

УДК 621.3(075)

URL: <http://ptsj.ru/catalog/iemim/sta/960.html>

АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

О.А. Заплатин

oleg.zaplatin2015@yandex.ru

С.Ф. Тошмаматов

toshmamatovsukhrob@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Представлены основные методики расчета собственной резонансной частоты ячеек электронной аппаратуры, а также ее экспериментальное определение. Рассмотрены такие способы, как теоретический расчет, экспериментальное вычисление и модальный анализ. Приведены краткие теоретические сведения, описывающие колебания прямоугольных пластин. Представлен лабораторный комплекс по исследованию вибрационных воздействий на электронную ячейку. Приведены результаты численного моделирования собственных частот бортовой радиоэлектронной аппаратуры в соответствии с реальными условиями работы. Вычислена погрешность теоретического метода определения собственных частот. Выполнен сравнительный анализ рассмотренных методов, выявлены их преимущества и недостатки.

EDN: YSJXRC

Ключевые слова: собственная частота, упрощенная модель, вибрационный анализ, модальный анализ, печатная плата, радиоэлектронная аппаратура, бортовая электронная аппаратура

Введение. Цель статьи — проведение анализа методик защиты от вибрационных воздействий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Задачи исследования:

- рассмотреть методы определения собственных частот (СЧ) печатной платы (ПП);
- исследовать лабораторный комплекс для вычисления СЧ электронной ячейки (ЭЯ);
- определить расчетные уравнения СЧ ПП;
- провести модальный анализ ПП;
- выполнить сравнительный анализ изложенных методов определения СЧ.

В настоящее время требования по устойчивости к механическим нагрузкам, действующим на РЭА, постоянно повышаются. Механические процессы, возникающие в конструкциях РЭА, можно подразделить на три типа: вибрации, удары, линейные ускорения [1]. Защита конструкций электронной аппаратуры от вибрационных воздействий может осуществляться как пассивны-

ми, так и активными средствами [2–5]. К пассивным относятся демпферы, пружины, прокладки. Активные средства представляют собой амортизаторы, в которых присутствуют элементы с дополнительным источником энергии, что позволяет изменять жесткость и тем самым уменьшать влияние вибрационных нагрузок на РЭА. Недостаток таких средств заключается в усложнении конструкции системы и увеличении габаритов и массы аппаратуры. Для правильного выбора защитной конструкции инженеру-конструктору необходимо определить СЧ ЭЯ. Задача особенно актуальна для бортовой РЭА, на которую могут воздействовать вибрации с частотами от 20 до 2000 Гц и уровнями ускорений до 50g [6].

Печатная плата имеет бесконечное число резонансных частот [7]. Наиболее опасен первый резонанс на частоте f_0 , поскольку он создает максимальные виброперегрузки, приводящие к выходу ЭЯ из строя. Поэтому собственная частота ПП не должна попадать в диапазон частот, при которых эксплуатируется устройство. Далее рассмотрим три способа определения СЧ ПП: экспериментальное обнаружение, теоретический расчет и модальный анализ.

Экспериментальное получение собственной резонансной частоты печатной платы. Методика теоретического расчета собственной резонансной частоты и ее экспериментальное обнаружение использованы при проведении лабораторных работ на кафедре ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана [8].

Для определения собственной резонансной частоты ПП используют лабораторный комплекс [9]. В данной установке акселерометры вырабатывают выходной сигнал, пропорциональный ускорению ЭЯ. Схема комплекса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема лабораторного комплекса [9]

Контакты акселерометров с помощью разъема mini-jack соединяются со звуковой картой в компьютере. Программа Spectra PLUS позволяет отразить графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), используя данные со звуковой карты. Этот метод дает возможность точно определить собственную резонансную частоту исследуемой ЭЯ [10]. Элементы лабораторного комплекса показаны на рис. 2, 3.

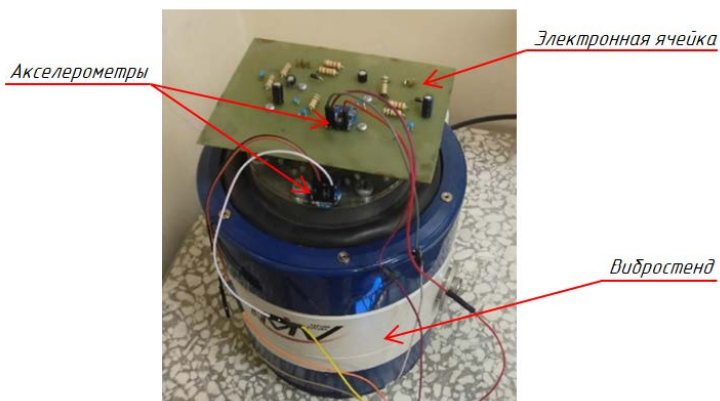


Рис. 2. Вибростенд с закрепленной исследуемой электронной ячейкой [9]



Рис. 3. Генератор сигналов [9]

Теоретический метод расчета собственной резонансной частоты печатной платы. Для теоретического расчета СЧ ПП необходимо решить дифференциальное уравнение свободных колебаний пластины [10–12], выражаемое формулой

$$D\Delta\Delta + \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0,$$

где D — цилиндрическая жесткость ПП, Н · м; Δ — оператор Лапласа, определяемый по формуле

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

W — функция прогиба пластины.

Цилиндрическая жесткость печатной платы определяется по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)},$$

где E — модуль Юнга, Н/м²; h — толщина печатной платы, м; μ — коэффициент Пуассона.

Для составления расчетных уравнений необходимо выбрать способ закрепления ПП: опертый, защемленный или свободный край.

Для определения первой собственной частоты ненагруженной прямоугольной ПП, закрепленной по четырем сторонам, используют следующую формулу [13]:

$$f_0 = \frac{k_\alpha}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m_{\text{ПП}}}} ab, \quad (*)$$

где k_α — коэффициент, зависящий от способа закрепления ПП; a и b — длина и ширина ПП, м; $m_{\text{ПП}}$ — масса ПП, кг.

При определении собственной частоты ПП с электрорадиоэлементами (ЭРЭ) массу компонентов можно включить в массу пластины.

Определение собственной частоты с помощью модального анализа.

Цель модального анализа — определение собственных частот и форм колебаний конструкции. Основными этапами модального анализа конечных элементов являются наложение ограничений на конструкцию, моделирование, получение результатов с последующей обработкой [14, 15].

Модальный анализ ПП в системе автоматизированного проектирования (САПР) Creo был проведен в научной работе «Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами Computer-aided engineering (CAE) анализа» Воронежского государственного технического университета [16]. На рис. 4 представлены результаты модального анализа ПП размерами 200×150 мм, выполненного в САПР Creo. Две короткие стороны платы зафиксированы. Толщина платы составляет 1,5 мм. Первая СЧ составляет 133 Гц, вторая — 182 Гц, третья — 368 Гц.

Формы колебаний отражают максимальные прогибы на соответствующих частотах.

Первая СЧ пластины, вычисленная по формуле (*), составила 148 Гц. Значит, отклонение от результатов моделирования составляет 11 %, что является довольно значимой погрешностью.

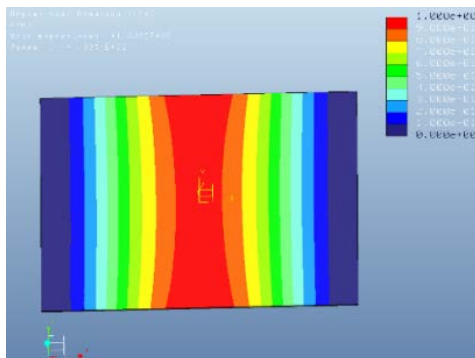


Рис. 4. Первая собственная частота 133 Гц [16]

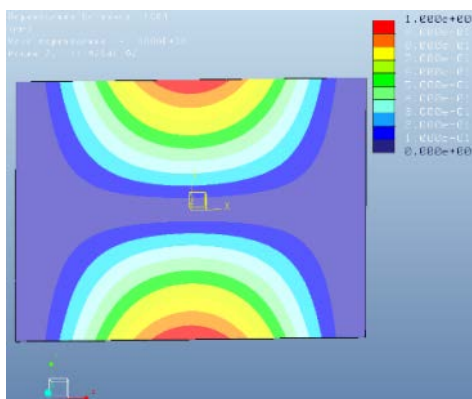


Рис. 5. Вторая собственная частота 182 Гц [16]

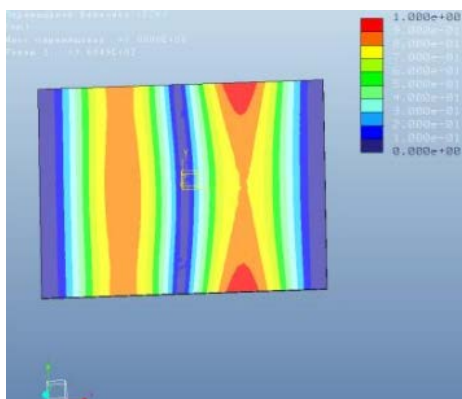


Рис. 6. Третья собственная частота 368 Гц [16]

Сравнительный анализ рассмотренных методов определения собственной частоты ячеек РЭА. Преимущества и недостатки каждого из вышеизложенных методов представлены в таблице.

Сравнительный анализ рассмотренных методов определения собственной частоты ячеек РЭА

Метод	Преимущества	Недостатки
Экспериментальный расчет	Самый точный и наглядный метод	Влияние массы датчика на результаты измерения. Высокие требования к надежности и чувствительности датчиков. Крепление печатной платы не универсальное
Теоретический расчет	Простота вычислений	Невозможно рассчитывать оригинальные конструкции. Невысокая точность, погрешность 8...15 %
Модальный анализ	Визуализация колебаний конструкции. Возможность наглядно проследить изменения при корректировке задаваемых параметров. Расчет любых конструкций	Применение многофункциональных компьютерных систем с высокой вычислительной мощностью. Необходимость упрощения исследуемой модели

Для определения собственной частоты ЭЯ следует смоделировать конструкцию защиты от вибраций, а затем собрать опытный образец и непосредственно измерить его вибрационные характеристики.

Заключение. В ходе работ были рассмотрены основные методы определения СЧ ячеек электронной аппаратуры, такие как экспериментальное вычисление СЧ с помощью лабораторной установки, теоретический расчет и модальный анализ. Проведен сравнительный анализ каждого из методов. По результатам сравнительного анализа выявлена последовательность расчетов, проводимых конструктором для определения вибропрочности бортовой РЭА. Первоначальное моделирование конструкции ЭЯ в САПР позволит рассмотреть различные варианты защиты от вибраций. После определения необходимого средства защиты для конкретных условий применения бортовой РЭА необходимо провести сборку опытного образца для экспериментального исследования его СЧ. Проведение теоретического расчета не является целесообразным в связи со сложностью вычислений и погрешностью порядка

10 %. Исследование вибропрочности согласно вышеизложенным рекомендациям позволит избежать ошибок на этапе моделирования бортовых РЭА.

Литература

- [1] Дмитриевский Е.С. *Техническая эксплуатация, надежность и диагностика авиационного радиоэлектронного оборудования*. Санкт-Петербург, СПГААП, 1996, 93 с.
- [2] Власов А.И. Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей. *Приборы и системы управления*, 1997, № 12, с. 59–70.
- [3] Власов А.И. Нейросетевая реализация микропроцессорных систем активной акусто-и виброзащиты. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2000, № 1, с. 40–44.
- [4] Власов А.И. Принципы активного подавления действия вибрационных полей на электронную аппаратуру. *Приборы и системы управления*, 1996, № 11, с. 30–32.
- [5] Парфенов Е.М., Усачов В.П., Резчикова Е.В. *Методы защиты электронной аппаратуры от механических и акустических воздействий*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1987, 45 с.
- [6] Анненков А.А., Данилова Е.А. Анализ способов обеспечения виброустойчивости печатных узлов. *Надежность и качество. Тр. междунар. симпозиума*, Пенза, ПГУ, 2019, т. 1, с. 262–264. EDN: XLESGA
- [7] Курносенко А.Е., Семенцов С.Г., Соловьев В.А., Шахнов В.А. *Теоретические основы конструирования и надежности электронных средств*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 72 с.
- [8] Мельников И.И., Резчикова Е.В., Сергеева М.Д., Соловьев В.А. Лабораторный комплекс по исследованию вибрационных воздействий на ячейки электронной аппаратуры. *Надежность и качество. Тр. междунар. симпозиума*, Пенза, ПГУ, 2020, с. 136–139.
- [9] Талицкий Е.Н. *Защита РЭА от механических воздействий: уменьшение резонансных колебаний*. Владимир, Владимирский политехнический институт, 1979, 90 с.
- [10] Григорьев В.П., Костиков В.Г., Парфенов Е.М. *Исследование собственных резонансных частот печатных плат*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 49 с.
- [11] Парфенов Е.М., Камышная Э.Н., Усачев В.П. *Проектирование конструкции радиоэлектронной аппаратуры*. Москва, Радио и связь, 1989, 272 с.
- [12] *Исследование собственных резонансных частот печатных плат*. URL: https://iu4.ru/mtb/87_3/3_rez.pdf/ (дата обращения 24.12.2022).

- [13] Турецкий А.В. Разработка подсистемы постановки начальных и граничных условий при моделировании механических характеристик конструкций РЭС в системе PRO/ENGINEER. *Надежность и качество. Тр. междунар. симпозиума*, Пенза, ПГУ, 2011, т. 1, с. 335–336. EDN: ZMZWZE
- [14] Иевлев П.В., Муратов А.В., Слинчук С.А., Тураева Т.Л., Турецкий А.В. Оптимизация процессов проектирования радиоэлектронных модулей третьего уровня средствами. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2016, т. 12, № 6, с. 96–103.
- [15] Аль-Араджи З.Х.М., Муратов А.В., Турецкий А.В., Худяков Ю.В. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами САЕ анализа. *Надежность и качество. Тр. междунар. симпозиума*, Пенза, ПГУ, 2018, т. 1, с. 224–227. EDN: SUUITH

Поступила в редакцию 29.12.2023

Заплатин Олег Александрович — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Тошмаматов Сухроб Фуркат Угли — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Соловьев Владимир Анатольевич, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», заместитель заведующего кафедрой по учебной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. E-mail: volodimer@bmstu.ru

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Заплатин О.А., Тошмаматов С.Ф. Анализ методик определения собственных частот бортовой радиоэлектронной аппаратуры. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 01 (90). URL: <http://ptsj.ru/catalog/iemim/sta/960.html>

ANALYSIS OF METHODS IN DETERMINING NATURAL FREQUENCIES OF THE ON-BOARD ELECTRONIC EQUIPMENT

O.A. Zaplatin

oleg.zaplatin2015@yandex.ru

S.F. Toshmamatov

toshmamatovsukhrob@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper presents basic methods for calculating the natural resonant frequency of the electronic equipment cells, as well as its experimental determination. It considers the following methods: theoretical computation, experimental computation and modal analysis. Brief theoretical information describing the rectangular plate oscillations is provided. A laboratory system to studying the oscillation effect on the electronic cell is presented. Results of the natural frequencies numerical simulation of the on-board radio-electronic equipment are given in accordance with the real operating conditions. The error in the theoretical method for determining natural frequencies is calculated. Comparative analysis of the considered methods was performed, and their advantages and disadvantages were disclosed.

EDN: YSJXRC

Keywords: natural frequency, simplified model, oscillation analysis, modal analysis, printed circuit board, radio electronic equipment, electronic equipment

References

- [1] Dmitrievskiy E.S. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya, nadezhnost' i diagnostika aviatsionnogo radioelektronnogo oborudovaniya*. St. Petersburg, SPGAAP, 1996, 93 p. (In Russ.).
- [2] Vlasov A.I. The current state and trends in the development of the theory and practice of active wave field quenching. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1997, no. 12, pp. 59–70. (In Russ.).
- [3] Vlasov A.I. Neural network realization of microprocessor systems active noise- and vibration control. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye*, 2000, no. 1, pp. 40–44. (In Russ.).
- [4] Vlasov A.I. The principles of active suppression of action of vibration fields on the electronic equipment. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1996, no. 11, pp. 30–32. (In Russ.).
- [5] Parfenov E.M., Usachov V.P., Rezhnikova E.V. *Metody zashchity elektronnoy apparatury ot mekhanicheskikh i akusticheskikh vozdeystviy*. Moscow, BMSTU Press, 1987, 45 p. (In Russ.).
- [6] Annenkov A.A., Danilova E.A. Analysis of ways to ensure vibration resistance of printed components. *Nadezhnost' i kachestvo. Tr. mezhdunar. simpoziuma*, Penza, PGU, 2019, vol. 1, pp. 262–264. (In Russ.). EDN: XLESQA

- [7] Kurnosenko A.E., Sementsov S.G., Solov'ev V.A., Shakhnov V.A. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya i nadezhnosti elektronnykh sredstv*. Moscow, BMSTU Press, 2015, 72 p. (In Russ.).
- [8] Mel'nikov I.I., Rezhikova E.V., Sergeeva M.D., Solov'ev V.A. Laboratory complex for the study of vibration effects on cells of electronic equipment. *Nadezhnost' i kachestvo. Tr. mezhdunar. simpoziuma*, Penza, PGU, 2020, pp. 136–139. (In Russ.).
- [9] Talitskiy E.N. *Zashchita REA ot mekhanicheskikh vozdeystviy: umen'shenie rezonansnykh kolebaniy*. Vladimir, Vladimirskiy politekhnicheskiy institut, 1979, 90 p. (In Russ.).
- [10] Grigor'ev V.P., Kostikov V.G., Parfenov E.M. *Issledovanie sobstvennykh rezonansnykh chastot pechatnykh plat*. Moscow, BMSTU Press, 1998, 49 p. (In Russ.).
- [11] Parfenov E.M., Kamyshnaya E.N., Usachev V.P. *Proektirovanie konstruktsiy radioelektronnoy apparatury*. Moscow, Radio i svyaz', 1989, 272 p. (In Russ.).
- [12] *Issledovanie sobstvennykh rezonansnykh chastot pechatnykh plat*. URL: https://iu4.ru/mtb/87_3/3_rez.pdf/ (accessed December 24, 2022).
- [13] Turetskiy A.V. Development of a subsystem for setting initial and boundary conditions for modeling the mechanical characteristics of RES structures in the PRO/ENGINEER system. *Nadezhnost' i kachestvo. Tr. mezhdunar. simpoziuma*, Penza, PGU, 2011, vol. 1, pp. 335–336. (In Russ.). EDN: ZMZWZE
- [14] Ievlev P.V., Muratov A.V., Slinchuk S.A., Turaeva T.L., Turetskiy A.V. Optimization of processes of projection of radio-electronic modules of the third level means of Creo Parametric 3.0. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 96–103. (In Russ.).
- [15] Al'-Aradzhi Z.Kh.M., Muratov A.V., Turetskiy A.V., Khudyakov Yu.V. Modeling of the mechanical characteristics of multilayer printed circuit boards by means of CAE analysis. *Nadezhnost' i kachestvo. Tr. mezhdunar. simpoziuma*, Penza, PGU, 2018, vol. 1, pp. 224–227. (In Russ.). EDN: SUUITH

Received 29.12.2023

Zaplatin O.A. — Student, Department of Design and Technology of the Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Toshmamatov S.F. — Student, Department of Design and Technology of the Electronic Equipment Production, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Solovyov V.A., Associate Professor, Department of Design and Technology of the Electronic Equipment Production; Deputy Head, Department for Aca-

demic Affairs, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.
E-mail: volodimer@bmstu.ru

Please cite this article in English as:

Zaplatin O.A., Toshmamatov S.F. Analysis of methods in determining natural frequencies of the on-board electronic equipment. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 01 (90). (In Russ.). URL: <http://ptsj.ru/catalog/iemim/sta/960.html>