

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков

### *Введение*

В соответствии с действующими стандартами при разработке и производстве новых изделий проводятся лабораторно-стендовые испытания на вибрационное воздействие в режимах, соответствующих внешнему диапазону эксплуатационных воздействий. В частности, в соответствии с ГОСТ 30630.1.1–99 испытания методом 100–1 проводятся в диапазоне частот  $(0,2 f_{кр} - 1,5 f_{кр})$ , но не выше 2000 Гц. Здесь под  $f_{кр}$  понимают критическую частоту, соответствующую резонансной частоте, или частоту, при которой имеет место нарушение работоспособности изделия, приводящее к его отказам или образованию и развитию дефектов [1].

Проведение испытаний на воздействие вибраций является важным этапом отработки конструкций изделий, и им, как правило, предшествует математическое моделирование поведения конструктивных элементов изделия при вибрационном воздействии. При этом чаще всего используются простейшие модели [2], не позволяющие получить адекватную картину состояния реального изделия. Актуальность создания современных методик экспериментальных исследований РЭС и приборных устройств показана в работах [1, 3].

### *Методика экспериментально-теоретических исследований*

При использовании экспериментально-теоретического метода исследования динамических характеристик изделий и их элементов большую роль играет выбор мест размещения на исследуемом объекте, например плате, измерительных устройств (датчиков), которые регистрируют исследуемый параметр (перемещение, ускорение, деформацию). Наиболее эффективным следует считать размещение датчиков в точках, где регистрируемый параметр принимает максимальное значение. В зависимости от поставленной цели экспериментальных исследований наиболее эффективным следует считать размещение измерительных датчиков в зонах наиболее нагруженных ЭРИ, размещенных на платах, или в наиболее нагруженных зонах платы, где возможно проявление латентных дефектов.

Экспериментальным исследованиям должны предшествовать математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) платы, позволяющий определять точки размещения на плате измерительных устройств с целью получения максимально информативных экспериментальных данных по динамическому состоянию платы. Математические модели, их анализ и результаты численного моделирования, выполненные в работах [3–6], позволяют предложить методику определения оптимальных мест установки измерительных устройств для проведения динамических испытаний с целью получения максимальной информации о вибронагруженности исследуемого объекта.

Применительно к платам с навесными ЭРИ в качестве адекватной динамической модели следует принимать трехмерную модель, учитывающую способ крепления ЭРИ к плате [4].

Проведенные исследования по численному моделированию НДС плат с ЭРИ показали, что как правило, зоны, в которых достигаются максимальные прогибы, напряжения и ускорения, не совпадают между собой и могут иметь место на различных резонансных частотах изделия. В связи с этим в зависимости от исследуемого параметра при предварительном моделировании НДС можно выделить наиболее эффективные места установки измерительных устройств и определить наиболее опасные с точки зрения вибропрочности и виброустойчивости частотные диапазоны для наиболее эффективного проведения виброиспытаний.

Принципиальная структурная схема предлагаемой методики экспериментально-теоретических исследований представлена на рис. 1. Содержание блоков структурной схемы методики (см. рис. 1):

- 1) в соответствии с поставленной задачей исследования выбирается математическая модель платы в соответствии с проведенными исследованиями [4, 5];
- 2) геометрическое изображение модели платы ( $a, b$  – размеры в плане;  $h_k$  – толщина слоев платы);
- 3) размещение ЭРИ на плате с учетом их координат, способа крепления к плате (толщина шва, размеры шва, габаритные размеры ЭРИ);
- 4) ввод координат точек крепления платы (при диаметре более 6 мм необходимо учитывать диаметр винтов крепления);
- 5) ввод физико-механических характеристик материалов слоев гетерогенной структуры платы (модули упругости  $E_k$ , коэффициенты Пуассона  $\mu_k$ , плотности  $\rho_k$ , логарифмический декремент затухания);
- 6) расчет собственных частот  $f_j$  и выбор частот, расположенных в интервале  $f_{\min} \leq f_j \leq f_{\max}$ , где  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  – минимальная и максимальная частоты соответственно, определяющие интервал частот, в котором планируется проведение испытаний;
- 7) моделирование форм собственных колебаний, соответствующих частотам  $f_j$ , и их анализ;
- 8) для выбранных форм собственных колебаний на частотах  $f_j$  выполняется численное моделирование НДС исследуемой модели платы и определяется поле перемещений  $W(x, y)$ , эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эkv}}(x, y)$  и деформаций  $\epsilon_{\text{эkv}}(x, y)$  по поверхности платы ( $x, y$  – координаты в плоскости платы) [4–6];
- 9) анализ НДС и определение координат точек  $x_i, y_i$ , в которых перемещения, напряжения и деформации принимают максимальные значения;
- 10) выполнение адаптации координат  $x_i, y_i$  к поверхности платы и наиболее нагруженным ЭРИ. Вывод на печать оптимальных координат для размещения регистрирующих устройств и соответствующих им значений  $\max W$ ,  $\max \sigma_{\text{эkv}}$ ,  $\max \epsilon_{\text{эkv}}$ .

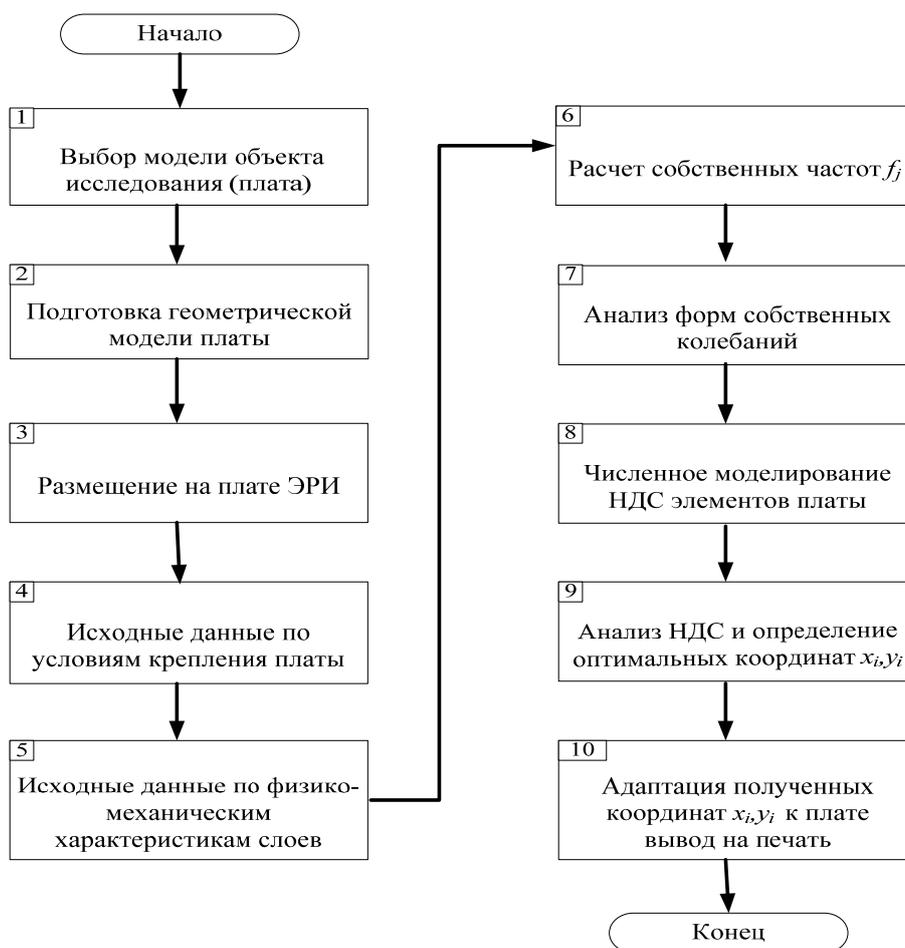


Рис. 1. Структурная схема методики

Предложенная методика определения мест установки измерительных устройств основана на результатах предварительного вычислительного эксперимента, проведенного с использованием математических моделей, адекватно описывающих динамическое состояние исследуемого объекта при вибрационном воздействии, в заданном частотном диапазоне. Знание частот и форм собственных колебаний позволяет наиболее точно определить места расположения измерительных виброустройств на плате при проведении динамических испытаний для экспериментального анализа виброрельефа и вибропрочности плат.

Из анализа НДС платы и ее элементов, соответствующих каждой из форм колебаний, можно прогнозировать наиболее вероятные зоны возникновения и развития латентных дефектов (непроклеи, непропаи, микротрещины и т.п.), что позволяет на этапе изготовления изделия вводить специальные дополнительные операции по контролю качества изделия.

### Практическое применение методики

В качестве примера практического применения предложенной методики рассмотрим плату с ЭРИ, представленную на рис. 2, где в масштабе сохранены габариты ЭРИ и их место расположения на плате [6]. Для анализа НДС платы ЭРИ пронумерованы. Плата крепится к основанию электронного блока прибора пятью винтами.

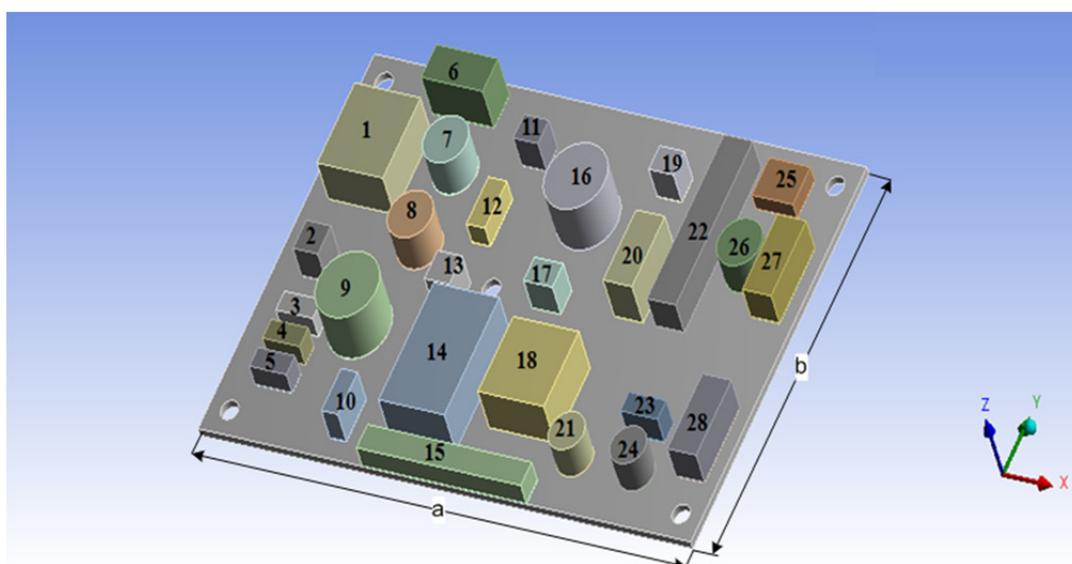


Рис. 2. Плата

При компьютерном моделировании принято: размеры платы  $(a \times b) = (120 \times 80)$  мм<sup>2</sup>;  $h = 1,5$  мм; материал платы стеклотекстолит с модулем упругости  $E = 3 \cdot 10$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,22$  и плотностью  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, толщина швов  $h_{ш} = 0,1$  мм, материал швов – припой ПОС-61; крепление платы к основанию осуществляется винтами диаметром 4 мм. На плату в направлении оси  $z$  (рис. 2) действует ускорение  $10g$ , а среднее значение логарифмического декремента затухания для платы принято равным  $0,133$ .

В табл. 1 представлены значения первых восьми собственных частот  $f_j$ , расположенных в частотном диапазоне  $20 \leq f_j \leq 2000$  (Гц) при температуре окружающей среды в диапазоне  $T = (-60; +125)^\circ\text{C}$ .

Таблица 1

Собственные частоты платы  $f_j$

$T, ^\circ\text{C}$	Частоты $f_j$ , Гц							
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
-60	547,1	690,0	786,8	869,8	1137,9	1554,3	1795,1	1902,1
22	531,7	672,3	768,8	844,8	1107,7	1529,7	1777,3	1871,5
125	511,2	648,4	743,3	812,9	1068,3	1497,8	1753,2	1833,1

Анализ полученных результатов показывает, что изменение температуры внешнего воздействия с  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к снижению значений собственных частот на  $3,8\dots 7,1\%$  в зависимости от номера собственной частоты.

На рис. 3 показаны первые четыре формы собственных колебаний платы при температуре  $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на которых имеют место резонансы. Флажками показаны точки, в которых прогибы платы достигают максимальных значений ( $\max W$ ). При других температурах формы колебаний существенно не меняются. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) максимальных прогибов в исследуемом частотном диапазоне представлены на рис. 4.

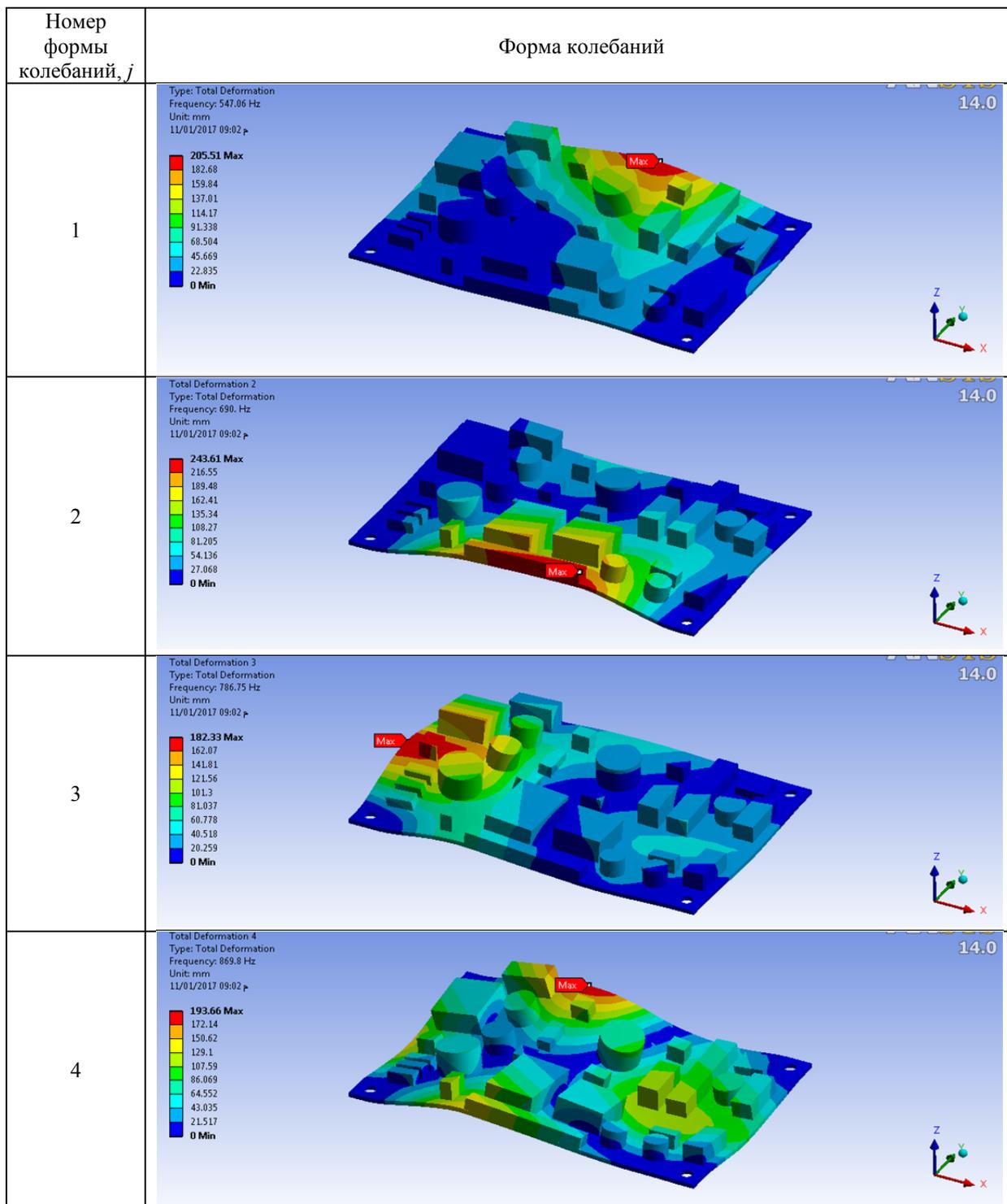


Рис. 3. Формы колебаний платы при  $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ полученных результатов показывает, что максимальный прогиб платы равен  $\max W = 3,4 \cdot 10^{-2}$  мм и достигается при  $T = 125$  °С на второй форме колебаний (см. рис. 3) при частоте  $f_2 = 648,4$  Гц.

Если при проведении динамических испытаний платы используются датчики перемещений, то их необходимо устанавливать на плате в точках, отмеченных на рис. 3 флажками, где прогиб достигает максимальных значений. Анализ АЧХ (рис. 4) показывает, что наиболее информативным является частотный диапазон  $0,7f_2 \leq f_j \leq 1,4f_2$ , т.е. диапазон частот  $f = (450 \dots 910)$  Гц.

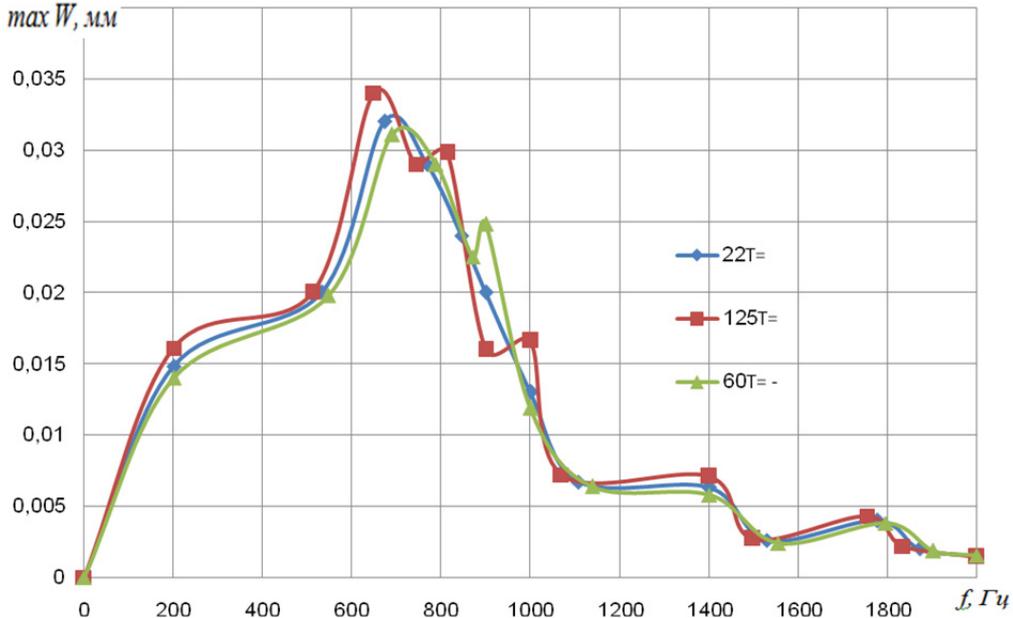


Рис. 4. АЧХ платы

НДС платы в исследуемых частотном и температурном диапазоне моделировалось с использованием критерия прочности Мизеса. Анализ НДС показал, что наиболее нагруженной зоной платы является место расположения 13ЭРИ возле его угловой точки, расположенной вблизи пятой точки крепления платы (см. рис. 2) При этом максимальные напряжения достигаются на четвертой форме колебаний при  $T = 125$  °С и частоте  $f_4 = 812,9$  Гц. Изменение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  в зоне наиболее нагруженного ЭРИ в частотном диапазоне при различных тепловых воздействиях представлено на рис. 5.

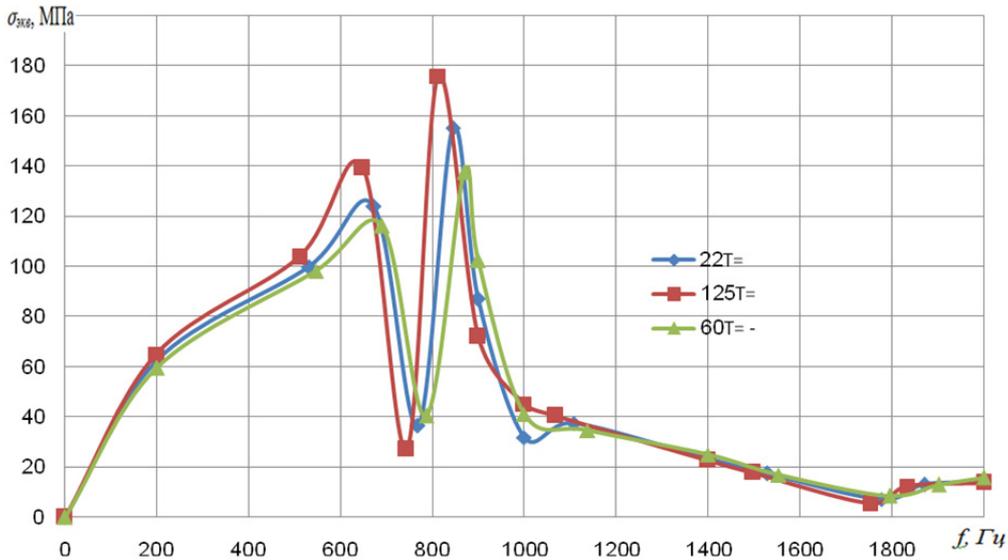


Рис. 5. Изменения  $\sigma_{\text{экв}}$  в зоне 13ЭРИ

Очевидно, что если проводятся испытания на вибропрочность исследуемой платы, то датчики, измеряющие относительную деформацию (например, тензорезисторные датчики), следует размещать в наиболее нагруженной зоне платы возле 13ЭРИ. Наиболее информативным, с точки зрения НДС платы, является интервал  $0,7f_2 \leq f_j \leq 1,4f_2$ , т.е. частотный диапазон  $f = (570 \dots 1140)$  Гц.

Следует отметить, что подробный анализ смоделированного НДС платы по всей ее поверхности показывает, что в остальных ее зонах в исследуемых тепловом и частотном диапазонах эквивалентные напряжения не превышают  $\sigma_{\text{экр}} 42,5$  МПа. Следовательно, указанный частотный диапазон является наиболее информативным с точки зрения вибропрочности платы. Виброиспытания рекомендуется проводить при  $T = 125$  °С.

### Выводы

Предложенная методика рекомендуется к практическому использованию на ранних стадиях проектирования конструктивных элементов приборных устройств различного назначения для обеспечения вибропрочности и виброустойчивости приборов в реальных условиях эксплуатации. Ее применение позволяет существенно сократить сроки проектирования новых и модернизации существующих приборных устройств за счет сокращения объема необходимых экспериментальных исследований и оптимизации принимаемых конструкторско-технологических решений. Все это в результате приводит к сокращению экономических затрат на проектирование и модернизацию изделий. Проведенный анализ НДС элементов конструкций позволяет также научно обоснованно анализировать возможные причины отказов изделий в эксплуатации или при испытаниях [7].

Предварительное моделирование НДС позволяет также научно обоснованно назначать оптимальные режимы технологических тренировок изделия, включающих тепловые и вибрационные воздействия, для выявления возможных скрытых производственных дефектов [8].

### Библиографический список

1. Галушко, Д. А. Методика проведения испытаний электронных средств на стойкость к внешним вибрационным воздействиям с учетом их конструктивных особенностей / Д. А. Галушко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 373–376.
2. Хади, О. Ш. Анализ моделей для исследования динамических характеристика плат РЭС / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Модели, системы и сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2015. – № 1(13). – С. 184–188.
3. Затылкин, А. В. Методика исследования радиоэлектронных средств опытно-теоретическим методом на ранних этапах проектирования / А. В. Затылкин, Д. А. Галушко, А. В. Лысенко // Вестник СГАУ им. акад. С. П. Королева (НИУ). – 2012. – № 7 (38). – С. 91–96.
4. Хади, О. Ш. Анализ вибропрочности плат приборных устройств при динамических воздействиях / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 173–176.
5. Хади, О. Ш. Исследование влияния конструктивных особенностей плат на их динамические характеристики / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Г. В. Гуральник // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 245–250.
6. Hadi, A. Sh. Modeling the state of circuit boards for the instrument devices of operational effects / A. Sh. Yadi, A. N. Litvinov // Information Innovative Technologies : Intern. Scient. – Practical Conf. – Prague, 2017.
7. Хади, О. Ш. Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
8. Литвинов, А. Н. Выбор режимов технологической вибрации приборов в процессе их производства / А. Н. Литвинов, А. А. Иофин, В. Я. Баннов ; под. ред. А. А. Иофина // Радиовысотометрия – 2010 : сб. тр. III Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : Форт Диалог Исеть, 2010. – С. 98–102.

**Артамонов Дмитрий Владимирович**  
 доктор технических наук, профессор,  
 первый проректор,  
 Пензенский государственный университет  
 (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
 E-mail: politech@pnzgu.ru

**Artamonov Dmitriy Vladimirovich**  
 doctor of technical sciences, professor,  
 First Vice-Rector,  
 Penza State University  
 (440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Литвинов Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра теоретической и прикладной механики,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: aleksletvinov@mail.24

**Юрков Николай Кондратьевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Litvinov Aleksandr Nikolaevich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of theoretical and applied mechanics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Yurkov Nikolay Kondrat'evich**

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

**Аннотация.** *Актуальность и цель.* Исследование динамических характеристик плат приборных устройств в процессе их проектирования проводится с целью выявления их виброрельефа, определения резонансных частот и форм колебаний, а также анализа их вибропрочности при внешних эксплуатационных воздействиях. В работе предложена методика определения мест установки измерительных устройств на платах, включающая этап математического моделирования их динамического состояния, обеспечивающая максимальную информативность при проведении виброиспытаний. *Материалы и методы.* В статье рассмотрены платы с навесными электрорадиоизделиями приборных устройств, подверженные действию гармонической вибрационной нагрузки. Разработана методика проведения экспериментально-теоретических исследований, основанная на предварительном математическом моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) платы при действии эксплуатационных динамических нагрузок. Моделирование НДС платы выполняется с использованием метода конечных элементов (МКЭ)), реализованного в пакете ANSYS с учетом того, что плата представляет собой слоистую гетерогенную структуру. *Результаты.* Разработана методика, применение которой позволяет устанавливать наиболее эффективные места установки измерительных устройств на платах, с целью получения максимальной информации о НДС платы и ее элементов при проведении вибрационных испытаний. *Выводы.* Проведенные численные исследования показали, что применение предложенной методики на ранних стадиях проектирования приборных устройств позволяет существенно повысить их вибропрочность, сократить сроки и объемы выполняемых экспериментальных работ, а также существенно сократить экономические затраты на проектирование новых и модернизацию существующих приборных устройств.

**Ключевые слова:** плата, приборное устройство, математическое моделирование, напряженное состояние, методика, виброиспытание, вибропрочность.

УДК 531.3:618.2.08

Артамонов, Д. В.

Методика проведения экспериментально-теоретических динамических исследований в процессе проектирования приборных устройств / Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 28–34. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-4.

**Abstract.** *Background.* Investigation of dynamic characteristics of circuit boards in design of instrument devices with the purpose of revealing their vibration relief, determining resonance frequencies and oscillation forms, and also analyzing their vibration resistance under external operational influences, is carried out. In this paper, a technique for determining the locations for installation of measuring devices on circuit boards, including the stage of mathematical modeling of their dynamic state, providing maximum information in the conduct of vibration tests, is proposed. *Materials and methods.* In the article, the circuit boards with hinged electronic components of instrument devices subject to harmonic vibration loading are considered. A technique for performing experimental and theoretical studies, based on preliminary mathematical modeling of the stress-strain state (SSS) of the circuit board under operational dynamic loads is developed. Modeling of the circuit board SSS is performed using the finite element method (FEM) implemented in ANSYS package, taking into account that the circuit board has a layered heterogeneous structure. *Results.* A technique that allows the detection of the most effective locations for measuring devices on circuit boards has been developed to obtain maximum information about SSS of the circuit board and its elements during the vibration testing. *Conclusions.* The conducted numerical studies have shown that the application of the proposed technique at the early stages of designing instrument devices suggests a significant increase in their vibration resistance, helps to reduce time and amount of the performed experimental work, and significantly reduce the economic costs of designing new and upgrading the existing instrument devices.

**Key words:** circuit board, instrument device, mathematical modeling, stress state, technique, vibration test, vibration resistance.