

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

Сенько Е.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного моделирования механических колебаний (частотного анализа) двусторонней печатной платы программируемого логического контроллера. Исследование проведено для трех вариантов компоновки электронных компонентов с использованием программных комплексов SOLIDWORKS Simulation, Ansys и COMSOL Multiphysics. Выполнен анализ влияния расположения элементов на собственные частоты колебаний платы. Проведена оценка сходимости результатов, полученных в различных CAE-системах, и определен наиболее виброустойчивый вариант компоновки.

Ключевые слова: тепловое моделирование, печатная плата, SOLIDWORKS, Ansys, COMSOL, сравнительный анализ, температура

Введение. Одним из критических факторов, определяющих надежность радиоэлектронных средств (РЭС), является их способность противостоять механическим воздействиям, в частности вибрациям. В процессе эксплуатации, транспортировки или вследствие внешних факторов устройство подвергается динамическим нагрузкам, которые могут привести к резонансным явлениям в конструкции. Возникновение резонанса способно вызвать усталостные разрушения печатных плат, нарушение паяных соединений и, как следствие, полный отказ устройства [1-8].

Особую важность представляет исследование влияния компоновки – расположения электронных компонентов на печатной плате – на ее динамические характеристики. Рациональное размещение элементов может существенно повысить собственную частоту колебаний платы, выводя ее из зоны резонанса с внешними воздействующими частотами.

В данной работе проводится сравнительный анализ результатов частотного моделирования для трех вариантов компоновки печатной платы с использованием трех различных программных комплексов. Целью исследования является оценка сходимости результатов и выбор компоновки, обеспечивающей максимальную виброустойчивость.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) являются основой современных систем промышленной автоматизации, управления технологическими процессами и распределенных систем сбора данных. В условиях цифровой трансформации промышленности требования к надежности и безотказности работы ПЛК существенно возрастают, поскольку выход из строя контроллера может привести к остановке производственного цикла, возникновению аварийных ситуаций и значительным экономическим потерям.

Актуальность исследований. Одним из критических факторов, определяющих долговечность и отказоустойчивость электронных модулей ПЛК, является их способность сохранять работоспособность при воздействии механических нагрузок. В реальных условиях эксплуатации промышленные контроллеры подвергаются широкому спектру механических воздействий: вибрациям, возникающим при работе производственного оборудования; ударным нагрузкам при транспортировке и монтаже; циклическим деформациям, обусловленным термомеханическими процессами. Особую значимость эта проблема приобретает для контроллеров, устанавливаемых на подвижных объектах (транспорт, железнодорожная техника) или в зонах с интенсивной вибрационной нагрузкой.

Традиционные подходы к оценке вибропрочности электронных модулей, основанные на натурных испытаниях, требуют значительных временных и материальных затрат, а также не всегда позволяют выявить критические зоны конструкции на ранних этапах проектирования.

В связи с этим возрастает роль методов компьютерного моделирования, позволяющих на этапе разработки прогнозировать динамическое поведение конструкции, определять собственные частоты колебаний, выявлять зоны концентрации напряжений и оптимизировать конструктивные параметры электронных модулей.

Несмотря на широкое распространение систем автоматизированного инженерного анализа (CAE), вопросы достоверности и сходимости результатов моделирования механических воздействий на электронные модули остаются актуальными. Различные программные комплексы, реализующие конечно-элементный анализ, могут давать отличающиеся результаты в зависимости от применяемых алгоритмов, способов дискретизации расчетной области и моделей поведения материалов. Это требует критической оценки используемых инструментов и разработки методических подходов к моделированию динамических процессов в электронных модулях.

Настоящее исследование направлено на решение задачи частотного анализа электронного модуля программируемого логического контроллера с использованием методов компьютерного моделирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности промышленных контроллеров на этапе проектирования, сокращения сроков и стоимости разработки за счет применения современных CAE-средств, а также обоснования выбора программных комплексов для решения задач динамического анализа электронных модулей.

Методика моделирования. Объектом исследования является двусторонняя печатная плата из стеклотекстолита FR-4 с фиксированным набором электронных компонентов, но с тремя различными вариантами их пространственного расположения.

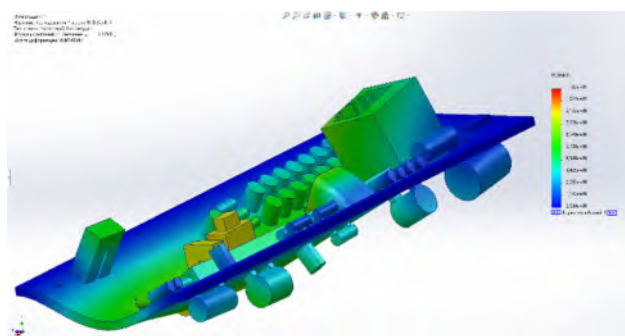
Моделирование проводилось в трех программных комплексах:

- SOLIDWORKS Simulation: модуль частотного анализа, интегрированный в CAD систему SOLIDWORKS, использующий метод конечных элементов для расчета собственных частот и форм колебаний;
- Ansys: расчет в модуле Modal Analysis, реализующем мощные алгоритмы для решения задач динамики конструкций;
- COMSOL Multiphysics: моделирование в модуле Structural Mechanics Module, позволяющее проводить детальный частотный анализ с высокой степенью контроля над сеткой и решателем.

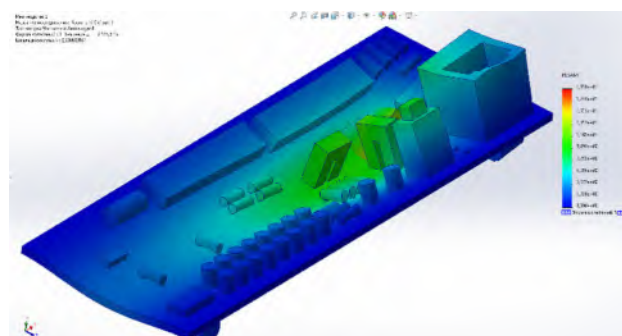
Для всех трех вариантов компоновки были заданы идентичные граничные условия, соответствующие реальным условиям эксплуатации устройства:

- фиксация платы по трем сторонам;
- материал платы и компонентов задан в соответствии с их физическими свойствами;
- сетка конечных элементов строилась с учетом геометрических особенностей моделей для обеспечения сходимости расчетов.

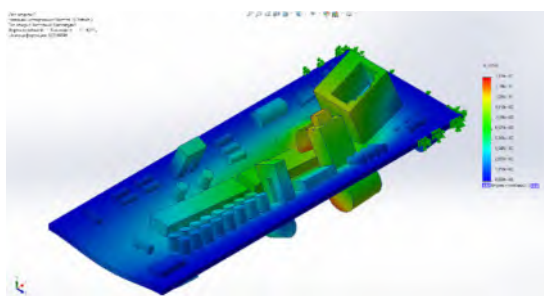
На рисунке 1 представлены трехмерные модели печатной платы для трех исследуемых вариантов компоновки, построенные в среде SOLIDWORKS.



а – первая компоновка



б – вторая компоновка

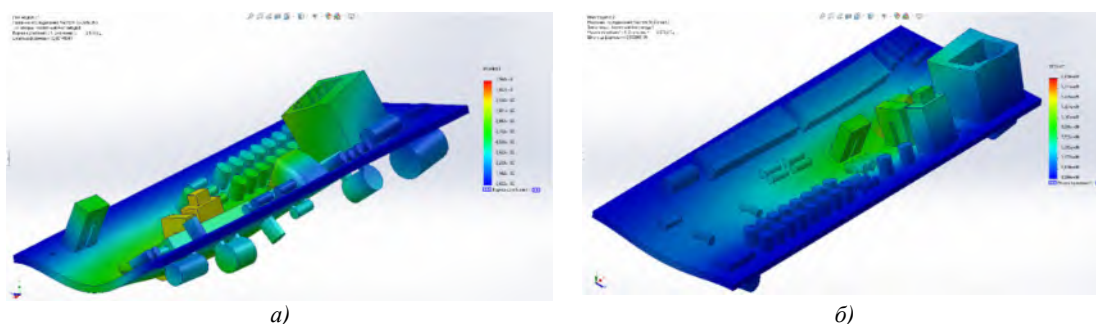


в – третья компоновка

Рисунок 1 – Трехмерные модели печатной платы для трех вариантов компоновки в SolidWork

Результаты и их обсуждение. В результате моделирования для каждого варианта компоновки и в каждой программной среде были получены значения минимальной собственной частоты колебаний, которая является наиболее критичной с точки зрения возникновения резонанса.

На рисунке 2 показаны примеры визуализации результатов частотного анализа для программных сред Ansys *а)* и COMSOL *б)* соответственно для первой компоновки.



а)

б)

Рисунок 2 – Трехмерные модели печатной платы для первого варианта компоновки в Ansys и COMSOL

Сводные результаты по минимальным собственным частотам для всех вариантов и сред представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение минимальной собственной частоты (Гц) для различных вариантов компоновки и программных сред

Программная среда	Вариант компоновки 1	Вариант компоновки 2	Вариант компоновки 3
SOLIDWORKS	2179	2376	2117
Ansys	2082	2343	2126
COMSOL	2133	2366	2091
Среднее значение	2131	2362	2111

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1 Влияние компоновки: Наиболее высокая собственная частота (в среднем 2362 Гц) наблюдается для второго варианта компоновки, где крупные элементы разнесены по сторонам платы. Это свидетельствует о том, что данное расположение компонентов обеспечивает наилучшую виброустойчивость конструкции. Первый и третий варианты показывают более низкие значения частот (2131 Гц и 2111 Гц соответственно).

2 Сходимость результатов: Результаты, полученные в трех различных программных комплексах, показывают высокую степень сходимости. Расхождения в значениях минимальной собственной частоты для каждого варианта компоновки не превышают 5%. Это подтверждает корректность построенных моделей и достоверность полученных данных.

3 Соответствие требованиям: Все полученные значения собственных частот (более 2000 Гц) значительно превышают максимальную частоту внешних вибрационных воздействий для данного класса аппаратуры (60 Гц согласно ГОСТ 23752-79 для 2-й группы жесткости). Это гарантирует отсутствие резонансных явлений в рабочем диапазоне и высокую надежность устройства при эксплуатации.

Закключение. Проведенное сравнительное исследование подтвердило, что все рассмотренные CAE-системы (SOLIDWORKS Simulation, Ansys и COMSOL Multiphysics)

являются эффективными инструментами для прогнозирования динамических характеристик печатных плат. Результаты частотного анализа, полученные в трех программных средах, демонстрируют хорошую сходимость.

Установлено, что изменение компоновки электронных компонентов оказывает существенное влияние на собственную частоту колебаний печатной платы. Наиболее виброустойчивым является вариант компоновки с рассредоточенным расположением крупных элементов, обеспечивающий минимальную собственную частоту на уровне 2362 Гц. Все исследуемые варианты компоновки обеспечивают большой запас по частоте по отношению к максимальной частоте внешних вибрационных воздействий, что гарантирует механическую надежность разрабатываемого устройства.

Список литературы

1. Рыбаков, Д. Г. Применение метода конечных элементов при анализе физических процессов, протекающих в системе мониторинга окружающей среды в программе SolidWorks Simulation / Д. Г. Рыбаков, А. Н. Беликов, В. Ф. Алексеев // Электронные средства и системы управления : материалы докладов XIX Международной научно-практической конференции, Томск, 15–17 ноября, 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск : В-Спектр, 2023. – С. 132–134.
2. Алексеев, В. Ф. Математическое моделирование как средство оптимизации параметров силовых интегральных микросхем / В. Ф. Алексеев, А. Д. Сыс, Г. А. Пискун // Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform. – Vilnius, 2021. – P. 109–113. – DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование распределения плотности тока на печатной плате = Simulation of the current density distribution on a PCB / В. Ф. Алексеев, А. П. Горбач, Е. В. Хуторная // Sciences of Europe. – 2020. – Т. 1, № 55. – С. 37–41.
4. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.
5. Адаптеры для программирования микроконтроллеров AVR [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehnoobzor.com/schemes/chips/109-adaptery-dlya-programmirovaniya-mikrokontrollov-avr.html/>.
6. ANSYS Mechanical User's Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/documentation>.
7. Алексеев, В. Ф. Алгоритмы иерархического анализа тепловых процессов радиоэлектронных средств / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский // Цифровая среда: технологии и перспективы : сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Брест, 31 октября–1 ноября 2024 г. / Брестский государственный технический университет ; редкол.: Н. Н. Шалобыта (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2024. – С. 221–226.
8. Алексеев, В. Ф. Особенности проектирования медицинских электронных устройств = Features of Design of Medical Electronic Devices / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 51–57.

UDC 004.94:621.396.6:534.1

FREQUENCY ANALYSIS OF MECHANICAL IMPACT SIMULATION ON AN ELECTRONIC MODULE OF A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

Senko E.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The article presents the results of comparative modeling of mechanical vibrations (frequency analysis) of a two-sided printed circuit board of a programmable logic controller. The study was conducted for three layout options for electronic components using the software packages SOLIDWORKS Simulation, Ansys and COMSOL Multiphysics. The influence of the arrangement of the elements on the natural oscillation frequencies of the board is analyzed. The convergence of the results obtained in various CAE systems was evaluated, and the most vibration-resistant layout option was determined.

Keywords: thermal modeling, printed circuit board, SOLIDWORKS, Ansys, COMSOL, comparative analysis, temperature