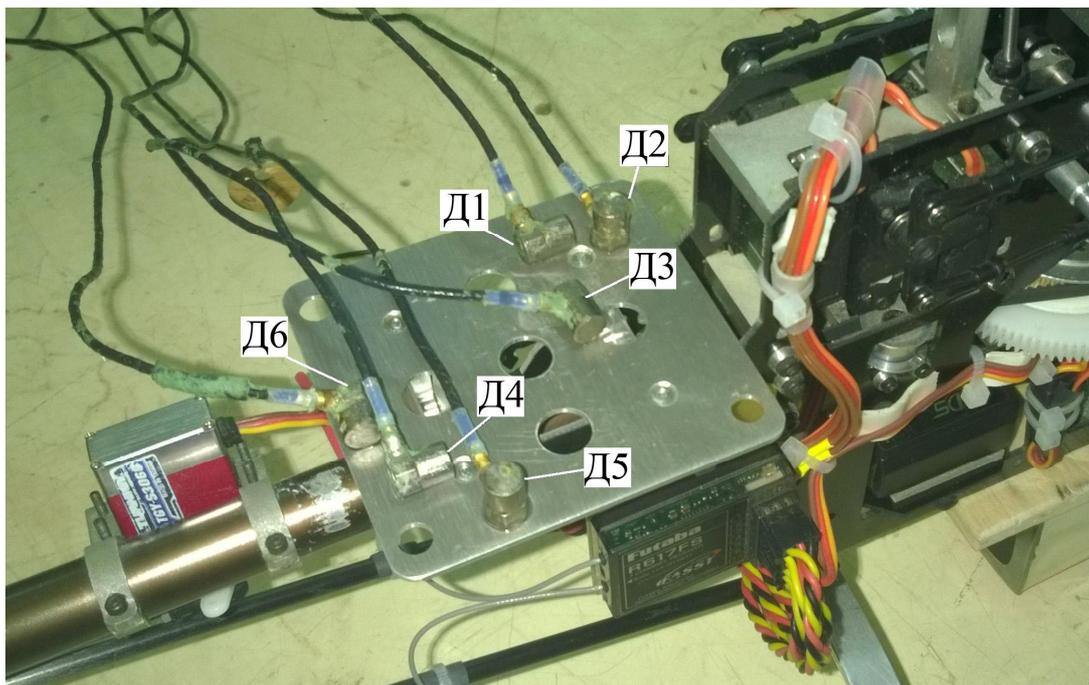


Рис. 2. Расположение вибродатчиков на площадке установки БКУ

На первом этапе БПЛА жестко крепился к поверхности. Затем осуществлялся запуск БПЛА в следующих режимах:

- со снятыми лопастями несущего винта;
- с лопастями несущего винта

и проводился замер вибрационных нагрузок [7].

На втором этапе замер вибрационных нагрузок на БПЛА осуществлялся в режиме полета.

В соответствии с разработанной программно-методикой были проведены многократные испытания.

В ряде испытаний было обнаружено влияние отказов аппаратуры на результаты замеров – при проведении исследований конструкции БПЛА было выявлено и устранено расслоение лопасти несущего винта. При наборе большого объема статистики с работоспособным БПЛА был проведен анализ полученных результатов, приведенный ниже.

Обработка результатов замера вибрации

Съем полученной информации проводился во всем частотном диапазоне специализированным комплексом регистрации вибрации (КРВ), откалиброванным в соответствии с [8].

Одной из функциональных особенностей КРВ является возможность применения различных методов фильтрации для первичной обработки сигнала.

Среди представленных методов:

- скользящего среднего;
- медианная фильтрация;
- взвешенная локальная линейная регрессия;
- взвешенная локальная квадратичная регрессия;
- робастное сглаживание полиномом первой степени;
- робастное сглаживание полиномом второй степени;
- фильтр Савицкого-Голея.

Выбор фильтра осуществляется для каждого испытываемого прибора в индивидуальном порядке. В ходе калибровки производилось задание эталонного сигнала и его сравнение с данными, полученными с помощью КРВ по следующим критериям:

а) количество точек вне диапазона допустимых значений сигнала – в качестве размаха границ процесса принято $\pm 3\sigma$;

б) критерий SSE - сумма квадратов ошибок.

Критерий SSE вычисляется по формуле:

$$SSE = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2, \quad (1)$$

где y_k – фактические значения данных;

\hat{y}_k – значения, полученные после сглаживания;

n – количество точек.

Близость SSE к нулю говорит о хорошем качестве сглаживания данных.

в) максимальная абсолютная ошибка - максимальное значение величины расхождения между смоделированными и фактическими значениями. Рассчитывается по следующей формуле:

$$\max(y_k - \hat{y}_k), k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

В таблице 1 представлены результаты оценки качества сглаживания.

Таблица 1
Количественные критерии оценки качества сглаживания

Метод сглаживания	Количество точек вне допуска	SSE	Максимальная абсолютная ошибка
1. Скользящего среднего	530	2,7311	1,4391
2. Медианная фильтрация	352	2,7191	1,3714
3. Взвешенная локальная линейная регрессия	539	2,6773	1,3793
4. Взвешенная локальная квадратичная регрессия	564	2,6606	1,3672
5. Робастное сглаживание полиномом первой степени	461	2,8301	1,4425
6. Робастное сглаживание полиномом второй степени	459	2,8374	1,4442
7. Фильтр Савицкого-Голея	551	2,6924	1,3799

Анализ результатов, полученных различными методами, показал, что эффективность обработки сигнала методом медианной фильтрации выше. Метод позволяет избавиться от случайных выбросов и вместе с тем сохранить характер кривой.

В связи с недостатком метода медианной фильтрации (невозможность расчета медианы для начальных и конечных точек ряда) была применена процедура Тьюки [10, 11] для обработки концевых значений. Согласно процедуре Тьюки, в качестве сглаженного значения для y_0 (0 – начальный момент времени) предлагается взять медиану трех точек y_0 , y_1 и $(3y_1 - 2y_2)$ для последнего момента используется аналогичная формула.

В результате анализа полученных данных была определена наиболее нагруженная область, что позволило представить результирующие данные в виде спектральных плотностей в частотном диапазоне от 20 Гц до 2000 Гц.

Для обработки результатов замера вибрации были выбраны данные, полученные на каждой секунде испытаний, и обработаны медианным фильтром, что позволило уменьшить уровень шума и исключить импульсные помехи, сохранив при этом характер сигнала. С помощью метода наименьших квадратов была построена огибающая кривая. Это позволило, основываясь на критерии 3σ , выделить всплески, которые были вызваны влиянием синусоидальной вибрации. Для реализации данного воздействия на оборудование СУ БПЛА было принято решение совместить режимы синусоидальной и широкополосной составляющих вибрации аналогично [6].

На базе полученных результатов были определены значения режимов нагружения для последующих стендовых испытаний. В рамках исследования было определено, что на элементы конструкции воздействуют различные нагрузки при различных режимах полета [12]. Вывод был сделан, основываясь на анализе суммарного среднеквадратичного отклонения для каждой секунды снятия данных. При этом наблюдались существенные отличия в суммарных среднеквадратичных значениях, получаемых для различных временных интервалов. Базируясь на данной информации, были выявлены основной режим полета, а также другие. Таким образом, были выделены следующие режимы – взлет, полет, посадка. Режим нагружения для основного режима полета (висение) приведен на рисунке 3.

Для примера на рисунке 4 приведены режимы нагружения для взлета и посадки по оси ОХ.

Так как именно в этих режимах полета БПЛА подвергается наибольшим нагрузкам, они требуют более детального последующего исследования.

Таким образом, были получены воздействующие характеристики на БПЛА, на основе которых определены режимы нагружения для имитации основного режима полета при вибрационных испытаниях.

Выводы

БПЛА и их комплексы на сегодняшний день являются перспективными и динамично развивающимися системами военного и гражданского назначения. Важным шагом в развитии рассматриваемой тематики в Украине является разработка нормативных документов в данной отрасли и их гармонизация с европейскими стандартами.

По результатам выполненных работ был выпущен стандарт предприятия, в котором приводятся общие требования к испытаниям на вибрацию БПЛА размером от 2,5 кг до 15 кг, требования к заданию уровня вибрационных испытаний и методика испытаний на совместное воздействие синусоидальной и случайной вибрации. Дальнейшей целью данных исследований является разработка отраслевого стандарта. В связи с этим для исследуемой аппаратуры СУ БПЛА продолжается набор статистических данных и возможна коррекция характеристик с учетом режимов полета, класса и массы БПЛА, а также в зависимости от категории и зоны использования оборудования. На основании полученных результатов разрабатываются методики и проводятся испытания аппаратуры СУ БПЛА на стендах НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД.

Литература

1. Белогуб, А. В. Совершенствование конструкции ДВС с воздушным охлаждением для беспилотного летательного аппарата [Текст] / А. В. Белогуб, Р. Я. Альперин, А. В. Шаин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 2 (119). – С. 91–96.
2. Попов, А. В. Алгоритм сопровождения объектов в видеопотоке, регистрируемом с беспилотного летательного аппарата [Текст] / А. В. Попов, И. К. Васильева, А. С. Угарова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 6 (123). – С. 77–84.
3. *Результати аналізу основних класів БПЛА для оцінювання можливості їх спільного застосування з армійською авіацією* [Текст] / А. М. Алімпієв, М. І. Ватан, В. В. Тюрін, В. І. Масягін // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2016. – № 1 (45). – С. 6–9.
4. ДСТУ В 3442-96. Система керування ракетною технікою. Види та програми випробувань. Основні положення [Текст]. – Введено вперше ; чинний з 1996-10-18. – К. : Держспоживстандарт України, 1997. – 13 с.
5. *Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний* [Текст]. – М. : АРМАК, 2004. – 53 с.
6. EUROCAE-ED-62. *European Organization for Civil Aviation Equipment (EUROCAE) (Revision-A)* [Text]. – Published on: 2009-02-01. – France, 2009. – 23 p.
7. ГОСТ 20.57.406-81. *Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний* [Текст]. – Введ. 1982-01-01. – М. : Стандартинформ, 2005. – 15 с.

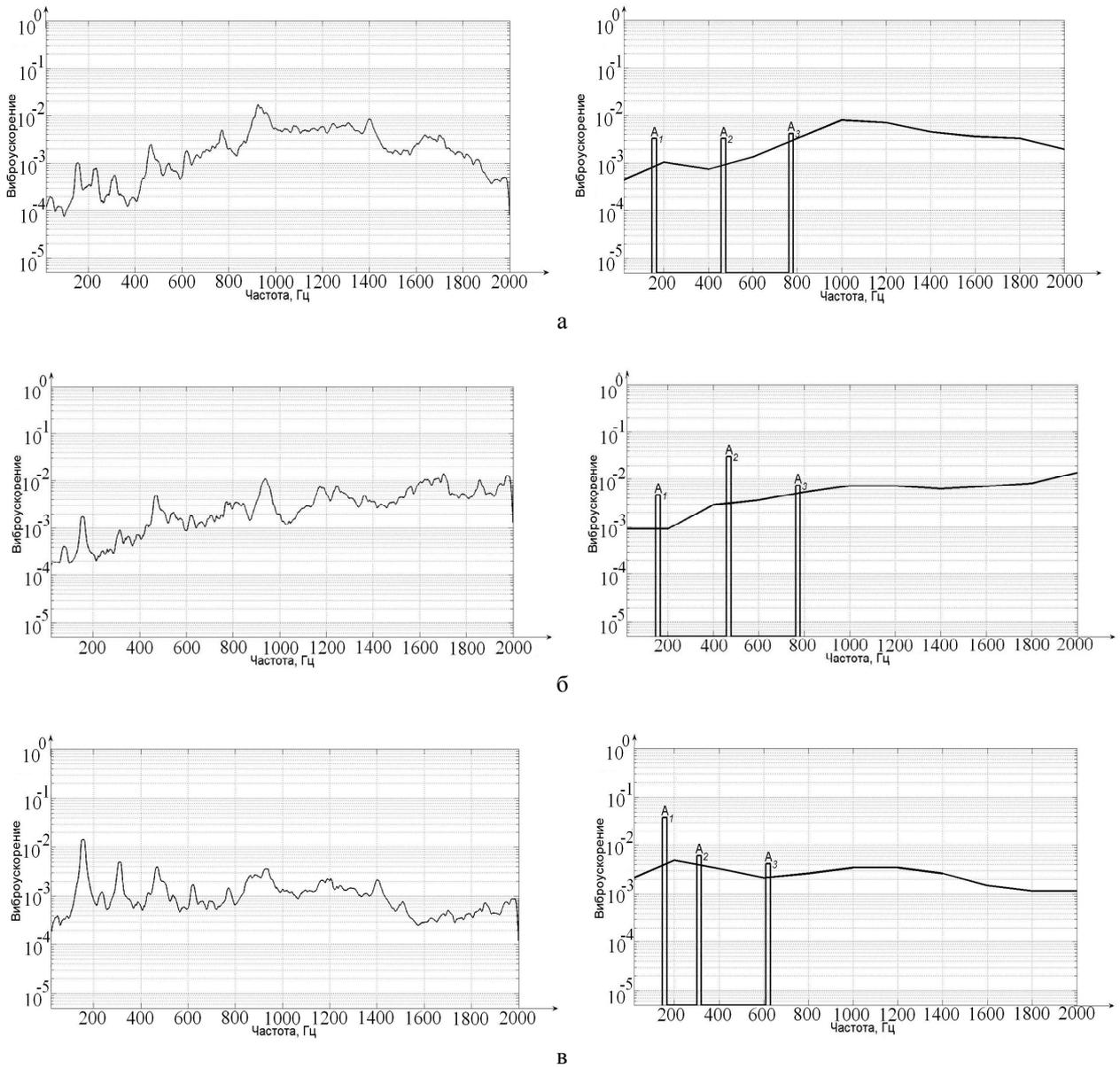


Рис. 3. Исходный сигнал и режим нагружения для БПЛА в основном режиме полета при воздействии вибрации: а – по оси X, б – по оси Y, в – по оси Z

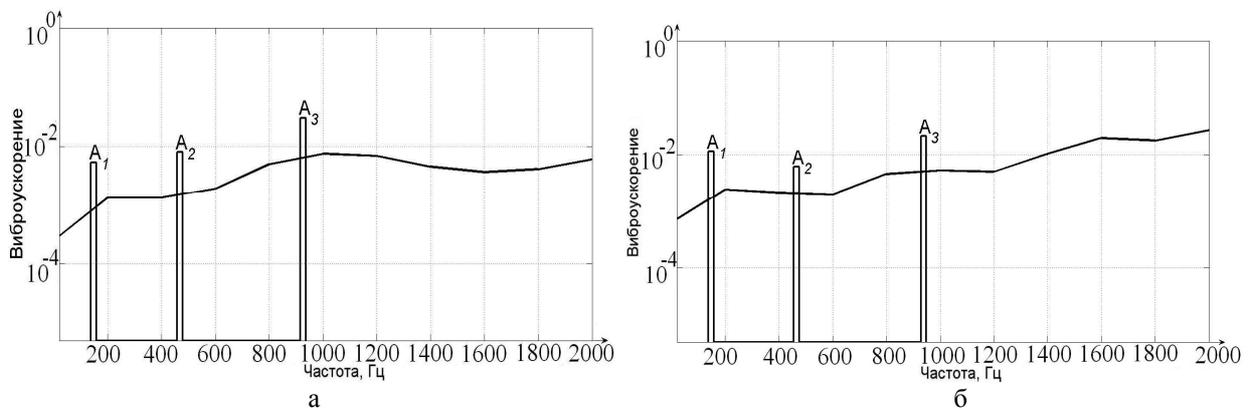


Рис. 4. Режим нагружения для БПЛА при воздействии вибрации для оси OX: а – режим «Взлет», б – режим «Посадка»

8. ISO 16063-21:2003. *Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer* [Text]. – Published on: 2003-08-15. – Switzerland, 2003. – 73 p.

9. Дьяконов, В. *MATLAB обработка сигналов и изображений. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, И. Абраменкова. – СПб. : Питер, 2002. – С. 176-239.*

10. Tukey, J. W. *Discussion emphasizing the connection between analysis of variance and spectrum analysis* [Text] / J. W. Tukey // *Technometrics*. – 1961. – Vol. 3. – P. 191–219.

11. *Цифровая обработка изображений в информационных системах [Электронный ресурс] / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Режим доступа: http://sernam.ru/book_kir.php?id=25. – 6.05.2016.*

12. *Техническая эксплуатация авиационной техники [Текст] / В. Г. Александров, Б. В. Выржиковский [и др.]. – М. : Военное издательство, 1967. – С. 53-66.*

References

1. Belogub, A. V., Al'perin, R. Ya., Shain, A. V. *Sovershenstvovanie konstruksii DVS s vozdushnym okhlazhdeniem dlya bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Optimisation of air-cooled piston engine for UAVs]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 2 (119), pp. 91–96.

2. Popov, A. V., Vasil'eva, I. K., Ugarova, A. S. *Algoritm soprovozhdeniya ob"ektov v videopotoke, registriruemom s bespilotnogo letatel'nogo apparata* [The algorithm for object tracking on a video flow recorded from unmanned aerial vehicles]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 6 (123), pp. 77–84.

3. Alimpiyev, A. M., Vatan, M. I., Tyurin, V. V., Masyahin V. I. *Rezultaty analizu osnovnykh klasiv BPLA dlya otsinyvannaya mozhlyvosti yikh spil'noho zastosuvannaya z armiy's'koyu aviatsiyeyu* [The result of analyses of great classes unmanned aircraft evaluation the opportunity of joint employment with army aviation]. *Sistemy ozbroynnaya i viys'kova tekhnika –*

Systems of arms and military equipment, 2016, no. 1 (45), pp. 6–9.

4. DSTU V 3442-96. *Systema keruvannya raketnoyu tekhnikoyu. Vydy ta prohramy vyprobovan'. Osnovni polozhennya* [Military State Standard of Ukraine 3442-96. The control system of missile technology. Types and programs of testing. Substantive provisions]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Publ., 1997. 13 p.

5. *Kvalifikatsionnye trebovaniya KT-160D. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchei sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy* [Qualification requirements QR-160D. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment]. Moscow, ARMAK Publ., 2004. 53 p.

6. *European Organization for Civil Aviation Equipment (EUROCAE) EUROCAE ED 62 (Revision-A)*, France, 2009. 23 p.

7. *GOST 20.57.406-81 Izdeliya elektronnoi tekhniki, kvantovoi elektroniki i elektrotekhnicheskije. Metody ispytaniy* [State Standard 20.57.406-81. Electronic, quantum electronic and electrotechnical components. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 15 p.

8. ISO 16063-21:2003 *Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer*, Switzerland, 2003. 29 p.

9. D'yakonov, V., Abramenkova, I. *MATLAB obrabotka signalov i izobrazhenii. Spetsial'nyi spravochnik* [MATLAB signal and image processing. Special reference book]. St. Petersburg, Piter Publ., 2002, pp. 176-239.

10. Tukey, J. W. *Discussion emphasizing the connection between analysis of variance and spectrum analysis*. *Technometrics*, 1961. vol. 3, pp. 191–219.

11. Gruzman, I. S., Kirichuk, V. S., Kosykh, V. P., Peretyagin, G. I., Spektor, A. A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v informatsionnykh sistemakh* [Digital image processing in information systems]. Available at: http://sernam.ru/book_kir.php?id=25 (accessed 06.05.2016).

12. *Aleksandrov, V. G., Vyrzhikovskii, B. V. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnoi tekhniki* [Technical exploitation of aviation equipment]. Moscow, Voenizdat Publ., 1967. pp. 53-66.

**ФОРМАЛІЗАЦІЯ ВИМОГ ДО ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ
НА ДІЮ ВИПАДКОВОЇ ВІБРАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВЕРТОЛІТНОГО ТИПУ**

О. В. Чумаченко, І. В. Корсиченко, Ю. І. Малєєва

Проводиться дослідження вібраційних навантажень на обладнання системи управління безпілотних літальних апаратів під час польоту. Виконується розкладання отриманої спектральної щільності вібраційних навантажень шляхом визначення синусоїдальної і випадкової складової. Розглядається обробка отриманих результатів різними методами згладжування. Встановлюються технічні вимоги до апаратури системи управління безпілотного літального апарату вертолітного типу виконання класу «мікро».

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, вібраційне навантаження, медіанна фільтрація, синусоїдальна вібрація, система управління, широкосмугова випадкова вібрація.

**FORMALIZATION OF REQUIREMENTS ON RANDOM VIBRATION TESTS
OF HELICOPTER TYPE UAVS' CONTROL SYSTEMS EQUIPMENT**

O. V. Chumachenko, I. V. Korsichenko, Y. I. Maleeva

The research of vibration loads on UAVS' control system equipment during flight is conducted. Decomposition of received spectral density of vibration loads is performed by determining sine and random component. The processing of the received results by different smoothing methods is obtained. The technical requirements for the UAVS' helicopter type class "micro" control system equipment are established.

Key words: broadband random vibration, control system, median filtering, sinusoidal vibration, unmanned aerial vehicle, vibration load.

Чумаченко Алексей Валентинович – канд. техн. наук, доцент, начальник отд. 13060, НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Харьков, Украина.

Корсиченко Инна Владимировна – инженер 1 кат. отд. 13060, НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Харьков, Украина, e-mail: inna.korsichenko@gmail.com.

Малєєва Юлия Игоревна – инженер отд. 13060, НПП ХАРТРОН-АРКОС ЛТД, Харьков, Украина, e-mail: PustovarYlia@mail.ru.

Chumachenko Alexey Valentinovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Head of Department 13060 LTD RPE HARTRON-ARKOS, Kharkov, Ukraine.

Korsichenko Inna Vladimirovna – Engineer of 1 category of 13060 LTD RPE HARTRON-ARKOS, Kharkov, Ukraine, e-mail: inna.korsichenko@gmail.com.

Maleeva Yulia Igorevna – Engineer of 13060 LTD RPE HARTRON-ARKOS, Kharkov, Ukraine, e-mail: PustovarYlia@mail.ru.