

МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОМОТОРАМИ

Быстров М.Ю.

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

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

Аннотация. В работе рассмотрен процесс определения собственных частот колебаний печатной платы электронного контроллера управления сервомоторами. Анализ выполнялся с использованием двух программных средств – *SolidWorks* и *COMSOL*. В ходе моделирования была построена трёхмерная модель платы с установленными компонентами, заданы материалы и граничные условия, после чего выполнен частотный анализ. В результате установлено, что собственная частота конструкции составляет 1219,5 Гц в *SolidWorks* и 1106,6 Гц в *COMSOL*. Проведено сравнение результатов и дана оценка различий. Показано, что несмотря на расхождения, обе программы дают схожую картину поведения конструкции.

Ключевые слова: печатная плата, собственная частота, частотный анализ, вибрации, моделирование, *SolidWorks*, *COMSOL*.

Введение. При разработке электронных устройств важно учитывать не только электрические характеристики, но и механические свойства конструкции. Печатные платы являются основой большинства электронных систем, и именно они принимают на себя воздействие вибраций, ударов и других нагрузок [1–8].

Во время работы устройства или при транспортировке могут возникать механические колебания. Если частота этих колебаний совпадает с собственной частотой платы, возникает резонанс. Это может привести к повреждению дорожек, пайки или компонентов.

Чтобы избежать подобных ситуаций, на этапе проектирования выполняется анализ собственных частот. Такой анализ позволяет заранее определить, при каких условиях конструкция может работать нестабильно.

В настоящее время для решения подобных задач широко применяются системы автоматизированного проектирования и инженерного анализа. Среди них можно выделить *SolidWorks* и *COMSOL*.

Целью данной работы является определение собственных частот печатной платы контроллера и сравнение результатов, полученных в разных программных средах.

Роль многоканальных контроллеров в современных мехатронных системах. Многоканальные контроллеры управления сервомоторами являются ключевым звеном в структуре современных мехатронных систем, включая промышленные роботы, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), автоматизированные линии сборки, медицинскую технику и высокоточное позиционирующее оборудование. Эти устройства осуществляют синхронное управление несколькими исполнительными механизмами, обеспечивая координацию движений с высокой точностью и быстродействием.

В условиях развития промышленности 4.0 и роботизации производства требования к надежности и безотказности контроллеров управления существенно возрастают. Отказ такого устройства в процессе эксплуатации может привести к нарушению технологического цикла, повреждению дорогостоящего оборудования, а в некоторых случаях – к созданию аварийных ситуаций, угрожающих безопасности персонала.

Влияние механических воздействий на работоспособность печатных плат. Печатная плата контроллера, являющаяся несущей конструкцией для всех электронных компонентов, в процессе эксплуатации подвергается комплексным механическим воздействиям. Особую значимость эта проблема приобретает для многоканальных

контроллеров, которые, как правило, имеют увеличенные габариты печатной платы (для размещения нескольких каналов управления) и, соответственно, меньшую жесткость конструкции. При этом на плате могут быть установлены тяжелые компоненты (силовые модули, трансформаторы, конденсаторы большой емкости), создающие дополнительные сосредоточенные массы, что снижает собственные частоты колебаний.

Последствия недостаточной вибропрочности. Недостаточная вибропрочность печатной платы может привести к следующим негативным последствиям: механическому разрушению паяных соединений (особенно для компонентов в корпусах BGA, QFN), что является одной из наиболее частых причин отказов электроники в вибрационных условиях; повреждению выводов компонентов и дорожек печатного монтажа; нарушению электрических контактов в разъемных соединениях; микротрещинам в диэлектрике печатной платы, приводящим к снижению сопротивления изоляции и пробоям; изменению параметров электронных компонентов под воздействием механических напряжений (особенно для кварцевых резонаторов, конденсаторов, индуктивных элементов).

Ограничения традиционных подходов к оценке динамической прочности. Традиционные методы обеспечения вибропрочности печатных плат базируются на: аналитических расчетах, использующих упрощенные модели (пластина постоянной толщины с равномерным распределением массы), которые не учитывают реальную топологию размещения компонентов и локальные изменения жесткости; натурных испытаниях на вибростендах, требующих изготовления полноценных опытных образцов, что сопряжено со значительными временными и материальными затратами, а также не позволяет оперативно оценить влияние конструктивных изменений на динамические характеристики; эмпирических рекомендациях, основанных на опыте проектирования аналогичных устройств, которые не всегда применимы к новым конструктивным решениям [1–8].

Выявление проблем вибропрочности на этапе испытаний готового изделия приводит к необходимости дорогостоящих доработок (изменение геометрии платы, введение дополнительных креплений, применение демпфирующих материалов) и затягиванию сроков вывода продукции на рынок.

Возможности и проблемы компьютерного моделирования. Современные системы автоматизированного инженерного анализа (CAE) позволяют перенести оценку динамических характеристик печатных плат на ранние этапы проектирования. Модальный анализ, реализуемый в таких программных комплексах, как ANSYS, SOLIDWORKS Simulation, COMSOL Multiphysics, дает возможность определить собственные частоты и формы колебаний конструкции, выявить зоны наибольших деформаций и оценить запасы по резонансным частотам.

Эффективность компьютерного моделирования определяется рядом факторов: достоверностью исходных данных о физико-механических свойствах материалов (стеклотекстолит FR-4, медь, припой, корпуса компонентов); адекватностью выбора расчетных схем и граничных условий (способы крепления платы, наличие демпфирующих элементов); качеством конечно-элементной сетки, особенно в зонах концентрации напряжений; учетом влияния установленных компонентов на общую жесткость и распределение масс.

В открытых источниках недостаточно представлены систематические исследования по моделированию собственных частот колебаний печатных плат многоканальных контроллеров управления сервомоторами, учитывающие реальную конструктивную сложность таких устройств. Отсутствуют количественные оценки влияния различных факторов (способ крепления, наличие тяжелых компонентов, конструкция корпуса) на динамические характеристики платы.

Основная часть. Для проведения анализа была использована трёхмерная модель печатной платы контроллера с размещёнными на ней электронными компонентами. Модель включает саму плату, разъёмы, микроконтроллер и другие элементы, влияющие на массу и жесткость конструкции. На первом этапе моделирование выполнялось в программе

SolidWorks. Для этого была создана геометрическая модель платы с учетом всех основных элементов. Далее был подключен модуль *Simulation*, который позволяет выполнять инженерные расчёты [2, 6].

В качестве типа исследования был выбран частотный анализ. Такой тип анализа используется для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Особое внимание было уделено заданию материалов. Для печатной платы был выбран материал, соответствующий стеклотекстолиту, а для компонентов – материалы с учетом их свойств. Это важно, так как масса и жесткость напрямую влияют на результат. Граничные условия задавались в виде закрепления платы в местах крепежных отверстий. Такой подход позволяет приблизить модель к реальным условиям эксплуатации. После этого была построена конечно-элементная сетка. Чем качественнее сетка, тем точнее результат, однако увеличивается время расчета. После завершения настройки был выполнен расчет [8].

По результатам анализа в *SolidWorks* была получена собственная частота равная 1219,5 Гц, представленная на рисунке 1:

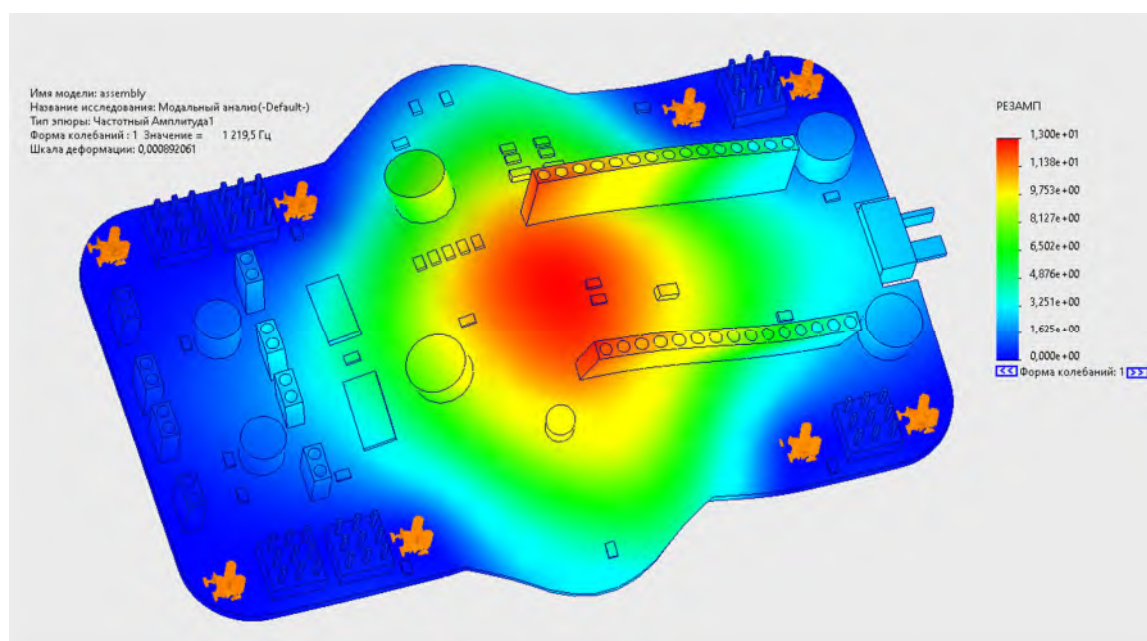


Рисунок 1 – Результат моделирования в программе *SolidWorks*

Также была определена форма колебаний. Анализ показал, что наибольшие перемещения возникают в центральной части платы. Это связано с тем, что края закреплены, а середина имеет меньшую жесткость.

Далее аналогичный анализ был выполнен в программе *COMSOL*. Эта система позволяет более гибко настраивать параметры расчета и учитывать различные физические процессы.

Для проведения анализа была использована та же геометрическая модель. В модуле *Structural Mechanics* был выбран режим расчета собственных частот. Как и в предыдущем случае, были заданы материалы, построена расчетная сетка и заданы граничные условия. Важно отметить, что совпадение условий необходимо для корректного сравнения результатов.

После выполнения расчета была получена собственная частота равная 1106,6 Гц, представленная на рисунке 2:

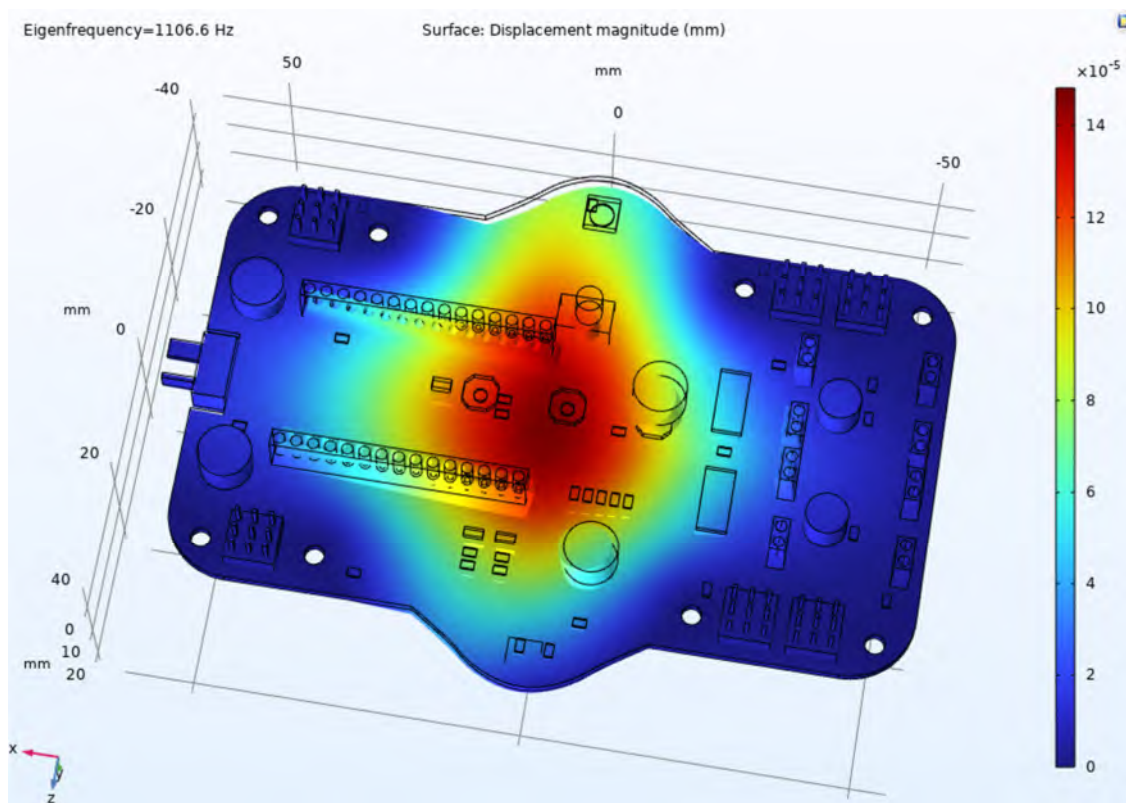


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе *Comsol*

По результатам моделирования установлено, что собственная частота колебаний печатной платы составляет 1219,5 Гц в программном комплексе *SolidWorks* и 1106,6 Гц в *COMSOL*. Различие между полученными значениями составляет около 9,3 %, что объясняется различиями в используемых численных методах, особенностями построения расчётной сетки и алгоритмами, применяемыми в данных программных продуктах.

Несмотря на расхождение численных результатов, формы колебаний в обоих случаях оказались схожими. Максимальные деформации наблюдаются в центральной части печатной платы, в то время как области крепления остаются наименее подверженными перемещениям. Это свидетельствует о корректности выполненного моделирования и адекватности выбранных условий расчёта.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что исследуемая конструкция обладает достаточной механической жёсткостью, однако центральная область платы является наиболее нагруженной и может потребовать дополнительного усиления при необходимости повышения надёжности устройства. В целом проведённый анализ показывает, что использование *SolidWorks* удобно для быстрого получения оценочных результатов, тогда как *COMSOL* предоставляет более широкие возможности для детального инженерного анализа. Совместное применение данных программных средств позволяет повысить точность и достоверность расчётов при проектировании печатных плат.

Список литературы

1. Segatello, M. Hexapod con ESP32 / M. Segatello // *Elettronica In.* – №283. – С. 63-77.
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в *SolidWorks* / Д. В. Зиновьев. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. 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. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.
4. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микросистемных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

5. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.

6. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf. – Дата доступа: 20.03.2026.

7. Частотный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2021/Russian/SolidWorks/cworks/c_Frequency_Analysis.htm – Дата доступа: 27.03.2025.

8. G.A. Dymov, V.P. Belichenko. The main structural element of a reinforced concrete support: mathematical modeling of mechanical vibrations // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021.

UDC 004.94:621.396.6:534.1

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELING THE NATURAL FREQUENCY OF A MULTI-CHANNEL SERVO MOTOR CONTROL PCB IN SOLIDWORKS AND COMSOL

Bystrou M.Y.

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

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

Annotation. This paper considers the process of determining the natural frequencies of a printed circuit board (PCB) of an electronic servo motor control unit. The analysis was performed using two software tools – SolidWorks and COMSOL. During the simulation, a three-dimensional model of the PCB with mounted components was created, material properties and boundary conditions were defined, and a frequency analysis was carried out.

As a result, it was found that the natural frequency of the structure is 1219.5 Hz in SolidWorks and 1106.6 Hz in COMSOL. A comparison of the results was performed and the differences were evaluated. It is shown that despite some discrepancies, both programs demonstrate a similar behavior of the structure.

Keywords: printed circuit board, natural frequency, frequency analysis, vibrations, modeling, SolidWorks, COMSOL