

В. С. Калашников, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, Н. С. Реута

ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

V. S. Kalashnikov, A. V. Lysenko, G. V. Tan'kov, V. A. Trusov, N. S. Reuta

FORMATION OF THE CONTROL SIGNAL OF THE ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF VIBRATION TESTS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании печатных узлов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) необходимо обеспечить вибронадежность узла. Общие рекомендации заключаются в том, что нужно располагать наиболее чувствительные к внешним вибрационным воздействиям радиоэлементы ближе к краям несущей пластины, где амплитуды изгибных колебаний меньше. Но такой путь оправдан только в том случае, когда весь контур несущей платы будет закреплен и в граничных точках платы будет только амплитуда внешнего воздействия. Крепления реальных печатных узлов и плат БРЭА сильно отличаются от закреплений по контуру. Поэтому амплитуда изгибов контура может быть значительной при формировании той или иной моды колебаний. Проведенный анализ показал, что задача размещения радиоэлементов на плате БРЭА не имеет однозначного решения с точки зрения обеспечения виброустойчивости узла на печатной плате. На кафедре КиПРА ПГУ создан и совершенствуется лабораторный стенд, на котором можно тестировать несущие пластины разрабатываемых узлов на печатных платах. Особенность в том, что воздействия на пластину задаются с четырех мини-вибраторов, расположенных по углам пластины. Это позволяет задавать колебания в фазе во все четыре точки крепления и получать резонансные формы, адекватные нечетным гармоникам; а также задавать колебания в противофазе по противоположным сторонам и получать формы, адекватные четным гармоникам. *Материалы и методы.* В работе использовались методы теории волновых процессов, планирования и математического моделирования. *Результаты.* Разработаны условия адаптивного управления задания возбуждающих колебаний, позволяющие сформировать максимум амплитуды стоячей или бегущей волны в требуемом месте платы. В основе управления лежит математическая модель типа «черный ящик» с пошаговым управлением изменением начальных условий возбуждения колебаний. *Выводы.* Выявлено, что, меняя фазу внешнего воздействия в точках крепления, можно в той или иной степени управлять резонансными

Abstract. *Background.* When designing printed circuit boards of onboard radio-electronic equipment (OREE), it is necessary to ensure the vibration reliability of the unit. General recommendations are that the radio elements that are most sensitive to external vibration should be positioned closer to the edges of the carrier plate, where the Flexural vibration amplitudes are smaller. But this way is justified only if the entire contour of the carrier Board is fixed and only the amplitude of the external influence is present at the boundary points of the Board. Fixing of real printed circuit boards and OREE boards is very different from fixing along the contour. Therefore, the amplitude of the contour bends can be significant when a particular mode of oscillation is formed. The analysis showed that the problem of placing radio elements on the OREE Board does not have an unambiguous solution in terms of ensuring the vibration stability of the node on the printed circuit Board. A laboratory stand has been created and is being improved at the Department of design and production of radio equipment of PSU, where you can test non-existing plates of developed components on printed circuit boards. The peculiarity is that the effects on the plate are set from four mini-vibrators located at the corners of the plate. This allows you to set vibrations in the phase at all four points of attachment and get resonant forms that are adequate to odd harmonics; as well as set vibrations in the opposite phase on opposite sides and get forms that are adequate to even harmonics. *Materials and methods.* Methods of wave process theory, planning, and mathematical modeling were used in this work. *Results.* Conditions for adaptive control of the exciting oscillation task are developed, which allow forming the maximum amplitude of a standing or traveling wave in the required place of the Board. The control is based on a mathematical model of the "black box" type with a step-by-step control of changes in the initial conditions of oscillation excitation. *Conclusions.* It is revealed that by changing the phase of external influence at the attachment points, it is possible to control the resonant vibrations of the plate to some extent. Studies have shown that the natural resonant frequencies change or shift, but the forms (modes) of standing and traveling waves are always the same, only

колебаниями пластины. Как показали проведенные исследования, изменяются или сдвигаются собственные резонансные частоты, но формы (моды) стоячих и бегущих волн всегда одинаковые, лишь происходит смещение экстремумов амплитуд в плоскости платы.

Ключевые слова: вибрация, радиоэлектронные средства, печатные платы, резонанс, пластины.

the amplitude extremes shift in the plane of the Board.

Keywords: vibration, radio-electronic devices, printed circuit boards, resonance, plates.

Введение

При проектировании печатных узлов нестационарных (бортовых) РЭС для работы на подвижных носителях одна из главных задач заключается в обеспечении вибронадежности узла. Общие рекомендации для конструктора здесь заключаются в том, что нужно располагать наиболее чувствительные к нагрузкам радиоэлементы (транзисторы, микросхемы) ближе к краям несущей пластины, где амплитуды изгибных колебаний меньше [1–4]. Но такой путь оправдан для случая, когда весь контур несущей пластины будет закреплен и в граничных точках платы будет только амплитуда внешнего воздействия (инерционная составляющая колебаний).

Крепления реальных плат электронных средств сложны и разнообразны [5–7] и резко отличаются от классических (закрепления по контуру), например, крепление платы в четырех точках по углам (винтами) – в этом случае закреплены небольшие зоны по углам, а весь остальной контур свободен и почувствует в изгибных колебаниях пластины в случае вхождения ее в резонанс. Поэтому амплитуда изгибов контура может быть значительной при формировании той или иной моды колебаний (рис. 1).

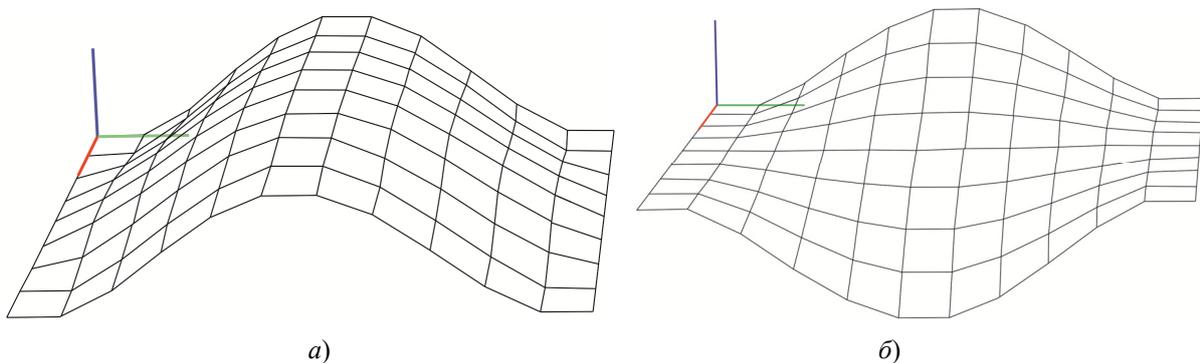


Рис. 1. Форма первых двух мод колебания прямоугольной пластины при точечном креплении по углам

На рис. 1 показаны первая (рис. 1,а) и вторая (рис. 1,б) собственные формы колебаний прямоугольной пластины с четырехточечным креплением, полученные с помощью пакета математического моделирования пластинчатых конструкций кафедры КиПРА ПГУ. По данной стороне пластины амплитуда прогиба контура в первой и второй форме значительно и немного превышает амплитуду внешнего воздействия. Если контур пластины закреплен, то форма колебаний этой пластины несколько иная (рис. 2).

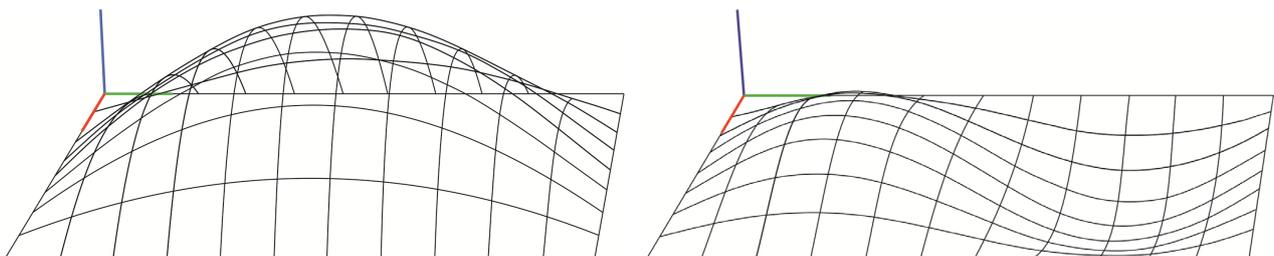


Рис. 2. Форма первых двух мод колебаний прямоугольной пластины при креплении по контуру

Здесь по всем сторонам контура амплитуда прогиба равна нулю и амплитуда колебаний контура будет равна амплитуде внешнего воздействия. Поэтому здесь и приемлема идея размещения виброчувствительных радиоэлементов ближе к краям пластины.

Даже этот простой анализ показывает, что задача размещения радиоэлементов на плате нестационарного РЭС не имеет однозначного решения с точки зрения обеспечения виброустойчивости узла на печатной плате. Кроме того, в реальных конструкциях нестационарные воздействия передаются от корпуса носителя на плату через точки крепления, которые могут быть расположены по контуру в различных вариантах. Колебания от каждой точки крепления распространяются в тело пластины в виде волн, идущих в различных направлениях, и форма динамического изгиба пластины образуется от сложения двух или большего числа волн, распространяющихся по разным направлениям.

Картина изгиба пластины получается достаточно сложной. Но при решении задачи оптимального размещения радиоэлементов на плате информация об изгибных движениях пластины у конструкторов должна быть полной. Получить эту картину динамического изгиба пластины математически можно двумя способами.

Математическая модель

Морз показал [8], что волны любого возможного вида могут быть составлены из подходящей суммы простых волн, что математически означает, любое колебание пластины можно выразить интегралом

$$\omega = \int_0^{2\pi} F_\alpha(x \cos \alpha + y \sin \alpha - ct) dt, \quad (1)$$

где ω – амплитуда прогиба в точке; α – угол наклона направления движения волны к оси x ; c – скорость распространения продольных волн в данной среде; F_α – функция, соответствующая данному колебанию пластины. Гармонические решения управления продольной волны могут быть составлены из суммы волн типа

$$A_\alpha \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (x \cos \alpha + y \sin \alpha - ct) \right],$$

где α принимает различные значения. Эта сумма волн может быть выбрана так, что будет выражать ряд стоячих волн, соответствующих прямоугольным границам пластины. Но решение получается несколько громоздким и сложным.

Другой путь, более прямой, состоит в расщеплении управления продольной волны и подбирается решение, подходящее для прямоугольных границ, в котором используются две системы стоячих волн, имеющих узловые линии (вдоль которых смещение равно нулю), параллельные оси x и оси y .

Фактически этот путь приводит к разложению колебаний по собственным формам свободных колебаний, где фундаментальные функции, выражающие возможные формы пластины, совершающей простые гармонические колебания, будут иметь вид [8]

$$\omega = W \psi_{mn}(x, y) \cos(2\pi f_{mn} t - \varphi),$$

причем

$$\psi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{\pi n x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi m y}{b}\right),$$

где a и b – стороны прямоугольной пластины.

Форма пластины для первых четырех мод приведена на рис. 3 [8]:

В случае вырождения, когда прямоугольная пластина становится квадратом и допустимые частоты становятся попарно равными $f_{mn} = f_{nm}$, пластина может совершать простое гармоническое колебание с частотой f_{mn} , принимая любую из перечисленных множеств различных форм, соответствующих различным значениям f в комбинации [8]:

$$\psi_{mn} \cos \gamma + \psi_{nm} \sin \gamma,$$

где γ – угол наклона узловой линии к оси x .

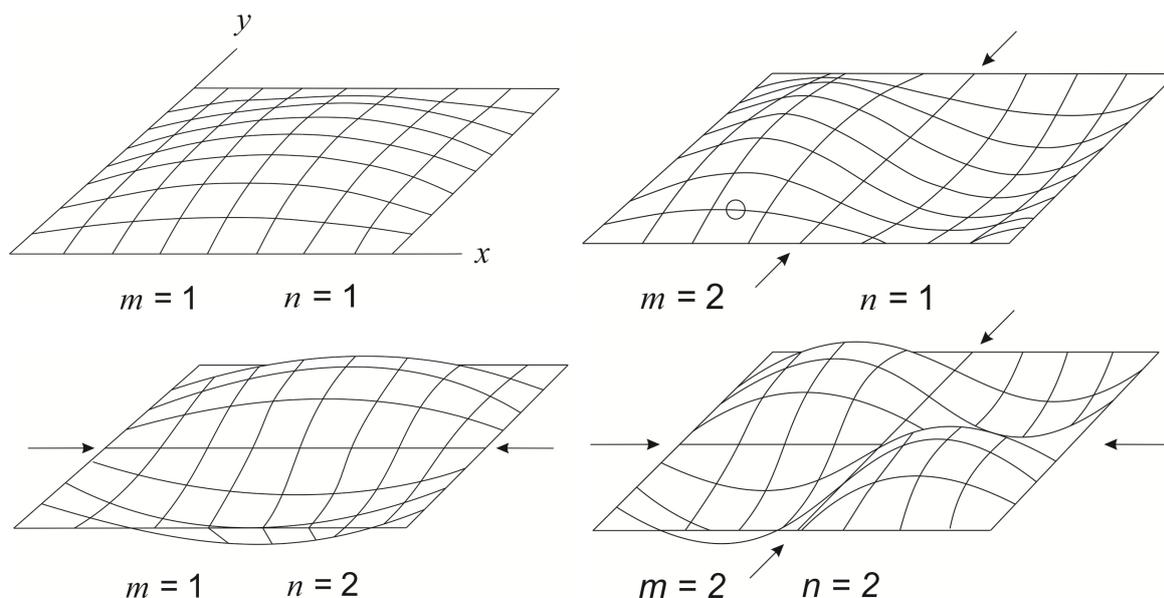


Рис. 3. Форма правых четырех нормальных мод колебания прямоугольной пластины. Стрелками показаны узловые линии

На рис. 4 показаны формы нормальных мод колебаний квадратной пластины, соответствующих f_{12} слева и f_{13} справа для различных значений γ .

Колебания могут принимать форму стоячих волн, которые будут определяться выражением

$$\omega = [\psi_{nm} \cos \gamma + \psi_{nm} \sin \gamma] \cos(2\pi f_{mn} t),$$

а узловые линии имеют различный вид для каждого значения γ . Возможны также бегущие волны, которые определяются выражением

$$\omega = [\psi_{nm} \cos(2\pi f_{mn} t) + \psi_{nm} \sin(2\pi f_{mn} t)].$$

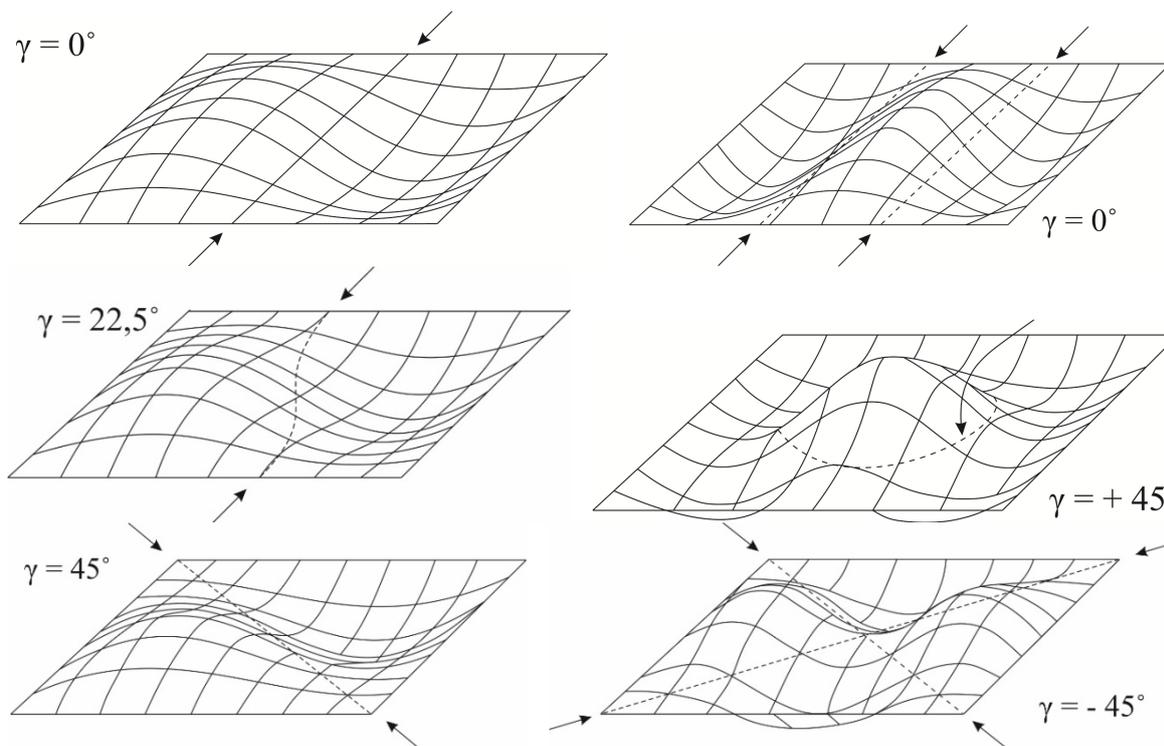


Рис. 4. Различные моды гармонического колебания квадратной пластины для случая выражения $f_{12} = f_{21}$ (слева) и $f_{13} = f_{31}$ (справа). Стрелками показаны узловые линии

В этом случае узловые линии в течение периода последовательно проходят через целый ряд возможных форм.

Только в вырожденном случае возможно, что в пластине конечной величины возникает простое гармоническое движение в форме бегущих волн [8–10].

Все идеи и математика проведенного анализа могут быть использованы при создании имитационных моделей, с помощью которых можно получить информацию о прогибах пластины при ее изгибных колебаниях, особенно в режиме резонанса.

Эксперимент

Исследования показали, что с использованием современных средств измерения вибраций (лазерные датчики, виброметры) можно разрабатывать измерительные установки и получать полную информацию о динамическом изгибе пластины на всех резонансных частотах рабочего диапазона (по ТУ). На кафедре КиПРА ПГУ создан и совершенствуется лабораторный стенд, на котором можно тестировать несущие пластины разрабатываемых узлов на печатных платах. Особенность в том, что воздействия на пластину задаются с четырех мини-вибраторов, расположенных по углам пластины. Это позволяет задавать колебания в фазе во все четыре точки крепления и получать резонансные формы, адекватные нечетным гармоникам; а также задавать колебания в противофазе по противоположным сторонам и получать формы, адекватные четным гармоникам.

Для примера на рис. 5,а показана первая форма по длинной стороне пластины, а на рис. 5,б – по короткой стороне.

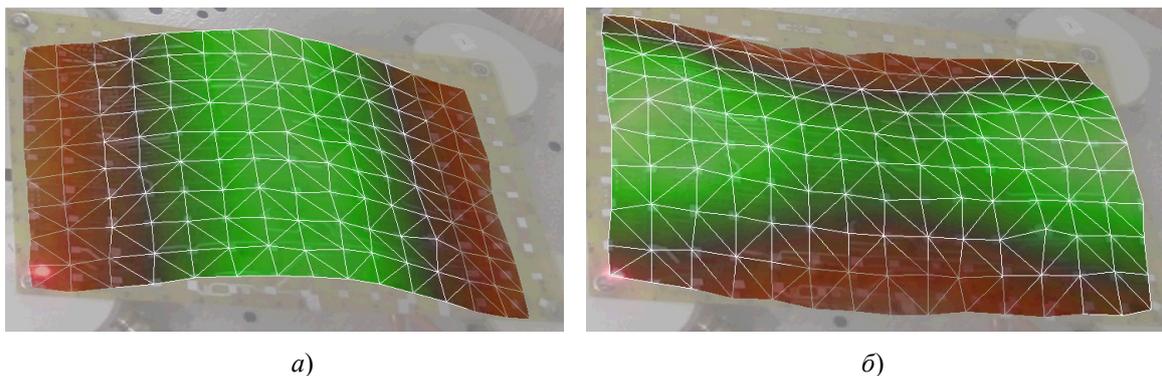


Рис. 5. Первая форма колебаний прямоугольной пластины по длинной (а) и короткой (б) стороне

На рис. 6 показана вторая, третья и четвертая формы колебаний по длинной стороне пластины. Здесь гребни волн почти строго параллельны оси y , а распространение волны идет по оси x .

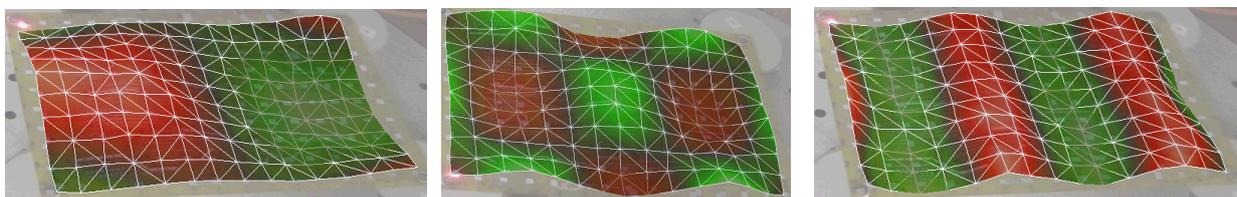


Рис. 6. Вторая, третья и четвертая формы колебаний по длинной стороне пластины

Полученные экспериментально формы колебаний пластины в целом соответствуют нормальным модам колебаний прямоугольной пластины, полученных расчетным путем (см. рис. 3), только в математических формах узловые линии располагаются еще и по краям пластины. Но в целом эти экспериментальные данные можно использовать при решении задачи размещения радиоэлементов на плате.

На этой установке, меняя фазу колебаний (30, 40, 60, 90 град) в одной или нескольких точках, можно получить гармоническое движение в форме бегущей волны для прямоугольной пластины (рис. 7).

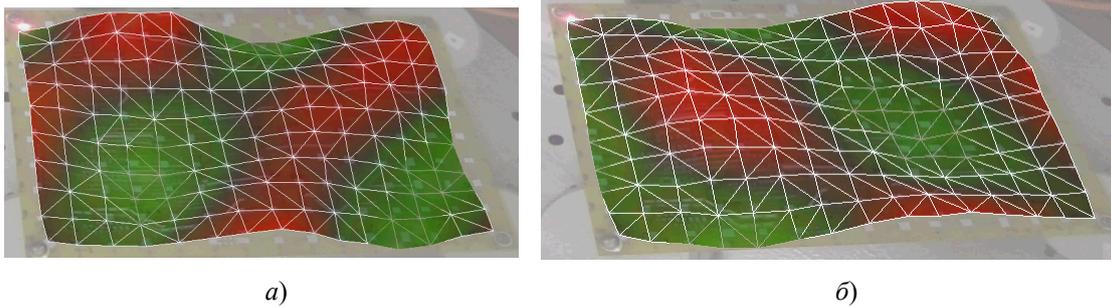


Рис. 7. Форма пластины при распространении бегущей волны на резонансной частоте 535 Гц (а) и на частоте 550 Гц (б)

Применение этого приема дает возможность «угнать» пучность волны на край платы, обеспечив для остальной части пластины минимальную амплитуду прогиба на резонансе.

Таким образом, меняя фазу внешнего воздействия в точках крепления, можно в той или иной степени управлять резонансными колебаниями пластины (рис. 8).

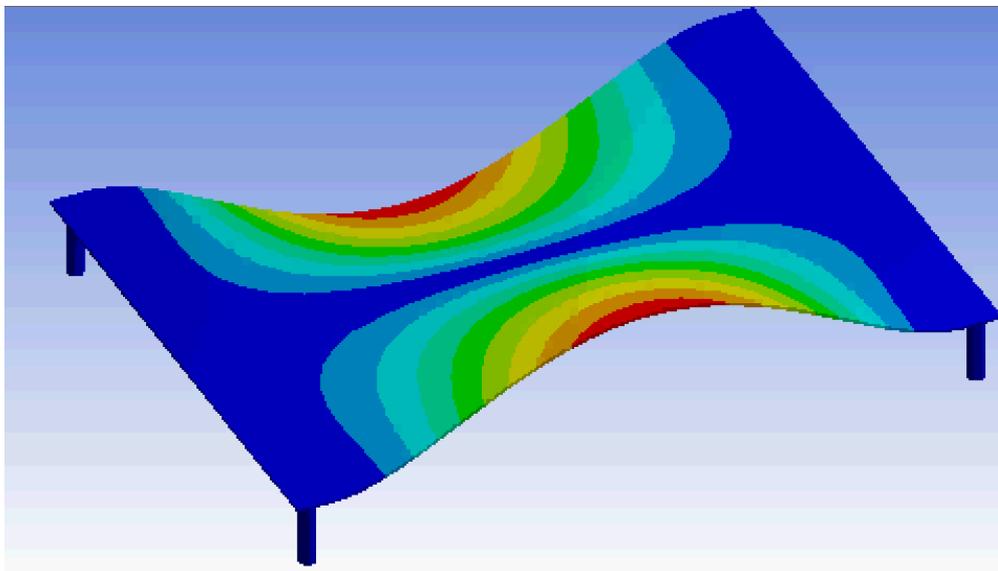


Рис. 8. Фаза внешнего воздействия в точке 1 – 22, в точке 2 – 45, в точке 3, 4 – 90 град.
Пучность сдвинута к левому краю пластины

Однако при изменении размеров платы, способа и точек ее закрепления (фиксации), а также при размещении электрорадиоэлементов на плате, их перекомпоновке резонансные частоты изменяются.

Как показали проведенные исследования: изменяются или сдвигаются собственные резонансные частоты, но формы (моды) стоячих и бегущих волн всегда одинаковые, лишь происходит смещение экстремумов амплитуд в плоскости платы.

Для возникновения той или иной формы нужны лишь соответствующие начальные условия:

- частота возбуждающих колебаний,
- синфазное или противофазное возбуждение колебаний,
- соответствующий сдвиг фаз между возбуждающими колебаниями воздействиями,
- разница амплитуд возбуждающих колебаний,
- девиация частоты возбуждающих колебаний.

Заключение

Варьирование перечисленных начальных условий формирует метод адаптивного управления задания возбуждающих колебаний для того, чтобы сформировать максимум амплитуды стоячей или

бегущей волны в требуемом месте платы. В основе метода управления лежит математическая модель типа «черный ящик» с пошаговым управлением изменением начальных условий возбуждения колебаний.

Библиографический список

1. 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)*. – 2016. – P. 416–418. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
2. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Г. Ж. Надырбеков, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. А. Стрельцов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2017. – Т. 2. – С. 11–13.
3. 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 (24). – С. 149–157.
4. Григорьев, А. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2016. – Т. 2. – С. 31–37.
5. 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.
6. Горячев, Н. В. Программа инженерного расчёта температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2012. – Т. 2. – С. 242–243.
7. Intellectual method for reliability assessment of radio-electronic means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko., A. V. Lysenko, E. A. Danilova, E. A. Kuzina // *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018)*. – 2018. – P. 105–112.
8. Морз, Ф. Колебания и звук : пер. с англ. / Ф. Морз ; под ред. С. Н. Ржевкина. – Москва ; Ленинград : Изд-во техн.-теор. литературы, 1949. – 497 с.
9. 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. 83–87.
10. 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.

References

1. 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)*. 2016, pp. 416–418. DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
2. Nadyrbekov G. Zh., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 11–13. [In Russian]
3. Golovin P. D., Lysenko A. V., Yurkov N. K. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High technologies]. 2013, no. 4 (24), pp. 149–157. [In Russian]
4. Grigor'ev A. V., Zatylykin A. V., Lysenko A. V., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 2, pp. 31–37. [In Russian]
5. Lysenko A. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2014, no. 5-1, pp. 68–69. [In Russian]
6. Goryachev N. V., Lysenko A. V., Grab I. D., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2012, vol. 2, pp. 242–243. [In Russian]
7. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V., Danilova E. A., Kuzina E. A. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018)*. 2018, pp. 105–112.
8. Morz F. *Kolebaniya i zvuk: per. s angl.* [Vibrations and sound: trans. from English]. Moscow; Leningrad: Izd-vo tekhn.-teor. literatury, 1949, 497 p. [In Russian]

9. 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: the results of the past and the problems of the present plus]. 2012, no. 5, pp. 83–87. [In Russian]
10. Golushko D. A., Zatytkin A. V., Lysenko A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: the results of the past and the problems of the present plus]. 2015, no. 4 (26), pp. 147–154. [In Russian]

Калашников Владимир Сергеевич

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

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

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: g.tankov43@mail.ru

Трусов Василий Анатольевич

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

Реута Никита Сергеевич

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

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of design and operation
of aviation radio-electronic equipment,
Military Institute of the Air Defense Forces
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Ya. Begeldinov
(16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

Lysenko Alexey Vladimirovich

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

Tan'kov Georgiy Vasil'evich

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

Trusov Vasiliy Anatolievich

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

Reuta Nikita Sergeevich

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

Образец цитирования:

Формирование управляющего сигнала адаптивной информационно-измерительной и управляющей системы вибрационных испытаний / В. С. Калашников, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, Н. С. Реута // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 90–97. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-10.