

А. В. Лысенко, В. С. Калашников, А. К. Гришко, Н. В. Горячев, А. С. Подсякин

УСТАНОВКА МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ¹

A. V. Lysenko, V. S. Kalashnikov, A. K. Grishko, N. V. Goryachev, A. S. Podsyakin

INSTALLATION OF MONITORING DYNAMIC PARAMETERS OF ELEMENTS OF DESIGNS OF ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Бортовая радиоэлектронная аппаратура относится к классу сложных систем с разветвленной иерархической структурой, на конструкцию которой оказывают существенное влияние внешние механические воздействия в процессе эксплуатации. Целью работы является разработка конструкции установки мониторинга динамических параметров элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая исследовать ее спектральные колебательные характеристики. **Материалы и методы.** В работе применяется динамический волновой метод исследования поведения упругих конструкций при нестационарном нагружении, основанный на исследовании поверхностных волн Релея, распространяющихся по граничной плоскости упругой среды. Для увеличения частотной линейности и снижения влияния объекта исследования был использован метод обратной электромагнитной связи. **Результаты.** Разработана новая конструкция установки для мониторинга динамических параметров элементов конструкции бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Особенностью предложенной установки является возможность исследования вибрации в местах крепления конструктивного элемента, позволяющая определять взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов. **Выводы.** Разработанная установка дает возможность исследовать динамические параметры элементов конструкций в местах крепления, учитывать взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов. Полученные с помощью установки экспериментальные данные позволяют повысить надежность проектируемой бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

A b s t r a c t. Background. On-Board electronic equipment belongs to the class of complex systems with hierarchical branched structure, the construction of which have a significant influence of external mechanical effects in the process of operation. The aim of this work is to develop the design of the installation of monitoring dynamic parameters of elements of designs of onboard radio-electronic equipment, allowing to study its vibrational spectral characteristics. **Materials and methods.** It is used in the work of the dynamic wave approach to study the be-

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

havior of elastic structures under non-stationary loading, based on the study of surface Rayleigh waves propagating along the plane boundary of an elastic medium. To increase the frequency of the linearity and reduce the influence of the object of research was used the method of inverse electromagnetic coupling. **Results.** Developed a new design of the apparatus for monitoring dynamic parameters of structural elements of the onboard avionics. Feature of offered installation is the possibility of the study of vibration in places of fastening of the structural element, allowing to determine the mutual influence of the element and the ground, and also to evaluate the damping properties of various fasteners. **Conclusions.** The developed device gives the opportunity to explore the dynamic parameters of structural elements in the mounting locations to take into account the impact element and the ground, and also to evaluate the damping properties of various fasteners. Obtained by setting the experimental data can improve the reliability of the designed onboard avionics.

К л ю ч е в ы е с л о в а: динамические характеристики, элементы конструкции, установка, измерения, поверхностные волны, нестационарное нагружение.

К e y w o r d s: dynamic characteristics, structural elements, installation, measurement, surface waves, non-stationary loading.

Введение

Силовые и несущие элементы конструкций РЭС – это стержни, рамы, пластины. При эксплуатации на подвижных носителях в этих конструкциях возникают вибрации. Возникновение резонансных колебаний в конструкциях и их элементах оказывает существенное влияние на функционирование РЭС в целом.

Поэтому оценка надежности электронного средства, предназначенного для работы в условиях динамических внешних воздействий, на этапе проектирования остается актуальной задачей [1]. Важнейшим этапом в решении этой задачи при проектировании РЭС является определение динамических характеристик (деформаций, напряжений, перемещений, ускорений) элементов конструкций, воспринимающих нестационарные внешние нагрузки (вибрации, удары, ускорение). При этом сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования дает хорошие результаты при решении различных практических задач [2–5].

Теоретические основы метода измерений

В основу работы установки положен динамический волновой метод исследования поведения упругих конструкций (стержневых, пластинчатых) при нестационарном нагружении [6–7]. По этому методу исследуются спектральные колебательные характеристики виброизолированного объекта, закрепленного на эластичных виброизолирующих опорах или подвесах. Источники силового воздействия и приема сигналов закрепляются внешне по отношению к исследуемому объекту и входят в точечный контакт с объектом исследования (ОИ) посредством игл. Источники вибростил и виброприемники представляют собой электромеханические преобразователи магнитоэлектрического типа [8–10]. Такое устройство источника силового воздействия на практике позволяет воздействовать на ОИ именно сосредоточенной внешней силой, изменяющейся по какому-либо закону [11–13]. Непосредственно от действия этой силы в пространстве упругой среды конструктивного элемента распространяются две волны: волна расширения и волна сдвига, при распространении которых возникает дополнительное возмущение в виде волн, отраженных от свободной поверхности [14, 15].

Сдвиговая волна порождает незатухающие поверхностные волны, распространяющиеся с релеевской скоростью (волны Релея) по свободной поверхности конструктивного элемента. Когда скорость переменной внешней силы совпадает одновременно с фазовой и групповой скоростями распространяющихся в среде волн, возникают резонансные волны [16, 17]. Для конкретных конструктивных элементов (стержни, пластины) это положение формулируется так: когда частота гармонической внешней силы совпадает с одной из нормальных частот колебательной системы, в последней возникает явление резонанса, при котором амплитуда

волны начинает значительно возрастать. Эти волны фиксирует виброприемник, в подвижной катушке которого возникает электродвижущая сила, пропорциональная принимаемой виброскорости. Проведенный анализ показывает, что предлагаемое устройство (источник вибросил и виброприемник) позволяет получить в упругой системе резонансную волну, зависящую только от исследуемой системы [18].

Возбуждая в исследуемом образце различные резонансные волны путем установления соответствующей резонансной частоты воздействия, можно определить дискретный спектр собственных частот исследуемой конструкции, получить собственную форму колебаний для отдельных собственных частот, а также исследовать пространство собственных форм в случаях, близких к вырождению собственных чисел. Все это составляет спектральные колебательные характеристики виброизолированного упругого пространственного объекта, которые можно использовать в практике конструирования, например, при анализе надежности конструкций РЭС, работающих в условиях сложных внешних динамических воздействий.

Установка для определения динамических характеристик объекта исследования

В существующей практике исследования конструкций и их элементов на стойкость к внешним динамическим воздействиям производится с использованием вибростола, что ограничивает возможности измерения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов РЭС, поскольку объект исследования жестко закреплен на столе вибростенда. Поэтому неизбежны и неустранимы трудности при исследовании собственных форм колебаний для отдельных собственных частот и ударного воздействия в произвольной точке поверхности.

Предложенная установка свободна от указанных недостатков, потому что ОИ может быть виброизолирован от основания, вибровозбудителей и вибродатчиков. Ударные воздействия, вибровоздействия и измерение колебаний могут осуществляться в произвольно выбранных точках поверхности ОИ.

Структурная схема установки (рис. 1) состоит из трех звеньев: измерительного звена 1, эталонного звена 2 и сравнительного звена 3.

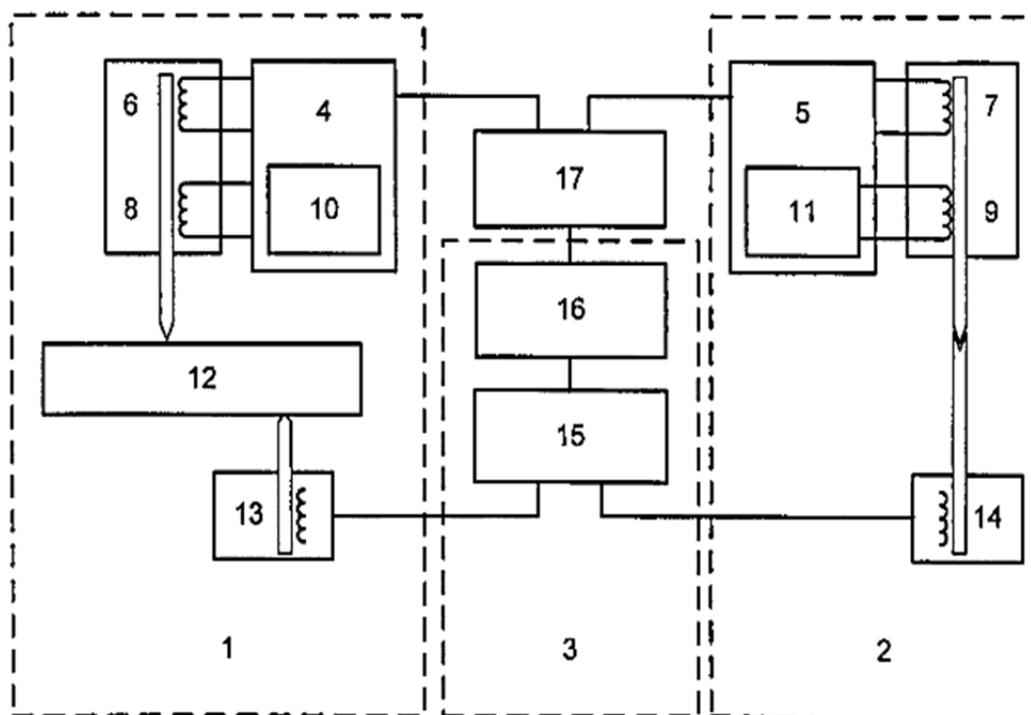


Рис. 1. Структурная схема установки для исследования динамических характеристик элементов РЭС

Измерительное и эталонное звенья состоят из усилителя мощности 4, 5, необходимого для передачи сигнала на возбуждающую обмотку 6, 7; измерительной обмотки 8, 9; цепи элек-

трехмеханической обратной связи (ЭМОС) 10, 11, необходимой для снижения влияния ОИ на передаточную функцию вибровозбудителя; исследуемого образца 12 и вибропреобразователя 13, 14.

Сравнительное звено установки включает в себя аналого-цифровой преобразователь 15, необходимый для преобразования аналогового сигнала от вибропреобразователя с последующей передачей на ЭВМ 16 для сравнительного анализа. Сюда же входит цифроаналоговый преобразователь 17 для преобразования в аналоговый сигнал возбуждения с последующей передачей на усилитель мощности.

На рис. 2 показана конструкция установки. Она состоит из основания 18, элементов крепления объекта исследования 19, объекта исследования 20, вибровозбудителей 21, 22 и датчиков 23, 24. Датчики крепятся на регулируемой крепежной рейке основания 25, а вибровозбудители – на регулируемых штативах 26. При необходимости датчики тоже могут устанавливаться на регулируемых штативах. Объект исследования может быть виброизолирован от основания посредством резиновых амортизаторов, устанавливаемых на регулируемых опорах 27.

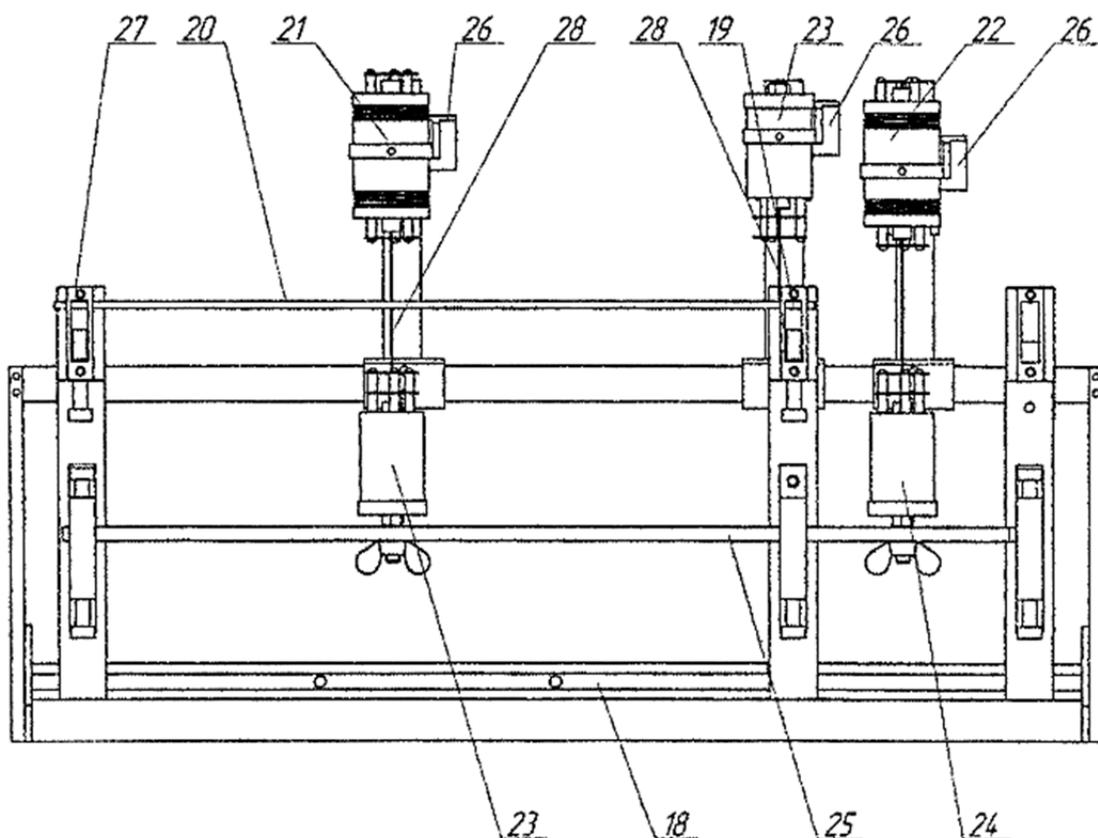


Рис. 2. Конструкция измерительной установки

Во время работы вибровозбудители входят в точечный контакт с ОИ посредством стержневых толкателей 28, осуществляющих необходимое нажатие на поверхность. Амплитуда сил вибровоздействия для систем с малыми потерями в несколько раз меньше инерционных сил, поэтому они в расчете необходимой силы прижатия толкателя не являются определяющими. В результате взаимодействие ОИ с внешней средой осуществляется лишь статическими силами и силами инфранизких частот. Для сил частот исследуемого диапазона система оказывается виброизолированной, что обеспечивается наличием во всех взаимодействующих с системой устройствах упругого промежуточного звена с малой жесткостью, практически полностью отражающего колебания.

В данной установке применены вибровозбудители электродинамического типа, предложенные в работах [6, 8–10]. Исследования показали, что частотные свойства вибровозбудите-

ля такого типа нелинейны, особенно в области частот основного резонанса. Для увеличения частотной линейности и снижения влияния ОИ на передаточную функцию вибровозбудителя был использован метод ЭМОС, на основе которого разработана новая конструкция электродинамического вибровозбудителя, представленная на рис. 3.

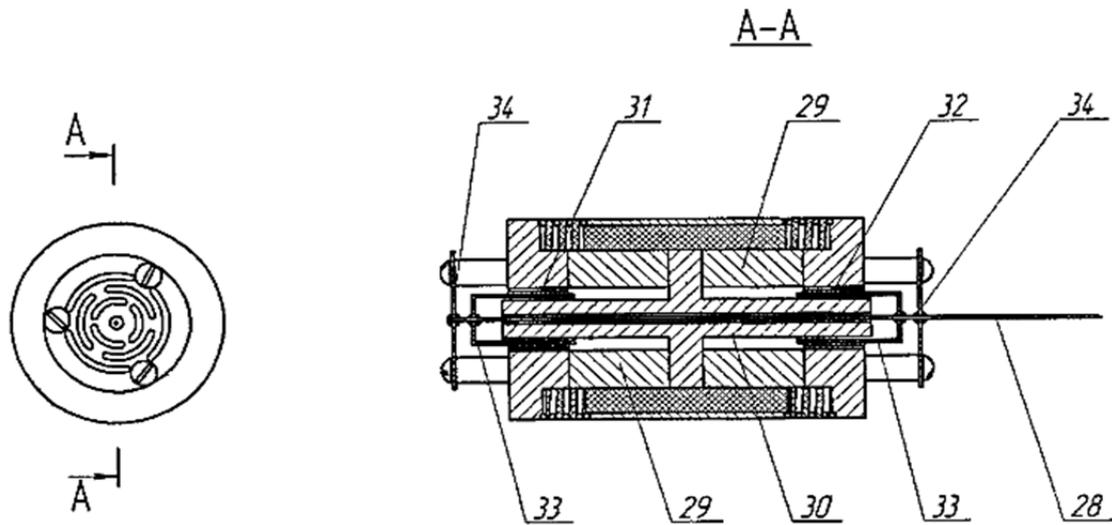


Рис. 3. Конструкция электродинамического вибровозбудителя

Конструкция состоит из магнитной и подвижной систем. Магнитная система состоит из двух постоянных магнитов 29 и магнитопровода 30 с воздушными зазорами. Подвижная система состоит из двух катушек медного провода 31, 32, намотанных на бумажных каркасах 33, подвесов подвижной системы 34, стержневого толкателя 28 для передачи вибровоздействия. Измерительная обмотка 31 находится на одном каркасе с возбуждающей обмоткой 32 и таким образом является частью единой подвижной системы датчика. Использование сигнала ЭМОС позволяет значительно снизить частотное искажение и, как следствие, общую погрешность измерения.

Отличительной особенностью используемых вибропреобразователей в данной установке является их внешнее закрепление по отношению в ОИ, что способствует снижению влияния массы и упругости подвижной системы на точность измерения.

С учетом этих особенностей в установке используется сравнительный метод измерения, основанный на оценке изменения значения параметра вибрации по сравнению с предварительно установленным эталонным значением в установившемся режиме работы эталонного звена вибровозбудитель – виброприемник, работающих непосредственно друг на друга.

Таким образом, при определении резонансных частот объекта частотные нелинейности преобразователей взаимно вычитаются, не оказывая влияния на величину вибрации. Процесс измерений возможно проводить как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Однако использование технологий «виртуальных приборов» на сегодняшний день является оптимальной формой экспериментирования.

Для получения наиболее точной картины частотного спектра возможно использование нескольких вибровозбудителей либо возбуждение колебаний поочередно в нескольких скалярных каналах. Кроме того, для элементов сложного сечения возможна модернизация по приему виброскорости не только в разных каналах, но и в разных направлениях. Для определения форм собственных колебаний необходимо, последовательно устанавливая датчик на интересующих участках поверхности, произвести измерение амплитуды вибрации и фазы колебаний. Избавиться от субъективизма и ошибок лаборантов можно путем установки нескольких вибропреобразователей либо оснащением установки устройством автоматического перемещения по оси ОИ, тем самым значительно сокращая время процесса исследования.

На экспериментальном варианте установки (рис. 4) были проведены исследования по определению первых трех резонансных частот стержневого элемента – стального стержня

длиной $l = 180$ мм. Сечение стержня – квадрат со стороной $b = 3$ мм. Модуль упругости материала стержня $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², плотность материала $\rho = 7800$ кг/м³.

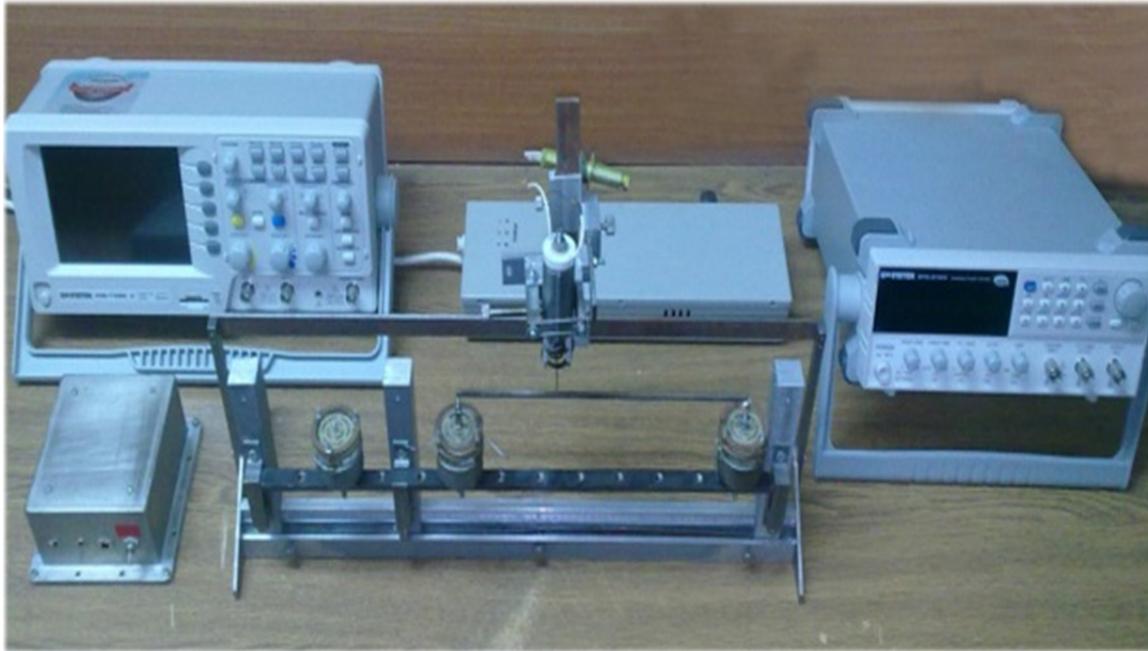


Рис. 4. Экспериментальный вариант лабораторной установки

С помощью формулы для расчета собственной частоты изгибных колебаний шарнирно закрепленного стержня

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{I_y E}{\rho S}},$$

где I_y – момент инерции сечения, для данной задачи равный $6,75 \cdot 10^{-12}$ м⁴; S – площадь поперечного сечения равная $9 \cdot 10^{-6}$ м², определены три первые резонансные частоты, Гц.

Первая резонансная частота:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 217.$$

Вторая резонансная частота:

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = 871.$$

Третья резонансная частота:

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = 1959.$$

В ходе эксперимента были определены три резонансные частоты исследуемого стержня, первая из которых равна 270 Гц, вторая – 740 Гц и третья – 1500 Гц.

Выводы

Полученные данные дают основание считать, что предложенная установка позволяет определять спектральные колебательные характеристики конструктивных элементов РЭС (стержней, пластин, оболочек), на основе которых можно проводить оценку надежности электронного средства на этапе проектирования. Особенностью данной установки является воз-

возможность исследования вибрации в местах крепления конструктивного элемента, что дает возможность исследовать взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов.

Библиографический список

1. Лысенко, А. В. Методика моделирования влияния внешних механических воздействий на динамические параметры РЭА в среде MATHCAD / А. В. Лысенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 68–69.
2. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
3. Лысенко, А. В. Алгоритм формирования сигналов обратной связи для информационно-измерительной системы управления активной виброзащитой РЭУ / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Т. А. Шаркунова // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 50–56.
4. Гришко, А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-4.
5. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
6. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
7. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
8. Голушко, Д. А. О скорости изменения частоты при проведении испытаний для определения динамических характеристик конструкции / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 147–154.
9. Grishko A., Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
10. Grishko, A. K. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, N. V. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). (St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2017). – St. Petersburg, 2017. – P. 210–212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
11. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Mischev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – Moscow, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
12. Головин, П. Д. Применение метода квазиобразцового интервала времени для раздельного измерения параметров параметрических датчиков / П. Д. Головин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4. – С. 149–157.
13. Grishko, A. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Yurkov // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (Ukraine, February 21–25, 2017). – Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), 2017. – P. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.
14. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
15. Пат. 2536325 Российская Федерация. Способ определения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов РЭС и установка для его реализации /

- Голушко Г. Д., Затылкин А. В., Лысенко А. В., Таньков Г. В., Юрков Н. К. ; опубл. 20.12.2014 ; Бюл. № 35.
16. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
17. Study Algorithm Speed Signal Generating Feedback for Information-measuring System Control Active Vibration Protection Red / P. Bushmelev, A. Pivkin, B. Kumatov, A. Lysenko, S. Zatytkin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, iss. 23. – P. 43831–43834.
18. Yurkov, N. K. On the Problem of Experimental Research of Forced Vibrations of Plates / N. K. Yurkov, G. V. Tankov, A. V. Lysenko, V. A. Trusov // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016). (St. Petersburg, Russia, July 22, 2016). – St. Petersburg, 2016. – P. 416–418. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519798.

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Lysenko Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Калашников Владимир Сергеевич

преподаватель,
кафедра эксплуатации радиоэлектронного
оборудования,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kalashnikov_vs@mail.ru

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of operation electronic equipment,
Military Institute of air defence Forces
of the Republic of Kazakhstan named T. Y. Begeldinov
(16 A. Moldagulova pr., Aktobe, Kazakhstan)

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Подсякин Андрей Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Podsyakin Andrey Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 62-1-9

Установка мониторинга динамических параметров элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, В. С. Калашников, А. К. Гришко, Н. В. Горячев, А. С. Подсякин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 84–92. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-12.