

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 620.1.05

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-7

А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ¹

A. V. Lysenko, G. V. Tankov, V. S. Kalashnikov, N. V. Goryachev, I. I. Kochegarov

THE ALGORITHM OF REALIZATION OF ADAPTIVE SYSTEM VIBRATION TESTING OF THE ONBOARD AVIONICS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании и создании новых оригинальных устройств бортовой радиоэлектронной аппаратуры очень важная роль отводится выявлению слабых мест конструкции. Избыточные по нагрузке стандартные вибростенды не всегда позволяют достичь требуемого виброускорения в заданной точке конструктива. Целью работы является разработка алгоритма адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры. *Материалы и методы.* Опираясь на результаты предварительных исследований, определено, что вибрации передаются на устройства через точки крепления, причем не только синфазно, но и в противофазе. При этом в устройстве возникают резонансы колебаний на частотах, совершенно отличающихся от частот, возникающих при испытаниях на

Annotation. *Background.* In the design and creation of new original devices onboard electronic equipment is very important to identify weaknesses design. Excessive load standard vibration stands do not always allow to achieve the required acceleration at a given point of the structure. The aim of the work is to develop an algorithm for adaptive system of vibration tests of onboard electronic equipment. *Materials and methods.* Based on the results of preliminary studies, it is determined that vibrations are transmitted to the device through the attachment points. Moreover, not only in phase, but also in antiphase. At the same time, resonances of oscillations occur in the device at frequencies completely different from the frequencies that arise during tests on standard vibration units. The position of the maxima of the oscillations and the amplitude of the accelerations of adaptive congestion

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.

стандартных виброустановках. Положение максимумов колебаний и амплитуда ускорений перегрузок адаптивно управляются. *Результаты.* Представлена структурная схема установки вибрационных испытаний и алгоритм адаптивного управления процессом испытаний. *Выводы.* Результаты работы позволяют проводить исследование всех требуемых точек платы при максимальном вибрационном воздействии в этой точке и щадящем для других; проводить исследование на всех возможных резонансных частотах в заданном диапазоне; использование специализированной адаптивной системы, ее методик и описанного алгоритма позволяет выявить особенности работы конструкций радиоэлектронных средств с навесными элементами в критических режимах от действия внешних нагрузок и определить динамические характеристики этих конструктивов; использование этих данных дает возможность на этапе проектирования целенаправленно разрабатывать конструктивы радиоэлектронных средств виброустойчивые и вибропрочные при работе изделия в нестационарных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: адаптивная система, алгоритм, вибрационные испытания, бортовая радиоэлектронная аппаратура, резонанс.

controlled. *Results.* The block diagram of the vibration test installation and the algorithm of adaptive control of the test process are presented. *Summary.* The results of the work allow us to study all the required points of the Board at the maximum vibration impact at this point and sparing for others; to conduct research on all possible resonant frequencies in a given range; the use of a specialized adaptive system, its techniques and the described algorithm allows us to identify the features of the structures of radioelectronic means with hinged elements in critical modes from the action of external loads and to determine the dynamic characteristics of these structures; the use of these data makes it possible at the design stage to purposefully develop radio-electronic constructs vibration-resistant and vibration-resistant during operation of the product in non-stationary operating conditions

Keywords: adaptive system, algorithm, vibration tests, avionics, resonance.

Введение

В процессе проектирования и создания новых устройств бортовой радиоэлектронной аппаратуры очень важная роль отводится выявлению слабых мест конструкции, которые могут привести к отказам при эксплуатации [1, 2].

Производители испытательного и тестирующего оборудования предлагают при испытаниях использовать вибрационные нагрузки, значительно превышающие уровни нормальных условий эксплуатации. При этом возрастают требования к испытательному оборудованию по мощности, габаритам и значительно растет его стоимость [3].

Разработчики испытательного оборудования обосновывают приобретение более мощных установок разработанными ими технологиями ускоренных испытаний:

HALT (Highly Accelerated Life Test – ускоренные ресурсные испытания);

HASS (Highly Accelerated Stress Screen – ускоренный выборочный контроль).

При этом изделие размещают на вибростоле и производят вибротестирование в направлении каждой из осей координат.

Разработчики тестируемой аппаратуры вынуждены идти на такие испытания и на закупку дорогостоящего, громоздкого испытательного оборудования для того, чтобы ускоренно выявлять дефекты и повышать надежность разрабатываемых устройств [4–6].

Но хотя такие избыточные по нагрузке испытания и проводятся, но отказы радиоаппаратуры остаются. Как показывает анализ результатов эксплуатационных отказов, большинство из них возникают из-за механических, в основном вибрационных воздействий, даже с меньшей амплитудой нагрузки, чем при испытаниях [7, 8].

Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

Авторами разработана специализированная адаптивная система вибрационных испытаний.

Использование специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний на этапе проектирования РЭС военного назначения позволяет оценить условия работы конструкции и ее элементов (например, печатных плат с электрорадиоэлементами) в условиях нестационарных внешних воздействий (вибрации, удары, тепловые нагрузки). Применение адаптивной системы позволяет

спроектировать оптимальный вариант изделия, отвечающий требованиям виброустойчивости, вибропрозрачности и теплостойкости при работе в критических режимах эксплуатации, что в целом повышает надежность конечных изделий.

В ходе проектирования и изготовления нового электронного изделия адаптивная система вибрационных испытаний и ее методики используются прежде всего для ускоренного определения динамических характеристик конструктивов РЭС (платы, стержни), когда конструкция еще в чертежах. Для плат это прежде всего – поле перемещений, поле напряжений и поле перегрузок при ее изгибных колебаниях в критическом режиме (резонанс).

Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик конструктивных элементов электронных средств описана в работе [9] и позволяет повысить эффективность проведения цикла предварительных испытаний по определению динамических характеристик конструкции.

Сначала методами компьютерного моделирования (с использованием специализированных пакетов программ) определяются резонансные частоты объекта исследования. Затем на каждой резонансной частоте с помощью лазерного датчика измеряется виброускорение в центре пучности собственной формы при нахождении максимальной амплитуды. В центрах пучности измеряются резонансные кривые, из которых в дальнейшем выполняется построение результирующей АЧХ.

Значение характеристик внешних воздействий (амплитуды вибрации, частотный диапазон), действующих на аппаратуру, устанавливаются в соответствии с классификационными группами данных, приведенных в таблицах разделов 5-11 ГОСТ РВ 20.39.304-98, исходя из анализа условий ее функционирования в составе объекта-носителя и значений параметров внешнего воздействия на носителе в условиях его эксплуатации и боевого применения [10].

Для проведения экспериментальных исследований и определения динамических характеристик конструктивов ЭС используется специализированная адаптивная система вибрационных испытаний, которая позволяет задавать на противоположных сторонах пластины колебания, как в фазе, так и со сдвигом фазы на любой угол через соответствующую схему управления. Внешнее воздействие задается в каждую точку крепления от отдельного вибровозбудителя, в качестве которых используются малогабаритные вибровозбудители электродинамического типа TIRAvib S50009. Бесконтактное измерение скорости (ускорения) поверхностных вибраций осуществляется портативным цифровым виброметром PVD 100.

Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний представлена на рис. 1.

Специализированная адаптивная система вибрационных испытаний состоит из системы управления, ЭВМ, 4 DDS генераторов, вибрационной системы TIRAvib S50009, состоящей из четырех вибраторов и усилителя мощности, источников питания, электронного регулятора амплитуды многоканального, портативного цифрового виброметра PVD 100, предназначенный для бесконтактного измерения скорости поверхностных вибраций.

Управляющий микроконтроллер предназначен для формирования сигналов управления для DDS генераторов, а также – для связи с ЭВМ по последовательному интерфейсу.

С ЭВМ в управляющий микроконтроллер поступают команды оператора: начальная частота, конечная частота, скорость изменения сигнала (не менее 2 октав в минуту), фазовый сдвиг. DDS генераторы получают от микроконтроллера в виде сигналов TTL уровней следующие команды: старт (начало формирования сигнала), стоп (конец формирования сигнала), форма сигнала (в случае сигнала с плавным изменением частоты это синус), частота (которая будет регулярно меняться), фаза (задается оператором), амплитуда (задается оператором).

Электронный регулятор амплитуды многоканальный предназначен для задания требуемой амплитуды вибрации в точке крепления толкателя вибровозбудителя к объекту исследования (образцу).

Для стабилизации амплитуды виброускорения применяются датчики вибрации в контрольных точках, сигнал которых используется как обратная связь. В данном случае в качестве контрольных точек выбраны элементы крепления исследуемого образца к толкателю вибровозбудителя. Таким образом, необходимая амплитуда виброускорения задается оператором на ЭВМ и через управляющий микроконтроллер транслируется регулятору амплитуды по интерфейсу I2C. А поддерживается требуемое виброускорение в точках крепления с помощью цепей обратной связи усилителей мощности, выходной сигнал которых подается на вибровозбудители. Кроме того, обратная связь компенсирует неравномерность частотных характеристик вибровозбудителей.

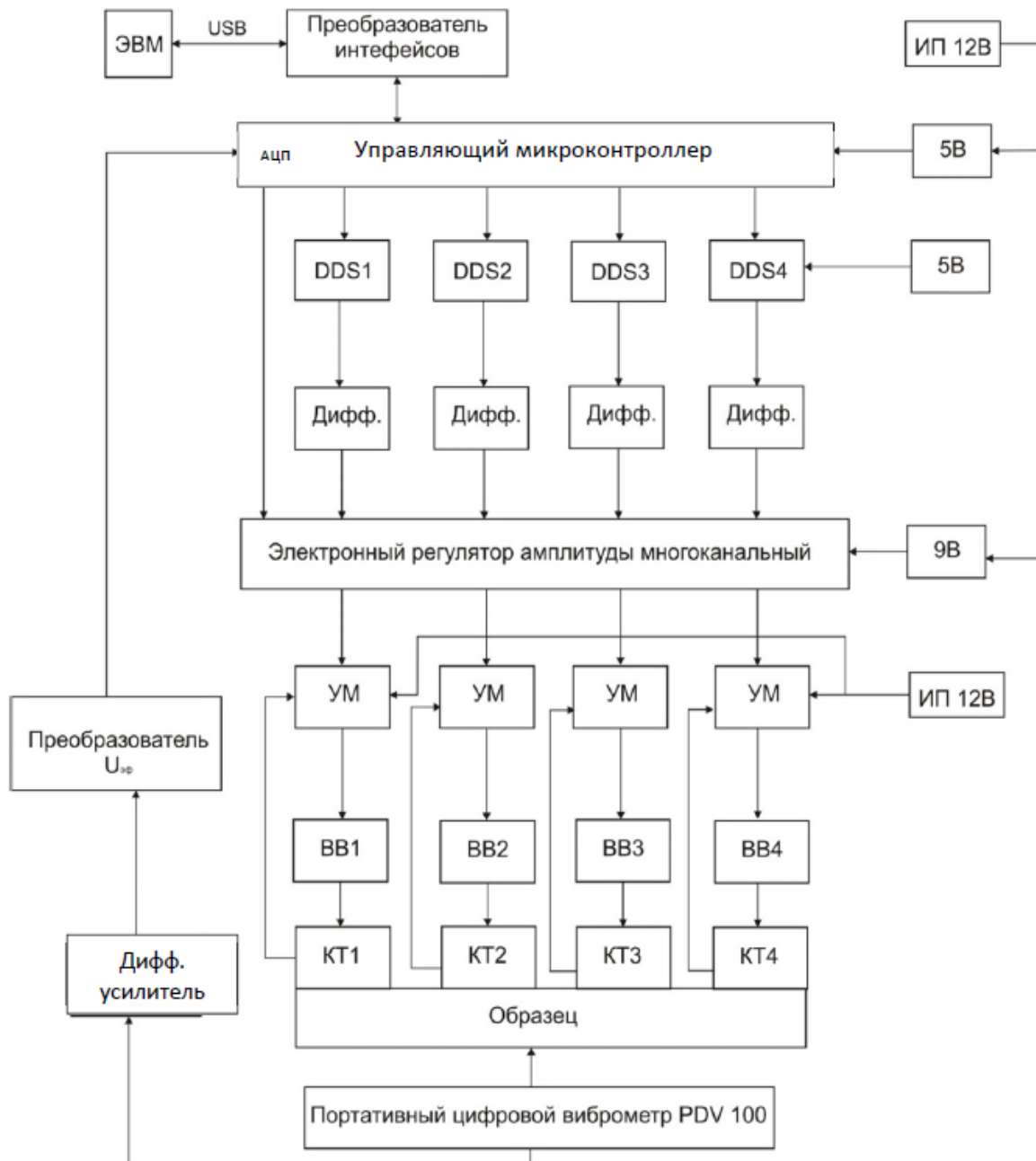


Рис. 1. Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний:
 DDS – управляемые цифровые генераторы, Дифф. – аналоговые дифференциаторы,
 УМ – усилители мощности, ВВ – вибровозбудители, КТ – датчики вибрации в контрольных точках

Для вибрационного возбуждения объекта исследования используются малогабаритные вибровозбудители электродинамического типа TIRA vib S50009. Количество вибровозбудителей соответствует количеству точек крепления. В большинстве случаев это четыре.

Вибрационные колебания, формируемые на толкателях электродинамических преобразователей, пропорциональны производной электрического сигнала, т.е. виброскорости. Так как для проведения испытаний на определение резонансных частот необходимо виброускорение, сигнал с выхода DDS генераторов подается на аналоговый дифференциатор, выход которого соединен с регулятором амплитуды. Портативный цифровой виброметр позволяет достичь в частотном диапазоне от 0,05 Гц до 22 кГц такой точности измерений, для которой раньше требовалось стационарное измерительное устройство в калибровочной лаборатории. Виброметр имеет три диапазона измерений, охватывающие интервал скоростей от 0,05 мкм/с до 0,5 м/с, и оснащен точными цифровыми фильтрами.

Внешний вид и устройство измерительной системы приведены на рис. 2.

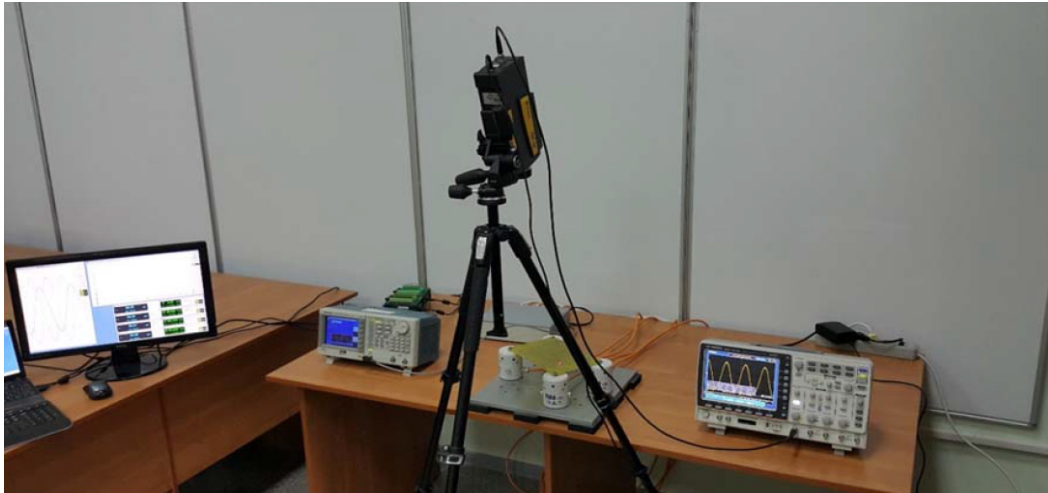


Рис. 2. Внешний вид и устройство измерительной системы

На этой установке снятие АЧХ платы проводится при синфазном и противофазном возбуждении точек крепления платы [11].

Использование установки позволяет экспериментально получить полную информацию о собственных формах и частотах при колебаниях платы в резонансных режимах.

Получение этой информации позволяет уже на этапе проектирования разрабатывать методы и способы защиты конструкций от дестабилизирующего влияния механических факторов. При правильном применении этих исследований возможно не только сократить цикл разработки изделий, но и получить надежное и законченное проектное решение.

Методики специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяют найти путь подавления амплитуды прогиба четных и нечетных гармоник при резонансных колебаниях несущей пластины печатного узла: при уменьшении амплитуды внешнего воздействия второго края пластины и синфазном возбуждении точек крепления уменьшается амплитуда прогиба нечетной гармоники; при противофазном возбуждении – уменьшается прогиб четной гармоники [12]. Инженерное решение этой задачи (например, исследование для наиболее ответственных узлов активных амортизаторов) повышает надежность конструктива.

Использование измерительной установки специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяет экспериментально получить формы колебаний пластины, и они соответствуют нормальным модам колебаний пластины, полученных расчетным путем, только в математических формах [13] узловые линии располагаются по краям пластины. Но в целом эти экспериментальные данные можно использовать при решении задачи размещения радиоэлементов на плате на этапе проектирования изделия.

Помимо этого, на этой установке, меняя фазу колебаний в одной или нескольких задающих точках, можно получить гармоническое движение в форме бегущей волны или подобрать фазу, когда пучность волны (т.е. максимальная амплитуда прогиба) смещается к какому-либо краю пластины, а основная площадь пластины остается нейтральной и пригодной для размещения радиоэлементов, так как коэффициент эксплуатационной жесткости почти для всех ЭРЭ печатного узла будет близок к единице. Такое решение позволит получить высокую степень вибропрочности и виброустойчивости конструктива ЭС и повысить надежность всего изделия в целом.

Методики специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяют исследовать и внедрять конструкции РЭС, у которых собственные частоты колебаний выведены за пределы диапазона частот возмущающих воздействий, что исключает появление изгибных колебаний печатных узлов, являющихся основной причиной усталостного разрушения выводов ЭРЭ и паяных соединений [14].

Такие печатные узлы, условно называемые «безрезонансными», не имея в процессе эксплуатации изгибных колебаний в диапазоне частот возмущающих воздействий, в плане надежности соответствуют стационарной аппаратуре. А это значит, что коэффициент эксплуатационной жесткости

при прочих равных условиях равняется единице для всех ЭРЭ печатных узлов. В результате использование в РЭС безрезонансных печатных узлов позволяет уменьшить интенсивность их отказов в несколько раз. При этом массогабаритные характеристики блоков РЭС без изоляции оказываются не хуже, чем с виброизоляцией [15].

Алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

На рис. 3 представлен алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний.

Описание алгоритма:

1. После принятия решения о начале вибрационных испытаний с помощью адаптивной системы на основе технического задания (ТЗ) и исходных данных:
2. Выбираем (или используем заданный) конструктив разрабатываемого изделия.
3. Для конструктива по п. 2 определяем (задаем) точки контроля N .
- 4,а. Изготавливаем опытный(е) образец(ы).
- 5,а. Производим контроль внешнего вида и параметров образцов.
- 6,а. Закрепляем на вибростенде и определяем резонансные частоты опытного изделия в заданном диапазоне вибрационных частот эксплуатации (ТЗ) f_{Mi} .
- 4,б. Ввод в моделирующую программу исходных данных:
 - размеры и материал платы;
 - способ крепления;
 - установленные элементы (тип, место установки, способ установки).
- 5,б. Определяем (задаем) точность модели ϵ .
- 6,б. Производим расчет резонансных частот на используемой математической модели f_{Pi} .
7. Сравниваем значения резонансных частот расчетной модели f_{Mi} со значениями частот реальной испытываемой модели f_{Pi} .
8. На основании сравнения значений резонансных частот f_{Mi} и f_{Pi} принимается решение об адекватности математической модели с заданной точностью.
9. Либо производим корректировку модели с помощью поправочных коэффициентов.
10. Выбираем точку наблюдения n .
11. Направляем луч лазерного виброметра в выбранную точку.
12. Используя адекватную модель, производим расчет частот стоячих и бегущих волн при синфазном, противофазном и при произвольном задании фаз задающих воздействий в точках крепления платы.
13. Используя результаты моделирования, устанавливаем (для заданной точки) режим вибрационного воздействия:
 - f_i – частота резонанса;
 - φ_{ik} – фаза k -го вибратора, задающего колебания вибратора в точке крепления платы.
14. Задание A_{ik} амплитуд задающих колебаний k -го вибратора в точке крепления.
15. С помощью пятиточечного сканирования лазерным виброметром в окрестностях выбранной точки проверяем.
16. И в случае необходимости корректируем положение максимума колебаний платы, пропорционально изменяем A_{ik} так, чтобы в заданной точке на исследуемой резонансной частоте находился экстремум колебаний платы с заданной амплитудой (ускорением).
17. Проверяем, весь ли заданный в ТЗ частотный диапазон проверен, если нет – п.18.
18. Переход к следующей частоте f_i и повторение пунктов алгоритма пп. 13–17.
19. Проверяем все контрольные точки проконтролированы, если нет – п. 20
20. Переход к следующей заданной точке п. 10 и повторяем пп. 10–18.
21. Производим контроль внешнего вида и параметров образцов.
22. Проверяем, есть ли дефекты, отказы, если есть – п. 23.
23. Производим анализ изделия на дефекты или отказы. Если отказы или дефекты есть – принимаем решение о переходе п. 2, где на основании полученных данных принимается решение:
 - об изменении способа крепления,
 - об изменении размещения элементов,
 - об необходимом изменении конструктива.

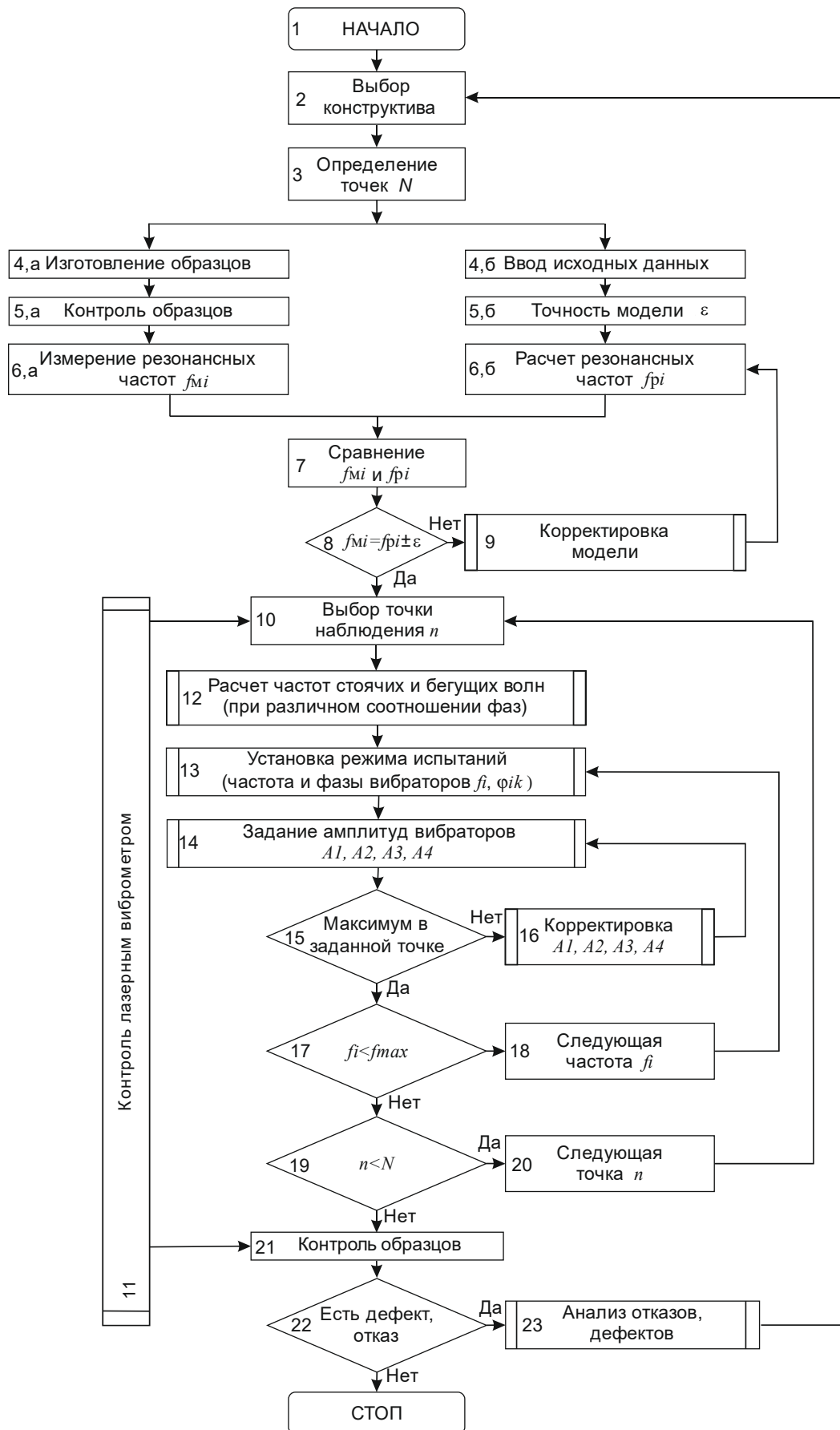


Рис. 3. Алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

Заключение

С помощью представленного алгоритма и адаптивной системы вибрационных испытаний мы получаем:

- 1) исследование всех требуемых точек платы при максимальном вибрационном воздействии в этой точке и шадящем для других;
- 2) исследование на всех возможных резонансных частотах в заданном ТЗ диапазоне;
- 3) использование специализированной адаптивной системы, ее методик и описанного алгоритма позволяет выявить особенности работы конструкций РЭС с навесными элементами в критических режимах от действия внешних нагрузок и определить динамические характеристики этих конструктивов;
- 4) использование этих данных дает возможность на этапе проектирования целенаправленно разрабатывать конструктивы РЭС виброустойчивые и вибропрочные при работе изделия в нестационарных условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / 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. 101–102.
2. Гришко, А. К. Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
3. *Lysenko, A. V.* Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. *Лысенко, А. В.* Методика моделирования внешних механических воздействий на бортовую РЭА / А. В. Лысенко, Е. А. Данилова, Г. В. Таньков // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2013. – Т. 1. – С. 226–228.
5. Влагозащитное покрытие печатных узлов в датчике утечки воды / А. Г. Белов, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 265–272.
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. Автоматизированная многоканальная виброиспытательная установка / А. В. Лысенко, А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин, Н. К. Юрков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 5. – С. 83.
8. *Лысенко, А. В.* Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
9. Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик БРЭА / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 106–108.
10. ГОСТ РВ 20.39.304-98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – Москва : Госстандарт России, 1999. – 55 с.
11. *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.
12. *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.
13. *Морз, Ф.* Колебания и звук : пер. с англ. / Ф. Морз ; под ред. С. Н. Ржевкина. – Москва ; Ленинград : Изд-во техн.-теор. лит., 1949. – 497 с.
14. *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. – P. 416–418. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
15. *Лысенко, А. В.* Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.

References

1. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
2. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 97–107. [In Russian]
3. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. Lysenko A. V., Danilova E. A., Tan'kov G. V. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovation through information and communication technologies]. 2013, vol. 1, pp. 226–228. [In Russian]
5. Belov A. G., Bannov V. Ya., Trusov V. A., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Yurkov N. K. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii* [Modern information technology]. 2014, no. 19, pp. 265–272. [In Russian]
6. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 184–187. [In Russian]
7. Lysenko A. V., Zatytkin A. V., Golushko D. A., Ryndin D. A., Yurkov N. K. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2012, no. 5, p. 83. [In Russian]
8. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Ryndin D. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 2, pp. 155–158. [In Russian]
9. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Trusov V. A., Kochegarov I. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 106–108. [In Russian]
10. *GOST RV 20.39.304-98 Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya stoykosti k vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram* [GOST RV 20.39.304-98 Complex system of General technical requirements. Equipment, instruments, devices and equipment for military purposes. Requirements for resistance to external factors]. Moscow: Goststandart Rossii, 1999, 55 p. [In Russian]
11. Golushko D. A., Zatytkin A. V., Lysenko A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 4 (26), pp. 147–154. [In Russian]
12. Lysenko A. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. 2014, no. 5-1, pp. 68–69. [In Russian]
13. Morz F. *Kolebaniya i zvuk: per. s angl.* [Vibrations and sound : translation from English]. Moscow; Leningrad: Izd-vo tekhn.-teor. literatury, 1949, 497 p. [In Russian]
14. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM*. 2016, pp. 416–418. DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
15. Lysenko A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 4, pp. 41–44. [In Russian]

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Tankov Georgiy Vasilievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 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

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@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)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Алгоритм реализации адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 60–69. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-7.