УДК 519.677

**Модальный анализ блока управления гексаподом**

**Желтышев О.И., Тимофеева В.И., Джгамадзе Г.Т.**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова*

В настоящее время в космической отрасли активно развивается разработка устройств высокоточного позиционирования. В Балтийском Государственном Техническом Университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова и АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва ведётся совместная разработка устройства высокоточного позиционирования навигационных объектов – гексапода. НИОКТР выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в организации Головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, договор от 01.12.2015 г. № 02.G25.31.0160. Гексапод предназначен для работы в открытом космосе в составе космического аппарата. Задачей гексапода является позиционирование крупногабаритной антенны для наведения её на область поверхности Земли. Гексапод состоит из электромеханической части – неподвижного основания, шести линейных приводов и подвижной платформы, и блока управления гексаподом. [1].

К устройствам, предназначенным для работы в открытом космосе предъявляются особые требования по устойчивости к внешним воздействиям. Одним из требований является устойчивость к возникновению резонанса конструкции при внешнем вибрационном воздействии, которому подвергается гексапод при выводе на околоземную орбиту в составе космического аппарата. Для проверки устойчивости к возникновению резонанса, проводится модальный анализ с целью определения собственных частот.

Объектом исследования данной работы является блок управления гексаподом, состоящий из 16 печатных плат, обеспечивающих управление положением подвижной платформы, установленных в составном корпусе с изолирующими прокладками и нагревательными элементами.

Целью данной работы является оценка собственных частот блока управления для подтверждения устойчивости конструкции к возникновению резонанса. При расчёте определяются шесть первых частот колебаний. Для обеспечения устойчивости блока управления гексаподом первая частота собственных колебаний должна быть не менее 450 Гц, что гарантирует трехкратный запас устойчивости к резонансу. Если первая собственная частота находится в диапазоне менее 150 Гц, возможно возникновение резонанса, который вызовет резкое увеличение амплитуды колебаний блока управления и его компонентов, что приведет к разрушению печатных плат, конструктивных элементов, паяных соединений. Разрушение блока управления в процессе вывода на околоземную орбиту приведет к невозможности управления гексаподом и выводе из строя всего устройства, замена и ремонт устройства не представляется возможным.

**Модальный анализ блока**

Результатами модального анализа являются частоты собственных колебаний и моды колебаний. Модой колебаний называется распределение смещений точек конструкции, при котором смещение каждого участка её поверхности происходит по типу гармонического колебания с одной частотой, называемой собственной. Модами называются формы колебаний, каждая из которых соответствует определенной частоте. Определяют изгибные и крутильные моды колебаний. Блок управления состоит из сборных парных кассет, каждая из пар кассет может быть упрощённо представлена как пластина. Пластина закреплена по двум точкам в основании, поэтому для её расчёта применимы приближенные методы. В пластинах существует динамический краевой эффект, заключающийся в том, что на форму колебания закрепление влияет только вблизи границы, а далее форма колебаний определяется произведением синусоидальных колебаний. [2,3] Соответственно форму колебаний пластины можно представить, как сумму функций, представленных на формуле 1:

,

где ω – амплитудная функция колебаний пластины;

x, y – оси средней плоскости пластины;

a, b – длина и ширина пластины.

Частота свободных колебаний конструкции определяется свойствами инерции, демпфирования, жесткости. При модальном анализе допускается не учитывать свойства демпфирования материалов.

Одним из способов расчёта значений частот собственных колебаний с помощью САПР является метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ – наиболее общий прием дискретизации системы с распределенными параметрами, при котором дискретизируются инерционые и жесткостные характеристики.

Суть МКЭ: конструкция разбивается на элементы, связанные между собой в отдельных узлах. Перемещения узлов принимаются за обобщенные координаты системы. Вычисляются потенциальная и кинетическая энергии элемента, выраженные через узловые перемещения; а полная энергия системы представляет собой сумму энергий всех элементов конструкции. [4]. В связи с этим уравнение движения собственных колебаний в конечно-элементной форме при отсутствии внешнего воздействия имеет вид:

 (2)

где M – матрица инерции;

K – матрица жесткости;

X’’(t) – вектор узловых ускорений;

X(t) – вектор узловых перемещений;

Расчет собственных частот и мод колебаний конструкции проводится как для отдельных составных частей блока управления гексаподом, так и для всего изделия в целом [5].

Анализ спектра собственных частот выполняется поэтапно:

1. Модальный анализ модуля блока управления гексаподом.
2. Учёт распределения масс радиоэлектронных компонентов печатных плат.
3. Модальный анализ блока управления гексаподом.

**Модальный анализ модуля блока управления гексаподом.**

Блок управления гексаподом состоит из набора модулей для управления линейными приводами, контроллеров блока управления и питания гексапода. Кассеты обеспечивают силовой каркас и отведение тепла от элементов печатных плат, в крышках установлены разъемы для подключения силовых и информационных шлейфов линейных приводов. В состав модулей входит кассета, диэлектрическая прокладка для предотвращения контакта выводов элементов и дорожек печатных плат с корпусом блока управления, медная прокладка для улучшения теплообмена между платами и кассетой и их зеркальное отражение. Модальный анализ модуля необходимо проводить с учётом масс и условий закрепления прокладок и печатной платы.

Первым этапом решения задачи является задание начальных условий: условия закрепления модуля относительно основания блока управления, контакты и условия закрепления между элементами кассеты, материалы и массы элементов. Корпус кассеты крепится к блоку управления с помощью винтов в основании, диэлектрические и медные прокладки устанавливаются между платой и стенкой кассеты, кассеты стягиваются винтами, фиксируя компоненты модуля. При построении расчётной модели контакт между печатными платами и прокладками можно считать сплошным по всей поверхности. С помощью САПР построена конечно-элементная модель гексаподом, изображенная на рисунке 1, и проведен модальный анализ модуля блока управления, результаты представлены в таблице 1.

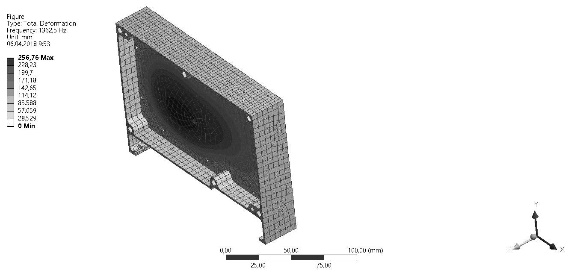


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель модуля блока управления гексаподом

Таблица 1 – Результаты модального анализа модуля блока управления гексаподом

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Порядковый номер моды | Значение частоты, Гц | Форма колебаний |
| 1 | 1362,5 | Изгибные |
| 2 | 1532,7 | Изгибные |
| 3 | 1816,8 | Изгибные |
| 4 | 2710 | Изгибные |
| 5 | 3378,6 | Изгибные |
| 6 | 3906,6 | Изгибные |

Результатами расчёта являются значения частот собственных колебаний и формы колебаний. Согласно расчёту, первая частота собственных колебаний модуля блока управления составляет 426 Гц. На этой частоте проявляется первая изгибная мода. Модуль блока управления аналитически представляется в форме прямоугольной пластины, поэтому все формы колебаний изгибные. Первая собственная частота находится выше 450 Гц, следовательно, модуль блока управления как самостоятельный элемент устойчив к возникновению резонанса, запас по устойчивости удовлетворяет заданным требованиям. При сборке модулей распределение масс и общая жесткость конструкции изменится, поэтому для уточнения математической модели необходимо провести дополнительные расчёты собственных частот модулей.

**Учёт распределения масс радиоэлектронных компонентов печатных плат.**

Модальный анализ модуля блока управления проведен с заданной общей массой печатных плат, с равномерно распределённой массой, но радиоэлектронные компоненты обладают различными массами и распределены по поверхности печатной платы неравномерно, следовательно, для повышения точности расчёта необходимо учесть распределение масс компонентов на печатной плате. Учет распределения масс является вторым этапом решения задачи. Блок управления состоит из трех типов модулей, оснащённых разными наборами радиоэлектронных компонентов, поэтому проведены независимые расчёты модулей в соответствии с их спецификациями и компоновкой. Для упрощения конечно-элементной модели, ускорения проведения расчёта, уменьшения требуемой вычислительной мощности модели элементов заменены точечными массами для элементов малых габаритов – до 10 мм и распределенными по площади массами для крупных элементов. Конечно-элементные модели модулей представлены на рисунках 2-3, результаты расчёта представлены в таблице 3.

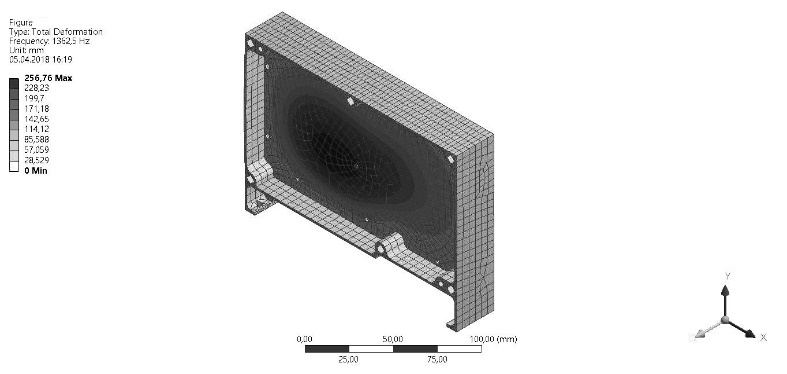


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель модуля управления линейным приводом

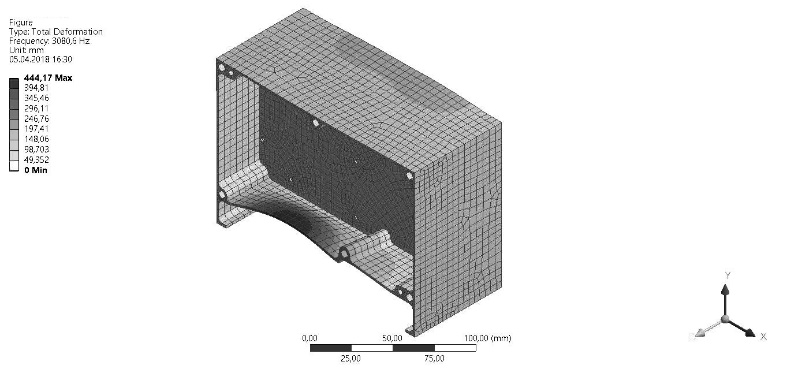


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель модуля источника питания блока управления гексаподом

Таблица 2 – Результаты модального анализа модулей блока управления гексаподом

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Модуль блока управления | Порядковый номер моды | Значение частоты, Гц | Форма колебаний |
| Модуль управления линейным приводом | 1 | 1321,4 | Изгибные |
| 2 | 1450,7 | Изгибные |
| 3 | 1743,6 | Изгибные |
| 4 | 2590 | Изгибные |
| 5 | 3350,6 | Изгибные |
| 6 | 3901,2 | Изгибные |
| Модуль источника питания блока управления гексаподом | 1 | 1067 | Изгибные |
| 2 | 2499,6,6 | Изгибные |
| 3 | 2669,8 | Изгибные |
| 4 | 2822,3 | Изгибные |
| 5 | 3507,3 | Изгибные |
| 6 | 3656,3 | Изгибные |

Согласно результатам расчёта, все модули блока управления гексаподом соответствуют заданным требованиям по устойчивости к возникновению резонанса, требуемый запас по устойчивости обеспечен. Уменьшение частот собственных колебаний объясняется увеличением массы и несимметричным распределением компонентов на модулях, компоненты влияют на распределение колебаний по ближайших к ним областям корпусных элементов.

**Модальный анализ блока управления гексаподом.**

Последним этапом решения задачи является анализ блока управления гексаподом. Для проведения анализа необходимо учитывать крепление модулей к основанию и изменение условий закрепления. Модули фиксируются на основании с помощью винтового соединения и в расчётной модели определяются как контактные площадки, основание фиксируется в глобальной системе координат в точках закрепления. В данном расчёте учитываются результаты расчёта с учётом распределения масс радиоэлектронных компонентов. Конечно-элементная модель блока управления гексаподом представлена на рисунке 4, результаты расчёта представлены в таблице 3.

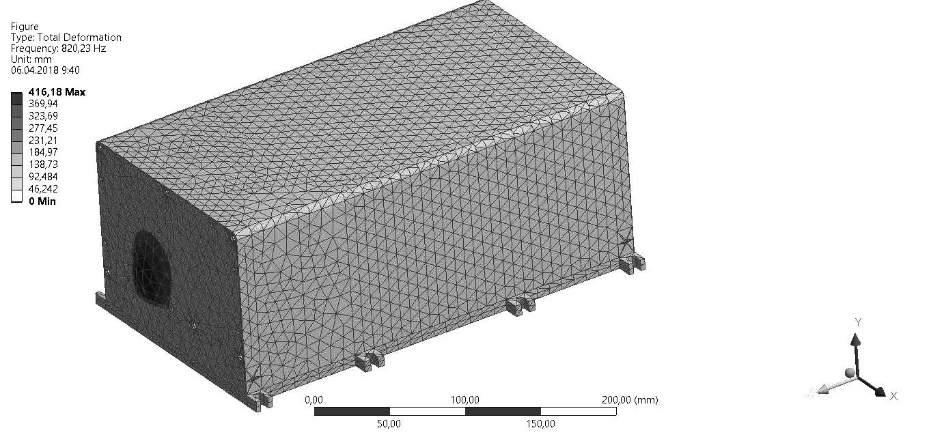


Рисунок 4 - Конечно-элементная модель блока управления гексаподом

Таблица 3 – Результаты расчёта блока управления гексаподом

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Порядковый номер моды | Значение частоты, Гц | Форма колебаний |
| 1 | 820,23 | Изгибные |
| 2 | 975,4 | Изгибные |
| 3 | 1134 | Изгибные |
| 4 | 1162,8 | Изгибные |
| 5 | 1172 | Изгибные |
| 6 | 1182 | Изгибные |

Анализ собранного блока управления подтверждает устойчивость к возникновению резонанса в заданном диапазоне до 450 Гц, что также обеспечивает трехкратный запас по устойчивости, первая частота собственных колебаний составляет 820,23 Гц. Увеличение частоты значений собственных частот достигается увеличением жесткости конструкции и уменьшением её веса. Малый вес блока управления достигается использованием в качестве материала для корпусной части алюминия и сетчатой формы кассет. Разбиение блока управления на конечные элементы выполнено недостаточно точно в связи с ограниченностью мощностей вычислительных ресурсов, улучшение сетки конечных элементов позволит с большей точности определить значения частот.

**Заключение**

Расчеты, проведенные в данной работе, показали, что все модули блока управления гексаподом отвечают требованиям по устойчивости к возникновению резонанса при выводе блока управления на околоземную орбиту в составе космического аппарата. Устойчивость блока управления обеспечивается малым весом и достаточной жесткостью. При выводе блока управления на околоземную орбиту в составе космического аппарата, не возникает условий для резонанса конструкции, следовательно, вибрационное воздействие не приведет к разрушению печатных плат, конструктивных элементов, паяных соединений и выходу из строя изделия, блок управления соответствует заданным требованиям. Для проверки рассчитанных значения планируется провести испытания блока управления на проектируемом авторами статьи вибростенде.

**Список литературы**

1. Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Высокоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения. Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42–47
2. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
3. Гонткевич, В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. – М., 1964.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М., 1975.
5. Бернс, В.А., Долгополов А.В., Маринин Д.А. Модальный анализ конструкции по результатам испытаний их составных частей // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – №1. – 6 с.