|  |  |
| --- | --- |
| *voenmeh* | МИНОБРНАУКИ РОССИИ  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  высшего образования  **«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  **(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)** |
| БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-02 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | Е |  | Оружие и системы вооружения |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | Е7 |  | Механика деформируемого твердого тела |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Математические методы в механике-4 | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Прочностной расчет и модальный анализ |
| мостовой фермы |
| методом конечных элементов |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы: | | | |  | Е7М41 |
| Смаль Т.С. | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ:** | | | | | |
| Павлов А.С. | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2018г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

РЕФЕРАТ

Рисунков – 22;

Использованных источников – 10;

НАПРЯЖЕНИЯ, АНАЛИЗ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАСЧЕТ, НАГРУЗКА

В данной работе объектом исследования является конструкция: мостовая ферма.

Цель работы – Описание метода конечных элементов, описание видов и конструкций ферм, проведение прочного расчета мостовой фермы, модальный анализ кострукции.

В работе приведены результаты анализа прочности конструкции с помощью пакета программ ANSYS, определение собственных частот конструкции с использованием модулей и Static Structural и Modal программы ANSYS Workbench.

Оглавление

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc535380128)

[1. Классификация ферм. 5](#_Toc535380129)

[2. Построение модели 10](#_Toc535380130)

[3. Закрепления и прикладываемая нагрузка 12](#_Toc535380131)

[4. Прочностной расчет 13](#_Toc535380132)

[5. Модальный анализ конструкции 18](#_Toc535380133)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 22](#_Toc535380134)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 24](#_Toc535380135)

## ВВЕДЕНИЕ

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет чис­ленно решать широкий спектр физических проблем, которые ма­тематически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. Этот метод можно ис­пользовать для анализа напряжённо деформированного состояния конструкций, для термического анализа, для решения гидро- газодинамических задач и задач электродинамики. Могут решаться и связанные задачи.

Историческими предшественниками МКЭ были различные мето­ды строительной механики и механики деформируемого твёрдого те­ла, использующие дискретизацию, в частности, метод сил и метод перемещений. Основные идеи и процедуры МКЭ впервые были использованы Курантом в 1943 г. при решении задачи о круче­нии стержня. Но только с 50-х годов началось активное практическое применение МКЭ, сначала в области авиации и космонавтики, а затем и в других направлениях. Термин «конечные элементы» (КЭ) ввёл в 1960 году Клаф. Развитию этого метода способствовало совер­шенствование цифровых электронных вычислительных машин.

Область применения МКЭ значительно расширилась, когда для его обоснования стали применяться метода взвешенных невязок - Галеркина и наименьших квадратов. МКЭ превратился в уни­версальный способ решения дифференциальных уравнений.

 Главные достоинства МКЭ:

• исследуемые объекты могут иметь любую форму и различную физическую природу – твёрдые деформируемые тела, жидкости, газы, электромагнитные среды;

• конечные элементы могут иметь различную форму, в частности криволинейную, и различные размеры;

• возможность исследования однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных объектов с линейными и нелинейными свойствами;

• возможность решения как стационарных, так и нестационарных задач;

• возможность решения контактных задач;

• возможность моделирования любых граничных условий;

• вычислительный алгоритм, представленный в матричной форме, формально единообразен для различных физических задач и для задач различной размерности, что удобно для компьютерного программирования;

• на одной и той же сетке конечных элементов можно решать различные физические задачи, что облегчает анализ связанных задач;

• разрешающая система уравнений имеет экономичную разреженную симметричную ленточную матрицу жёсткости, что ускоряет вычислительный процесс на ЭВМ.

## Классификация ферм.

Фермой называют решетчатую конструкцию из стержней, соединенных между собой в узлах и образующих геометрически неизменяемую конструкцию.

Если нагрузка приложена в узлах, а оси элементов фермы пересекаются в одной точке (центре узла), то жесткость узлов несущественно влияет на работу конструкции и в большинстве случаев их можно рассматривать как шарнирные. Тогда все стержни фермы испытывают только осевые усилия (растяжение или сжатие). Благодаря этому металл в фермах используется более рационально, чем в балках, и они экономичнее балок по расходу материала, но более трудоемки в изготовлении, поскольку имеют большое число деталей. С увеличением перекрываемых пролетов и уменьшением нагрузки эффективность ферм по сравнению со сплошностенными балками растет.

Железобетонные фермы – это готовые решетчатые несущие конструкции, предназначенные для перекрытий широких пролетов. Железобетонные фермы являются основным составным элементом сооружения и могут выдерживать большие нагрузки на покрытия. Они отличаются высокой прочностью, морозостойкостью устойчивостью к образованию трещин и жесткостью.

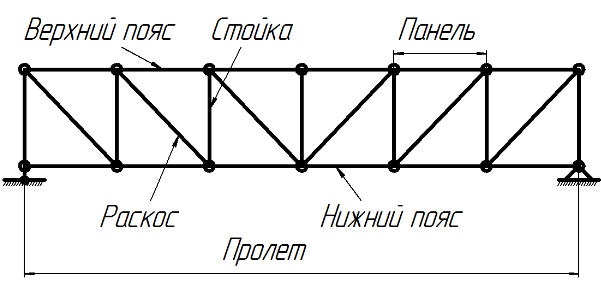


Рисунок 1 – Элементы фермы

С помощью железобетонных ферм можно перекрывать достаточно большие пролеты. Для балки из железобетона этот предельный рациональный пролет составляет примерно 18м, а для фермы он может достигать 48м при определенной конструкции. Это осуществимо потому, что материал у ферм сосредоточен только в верхнем и нижнем поясах, в стойках и раскосах, которые эти пояса соединяют. Поэтому все элементы решетки фермы работают только на сжатие и растяжение, т.е. материал используется полнее, чем у балки.

Минимальная высота ферм при современных высокопрочных материалах ограничивается не столько несущей способностью конструкции, сколько ее допускаемыми прогибами под максимальными нагрузками.

Железобетонные фермы обычно изготовляют сегментарной прямоугольной (рис. 2) или трапециевидной двускатной формы (рис. 3). Если длина фермы превышает 24м, тогда ее обычно проектируют из двух одинаковых частей, которые на строительстве соединяют в одно целое. В последнее время чаще применяют типовые сегментные безраскосные фермы (рис. 2). Вес данного типа железобетонных изделий может составлять от шести до пятидесяти тонн, это напрямую зависит от габаритов ферм и ее конструкционных особенностей.

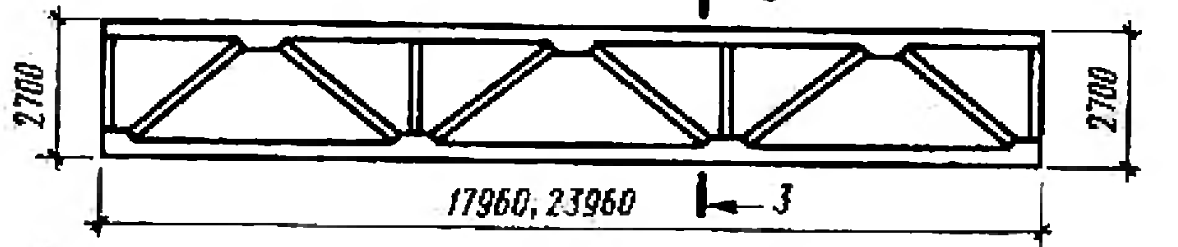


Рисунок 2 – Ферма сегментарной прямоугольной формы

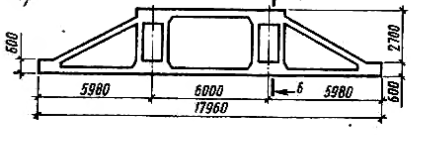


Рисунок 3 – Ферма трапециевидной двускатной формы

Стальные фермы обычно применяют при пролетах 12…18 м и выше. Их очертание может быть довольно разнообразным, также они обладают большой жесткостью в своей плоскости, но имеют совершенно недостаточную жесткость из этой плоскости, поэтому фермы должны быть надежно раскреплены в нормальных направлениях к их плоскостям.

Также, помимо стали, фермы могут быть выполнены из сплавов алюминия. Такие фермы имеют сравнительно небольшой вес, кроме того, такие сплавы обладают коррозионной стойкостью и при температурах ниже -50º не становятся хрупкими (это наибольший недостаток стальных конструкций при их применении на Севере). Но прочность алюминиевых сплавов в 2-3 раза ниже, чем у стали, а цена выше. Поэтому целесообразно их использование только при больших пролетах или в северных районах с низкими температурами.

Деревянные фермы из брусьев и досок применяют для пролетов в 15м. и более. Их наибольшей проблемой является подверженность гниению и пожароопасность. От этих явлений избавляются при помощи специальных пропиток, а также возможно покрыть их специальной штукатуркой.

Классификация мостовых ферм приведена на рисунке 4:

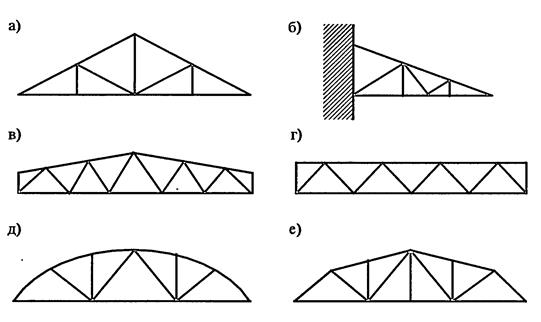


Рисунок 4 – Основные виды ферм

а,б – треугольные; в – трапецеидальные; г – с параллельными поясами;

д – арочные; е – полигональные.

Очертание поясов ферм в значительной степени определяет их экономичность. Теоретически наиболее экономичной по расходу стали является ферма, очерченная по эпюре моментов. Для однопролетной балочной системы с равномерно распределенной нагрузкой это будет сегментная (арочная) ферма с параболическим поясом (д). Однако криволинейное очертание пояса повышает трудоемкость изготовления.

Более приемлемым является полигональное очертание с переломом пояса в каждом узле (е). Оно достаточно близко соответствует параболическому очертанию эпюры моментов, не требует изготовления криволинейных элементов. Такие фермы иногда применяют для перекрытия больших пролетов и в мостах, т.е. в конструкциях, поставляемых на строительную площадку "россыпью" (из отдельных элементов).

Фермы трапецеидального очертания (в), хотя и не совсем соответствуют эпюре моментов, имеют конструктивные преимущества, прежде всего за счет упрощения узлов. Кроме того, применение таких ферм в покрытии позволяет устроить жесткий рамный узел, что повышает жесткость каркаса.

Фермы с параллельными поясами (г) по своему очертанию далеки от эпюры моментов, однако равные длины элементов решетки, одинаковая схема узлов, наибольшая повторяемость элементов и деталей и возможность их унификации способствует индустриализации их изготовления. Благодаря этим преимуществам фермы с параллельными поясами стали преобладающими.

Фермы треугольного очертания (а, б) рациональны для консольных систем, а также для балочных систем при сосредоточенной нагрузке в середине пролета.

## 2. Построение модели

Модель представляет собой мостовую ферму с параллельными поясами, ее габариты и 3D изображение представлены на рисунках 5 и 6.

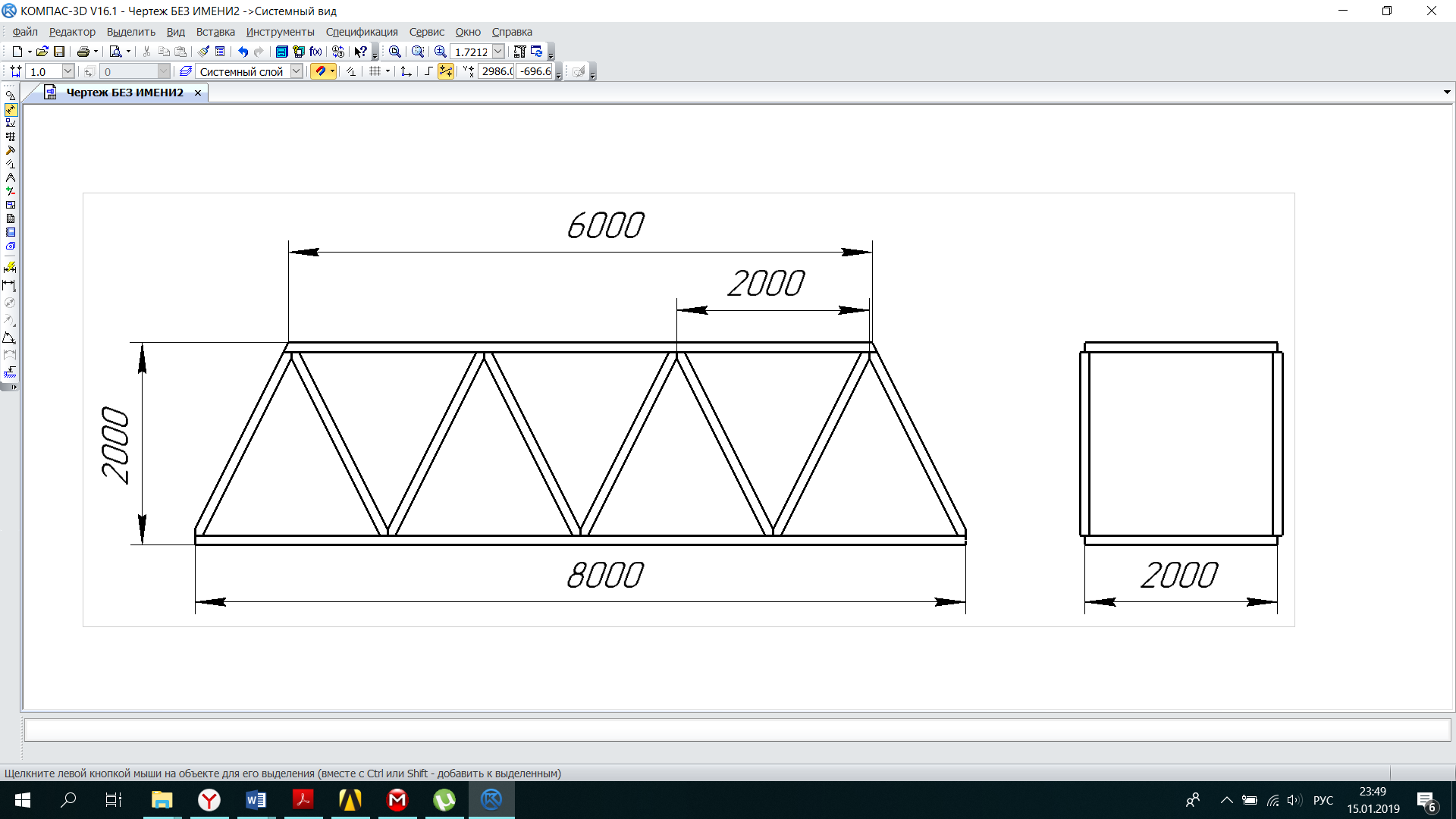


Рисунок 5 – Габариты мостовой фермы

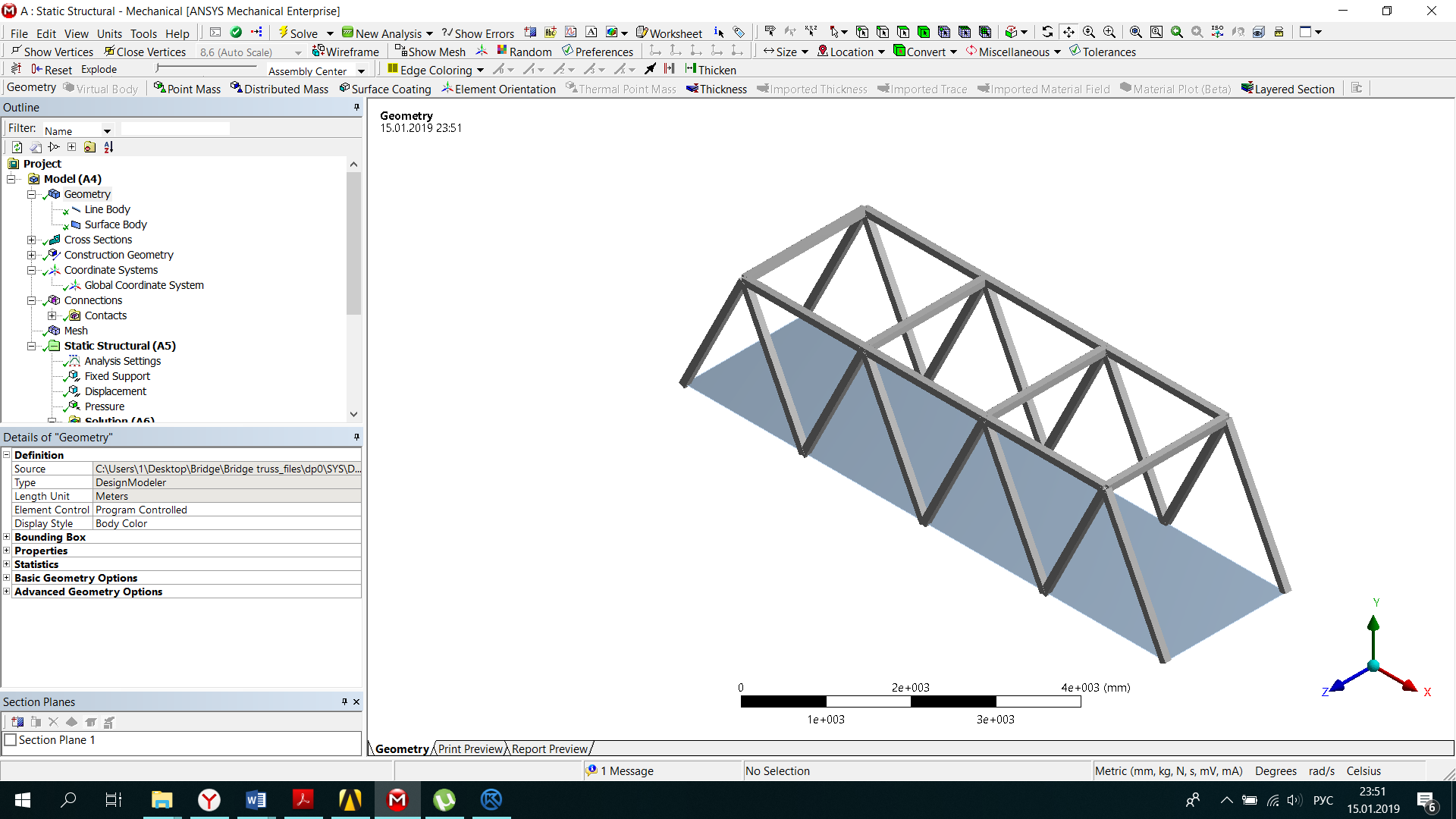


Рисунок 6 – 3D изображение мостовой фермы

В основании мостовой фермы лежит стальная пластина толщиной 100 мм. Пояса и стойки изготовлены из стальных квадратных труб, которые имеют наружный размер 100х100 мм и толщину стенки 9 мм согласно ГОСТ 8639-82. В качестве материала выбрана конструкционная сталь 09Г2С ГОСТ 19281-2014, которая имеет следующие характеристики:

* Предел текучести 355 Мпа
* Предел прочности: 490 Мпа
* Модуль упругости: 2,1 Гпа
* Коэффициент Пуассона: 0,3

Сетка конечно-элементной модели представлена на рисунке 7

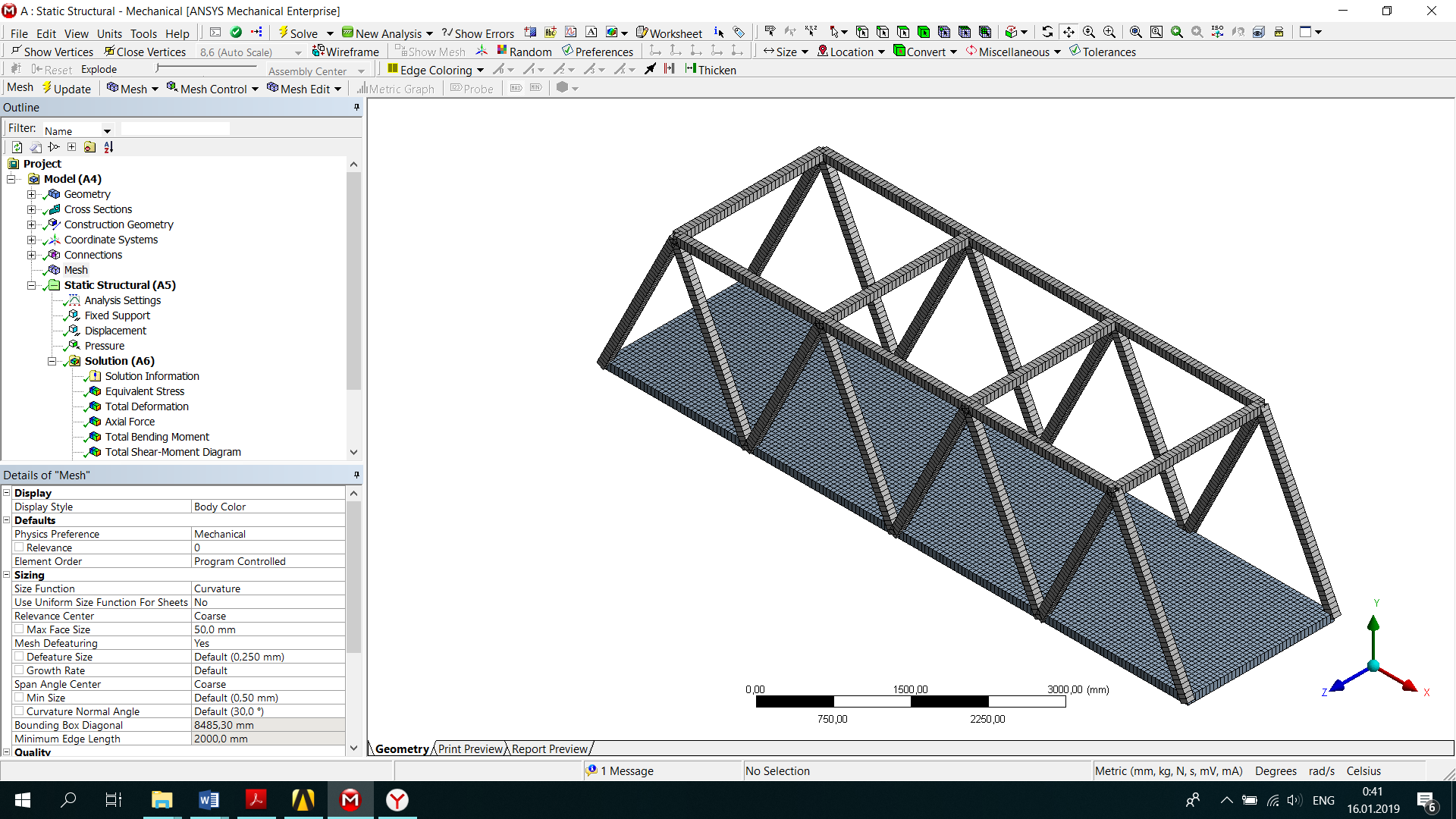


Рисунок 7 – Сетка конечных элементов модели

## 3. Закрепления и прикладываемая нагрузка

Закрепление модели производилось по двум крайним граням нижней поверхности, для имитации воздействия давления на нижнюю поверхность задана нагрузка P = 0,2 МПа. Расчетная схема изображена на рисунке 8.

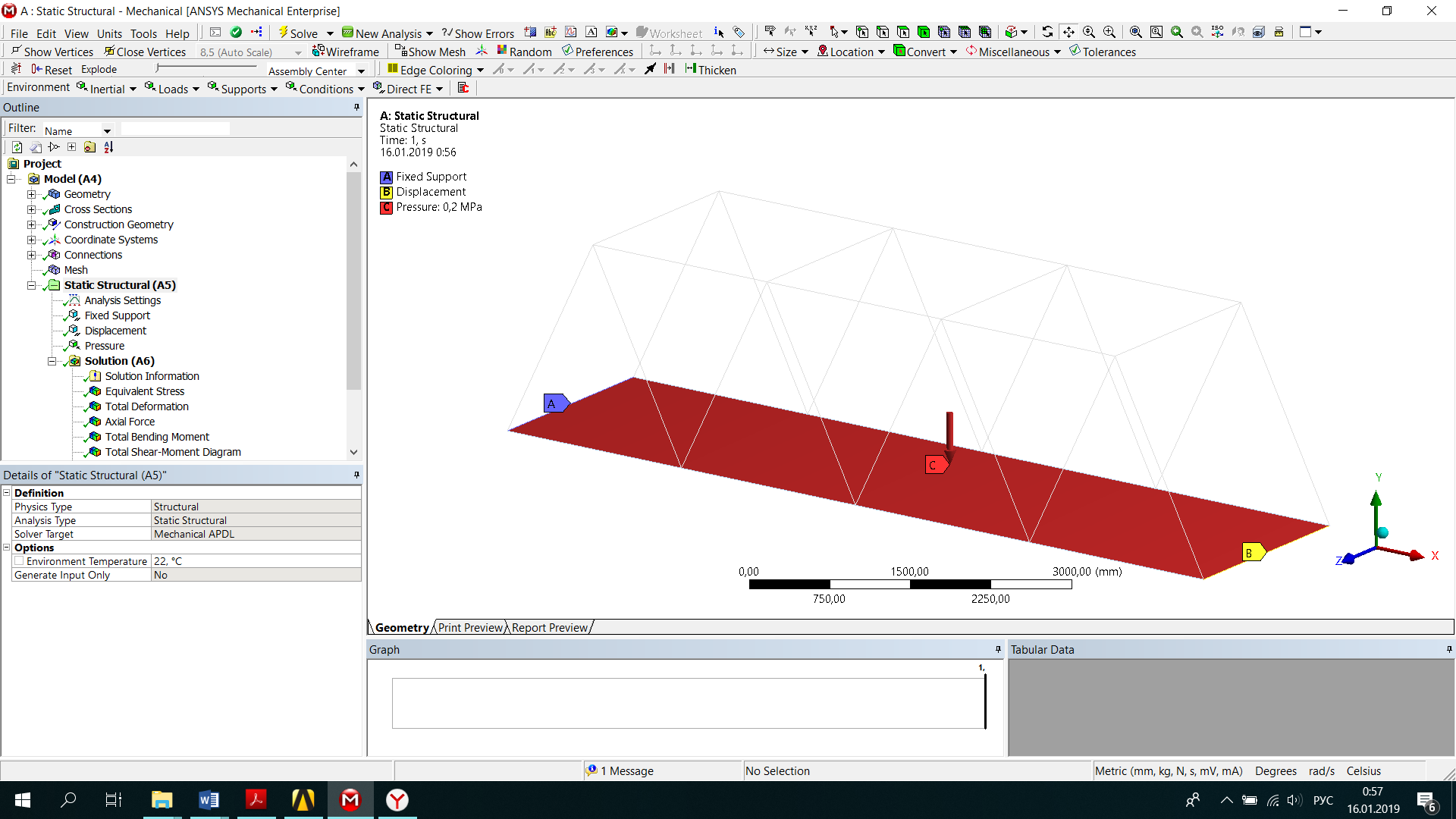


Рисунок 8 – Расчетная схема мостовой фермы

## 4. Прочностной расчет

Сначала определим эквивалентные напряжения в поверхности мостовой фермы (напряжения по Мизесу). Наибольшие напряжения сконцентрированы в углу нижней поверхности, поэтому данная область требует более детального рассмотрения.

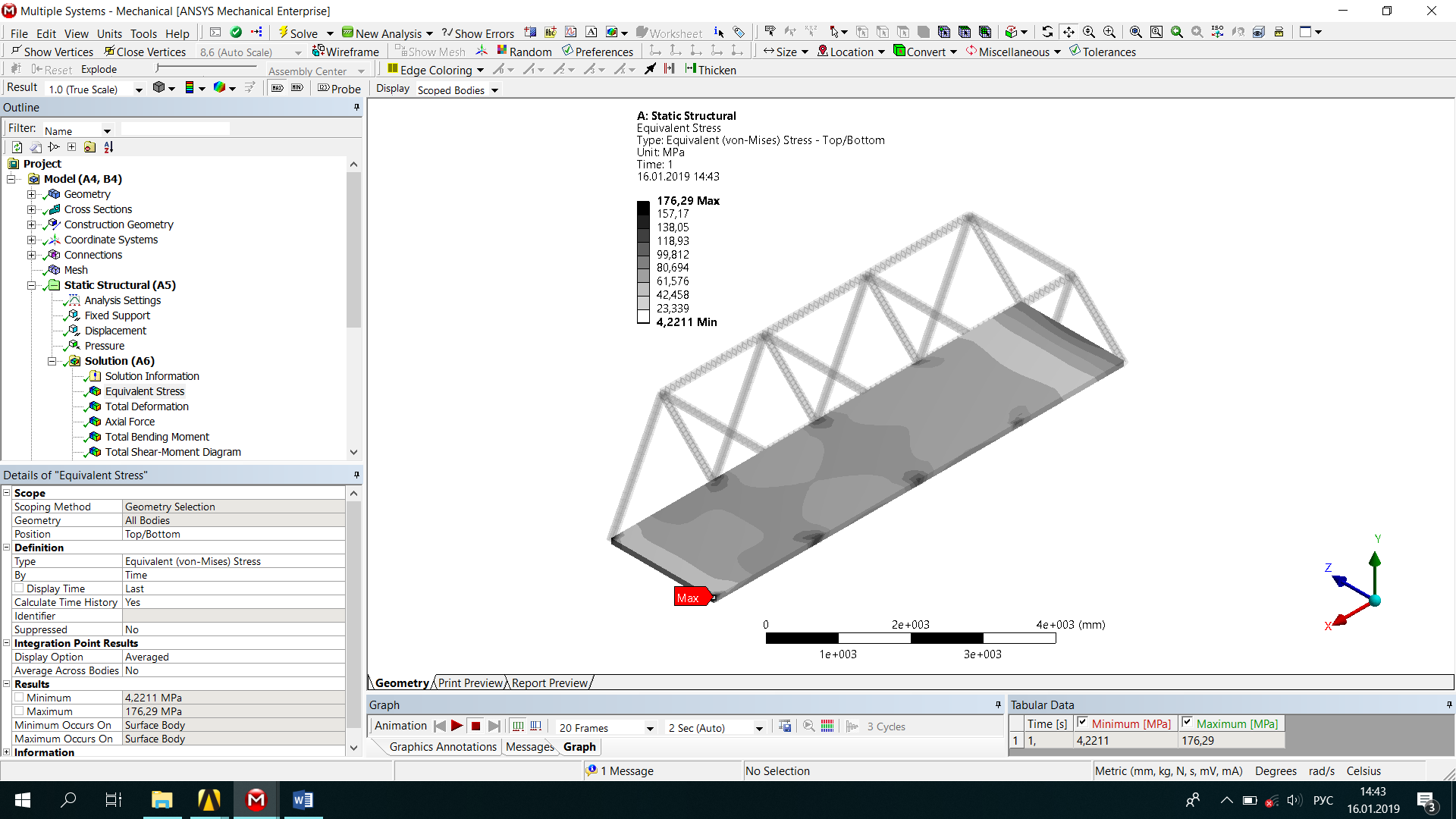


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу, МПа

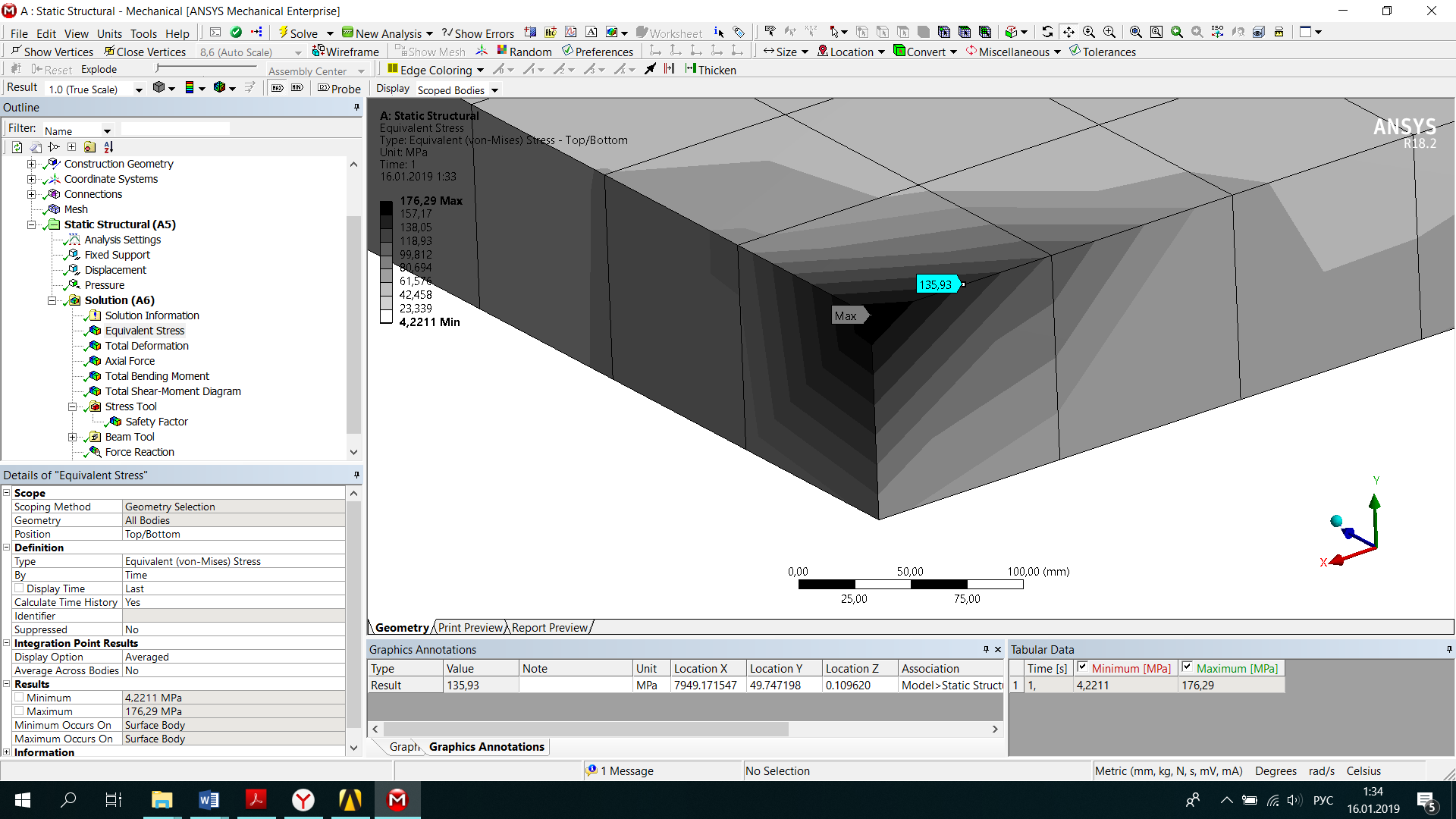


Рисунок 10 – Поэлементное распределение напряжений, МПа

Исходя из рисунка 10, данное напряжение можно считать вычислительным концентратором (является вычислительной погрешностью), поскольку среднее напряжение по элементам не превышает 136 МПа. Исходя из этого при нахождении коэффициента запаса будут учитываться максимальные напряжения согласно элементному анализу модели, а не среднему.

Эквивалентные напряжения по энергетической теории фон Мизесса на нижней поверхности достигают 107 МПа, а в концентраторах 176 МПа. Предел текучести (265 Н/мм2), а предел прочности (430 Н/мм2). В расчет принимается максимальное поэлементное значение в 136 МПа.

Допускаемое напряжение: [σ]=σТ ∙ 0,8=265 ∙ 0,8=212 МПа.

Вычислим коэффициент запаса прочности:

Сравним напряжения в концентраторах с пределом прочности: 136<430 – расчет удовлетворяет условиям прочности.

Расчет показал, что поверхность мостовой фермы способна выдержать заданные параметры нагружения давлением в 0,2 МПа с коэффициентом запаса прочности 𝑛=1,56.

Выполним расчет суммарных перемещений:

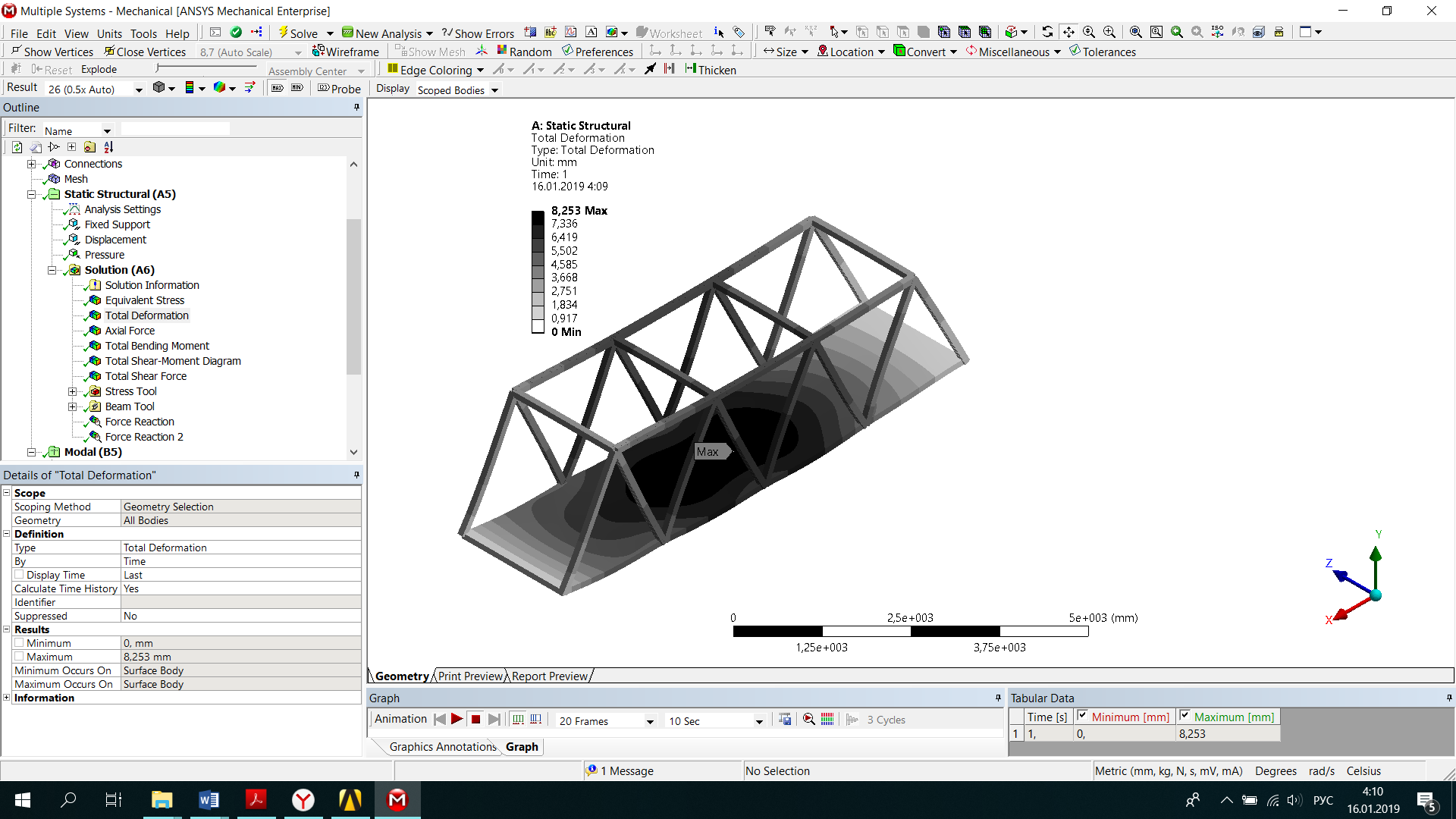


Рисунок 11 – Распределение суммарных перемещений

Расчет, приведенный на рисунке 11, показал, что наибольшие суммарные перемещения возникают в центре нижней поверхности и составляют ≈ 8,3 мм.

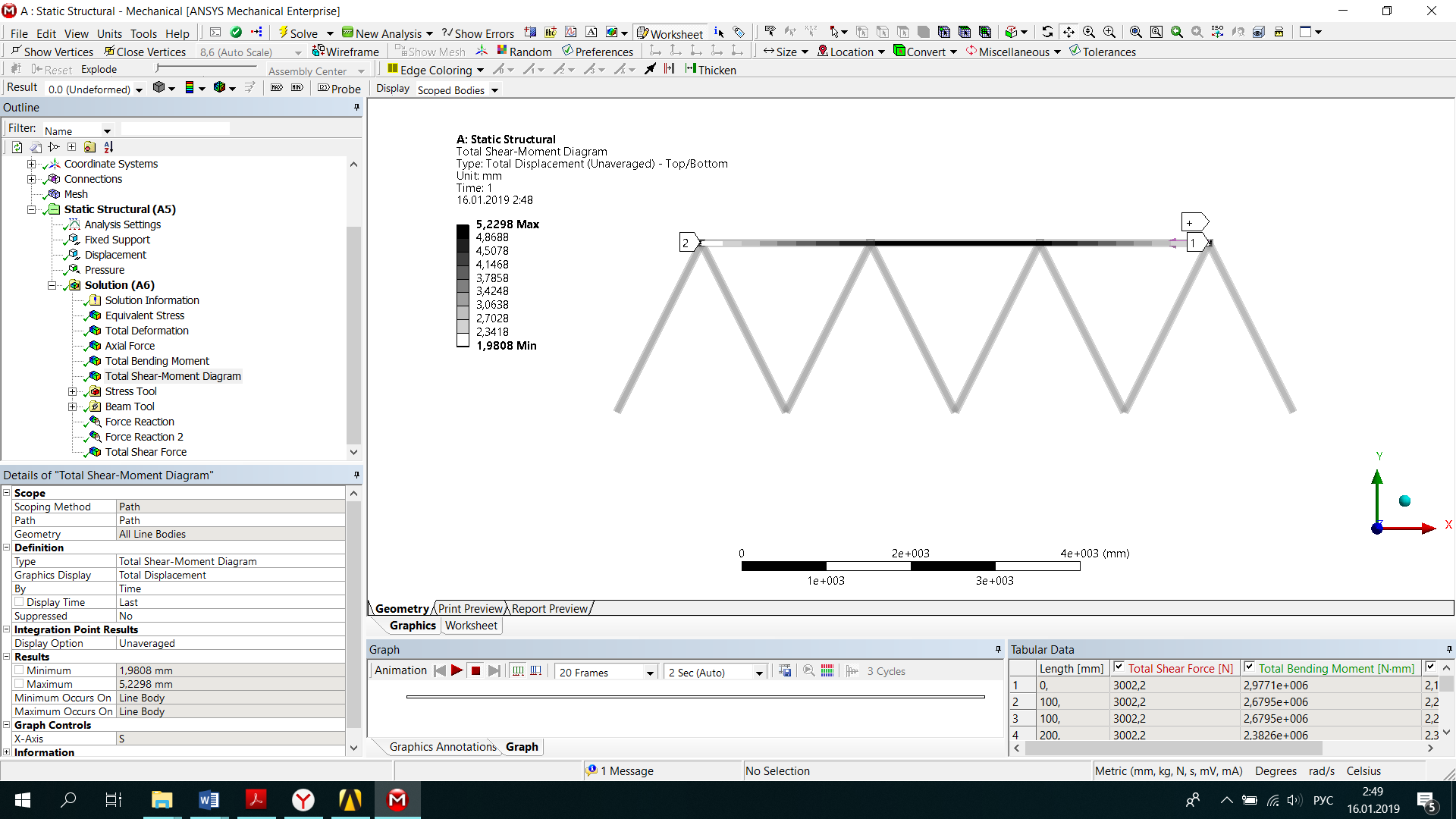
Выполним расчет поперечной силы, изгибающего момента и сдвига, возникающих в верхнем поясе мостовой фермы, изображенном на рисунке 12.

Рисунок 12 – Верхний пояс фермы

В ходе расчета были построены следующие эпюры, представленные на рисунках 13-15:

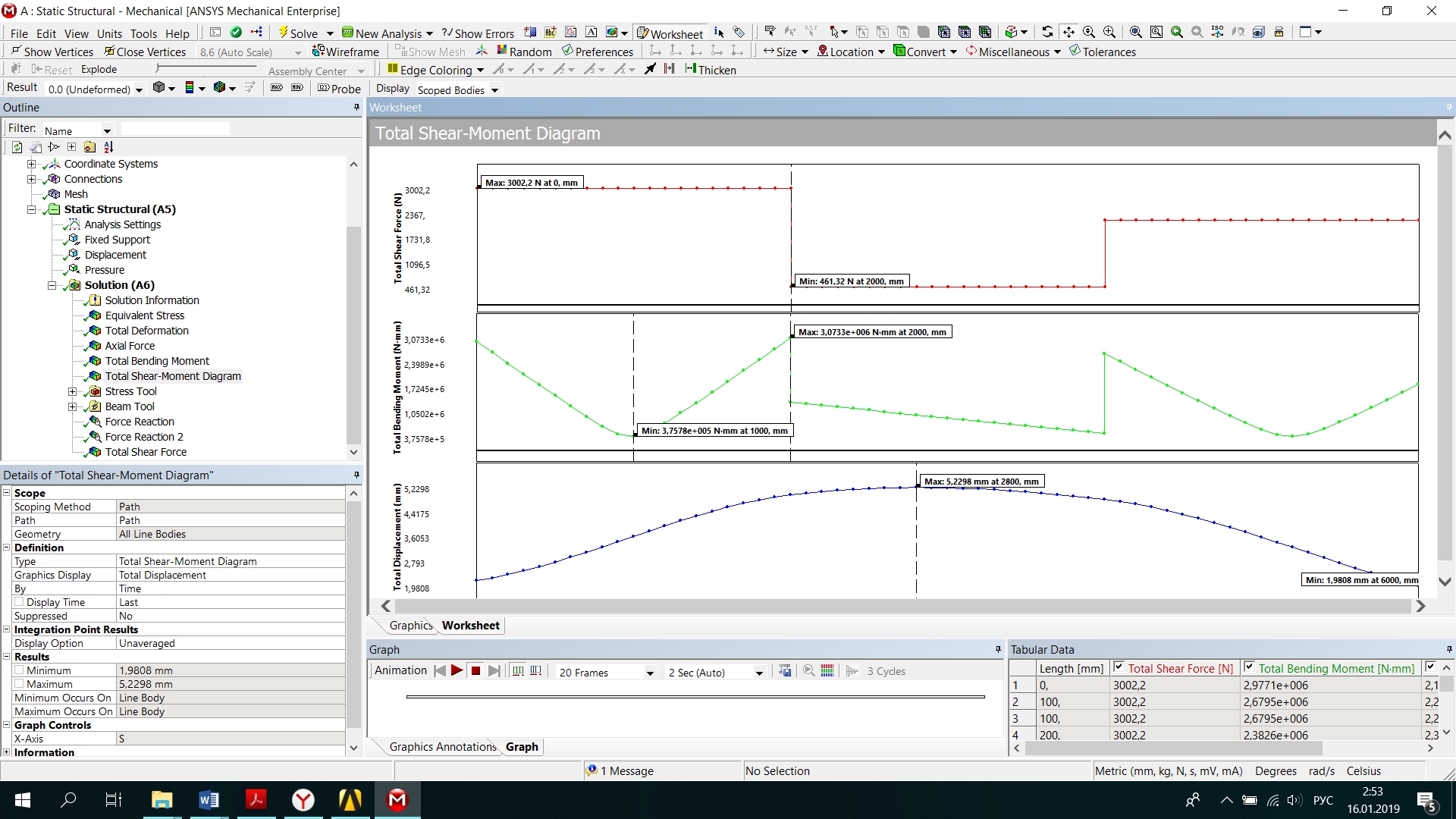


Рисунок 13 – Поперечная сила

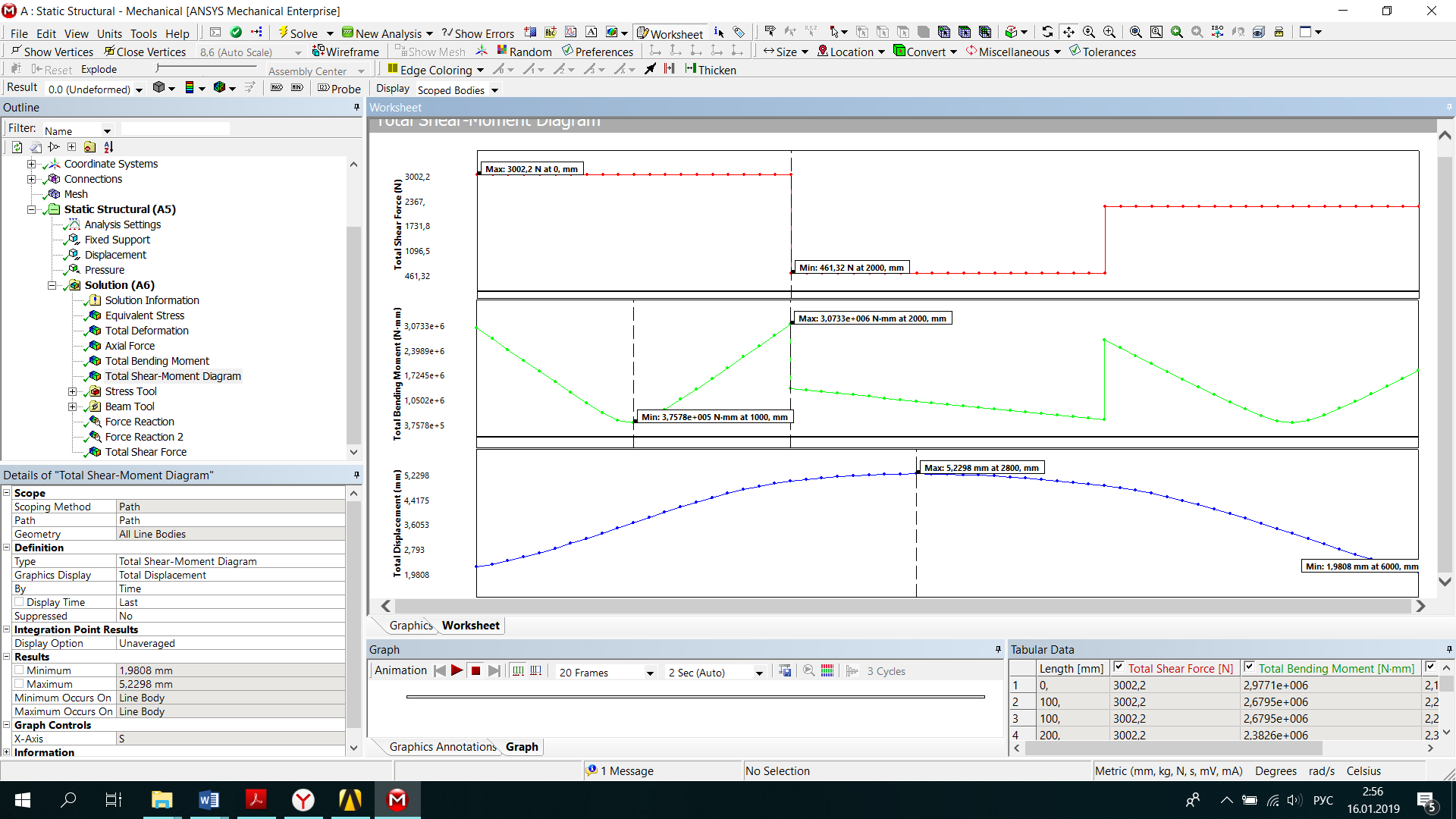


Рисунок 14 – Изгибающий момент

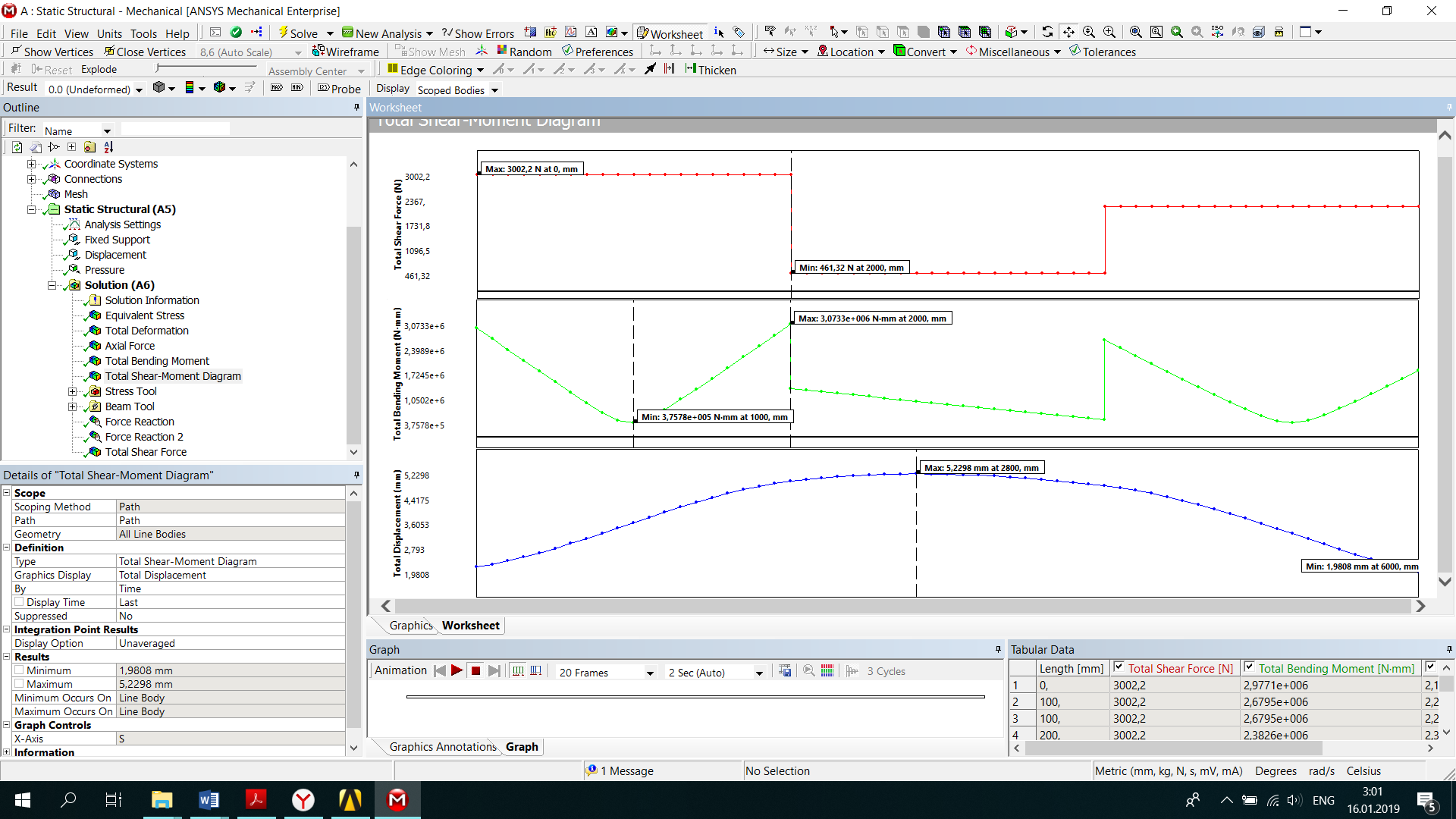


Рисунок 15 – Сдвиг

Выполним расчет коэффициента запаса прочности:

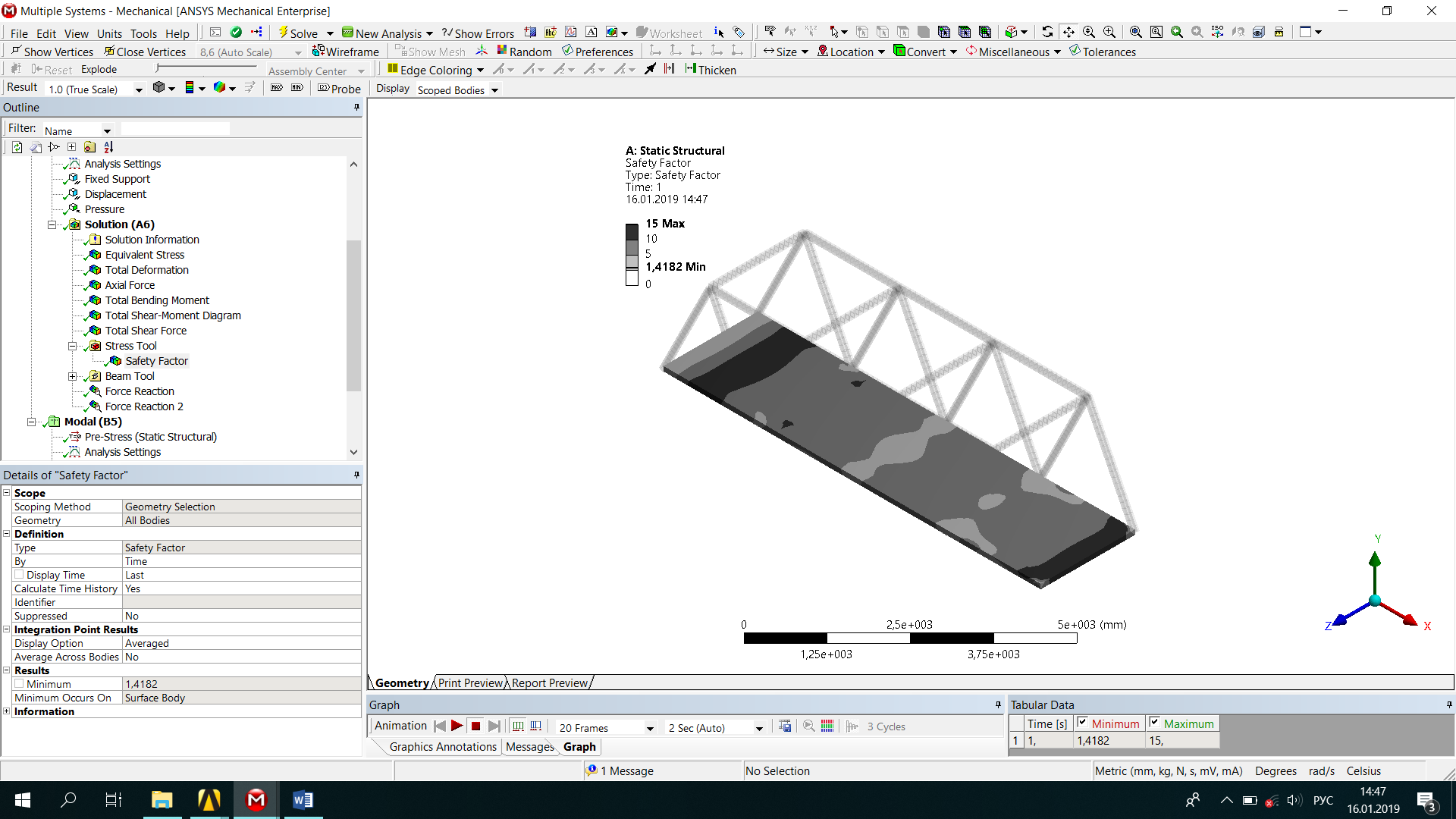


Рисунок 16 – Коэффициент запаса прочности

Расчет, приведенный на рисунке 16, показал, что коэффициент запаса прочности конструкции составляет ≈ 1,42.

## 5. Модальный анализ конструкции

Необходимость в расчете собственных частот и соответствующих им форм колебаний нередко возникает при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Наиболее распространена ситуация, когда при проектировании требуется убедиться в малой вероятности возникновения в условиях эксплуатации такого механического явления, как резонанс. Как известно, суть резонанса заключается в значительном (в десятки раз и более) усилении амплитуд вынужденных колебаний на определенных частотах внешних воздействий — так называемых резонансных частотах. В большинстве случаев возникновение резонанса является крайне нежелательным в плане обеспечения надежности изделия явлением. Многократное увеличение амплитуд колебаний при резонансе и вызываемые этим высокие уровни напряжений — одна из основных причин выхода из строя изделий, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок. Для защиты от резонансных воздействий можно использовать различные механические устройства, которые принципиально меняют спектральные характеристики конструкции и поглощают энергию колебаний (демпфирующий эффект может оказывать, например, виброизолятор).

Для анализа использовались те же закрепления, что и в предыдущем расчете. Известно, что почти вся энергия механических колебаний аккумулируется на нескольких нижних гармониках изделия, поэтому при частотном анализе в первую очередь представляют интерес первые три - пять наименьших собственных частот. Результатом анализа являются собственные частоты модели.

На рисунке 17 представлены частоты собственных колебаний мостовой фермы, полученные в ходе расчета:

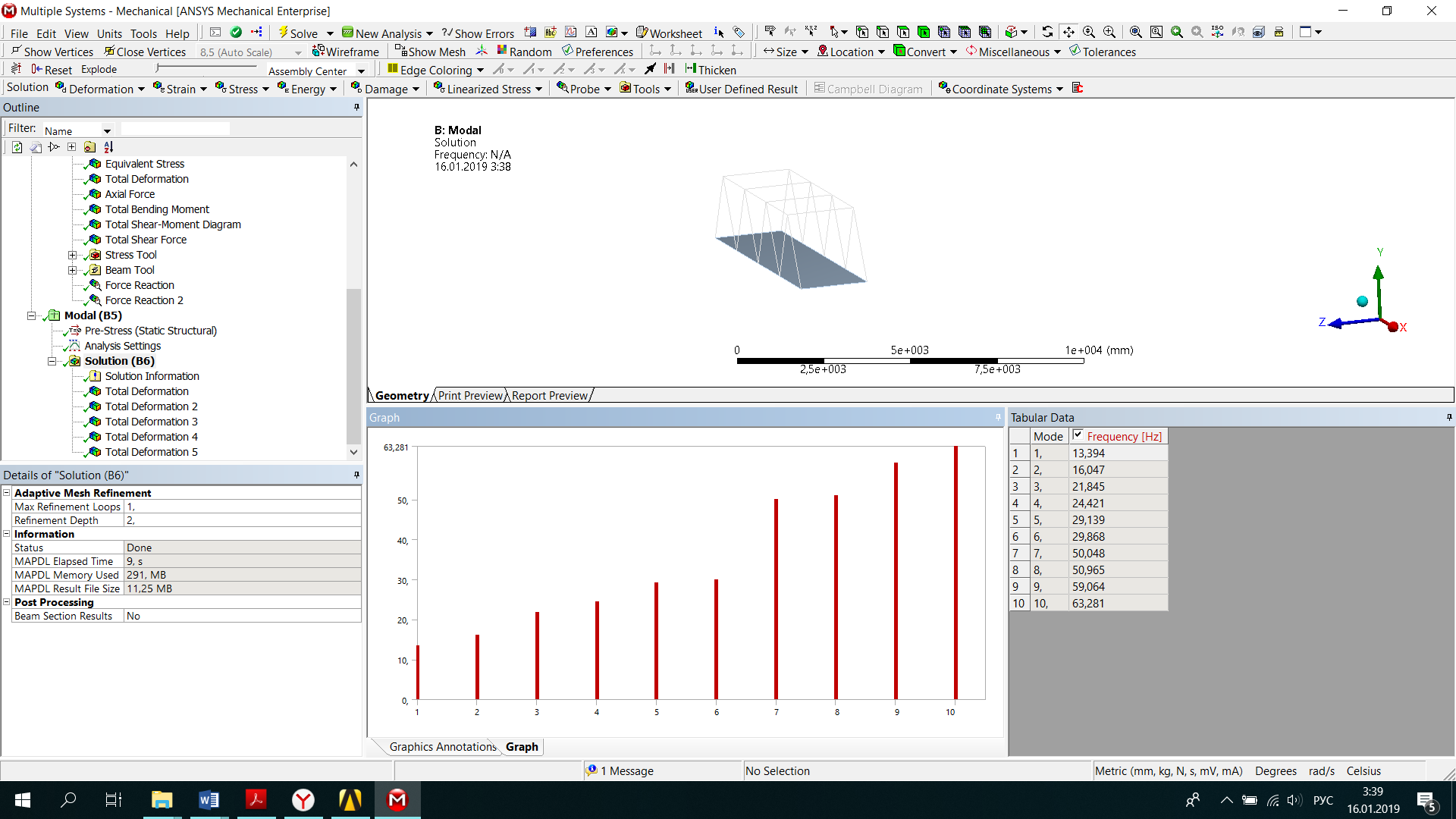
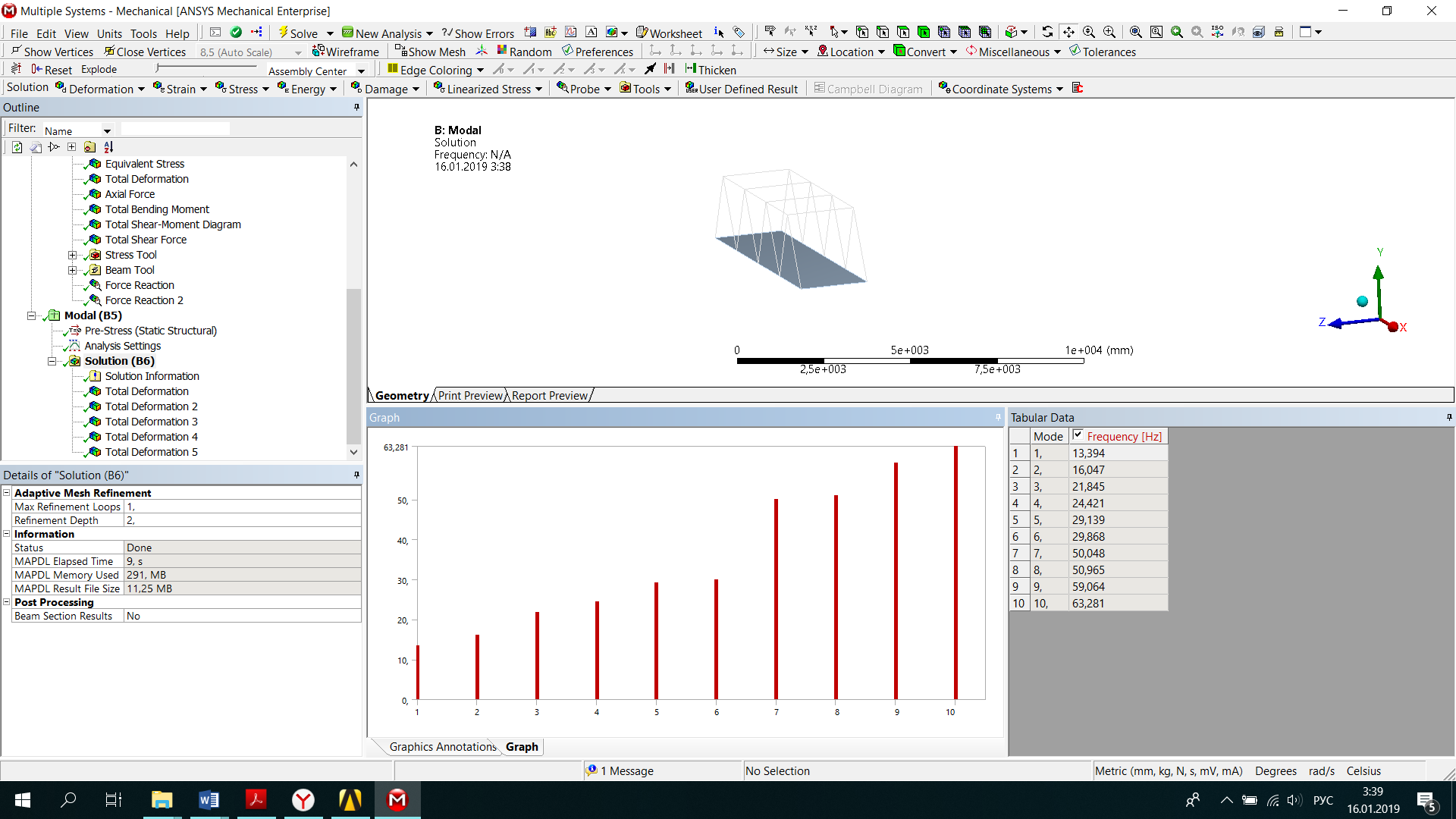
 

Рисунок 17 – Собственные частоты

На рисунках 18-22 наглядно представлены пять наиболее значимых собственных колебаний, частоты которых представлены выше.

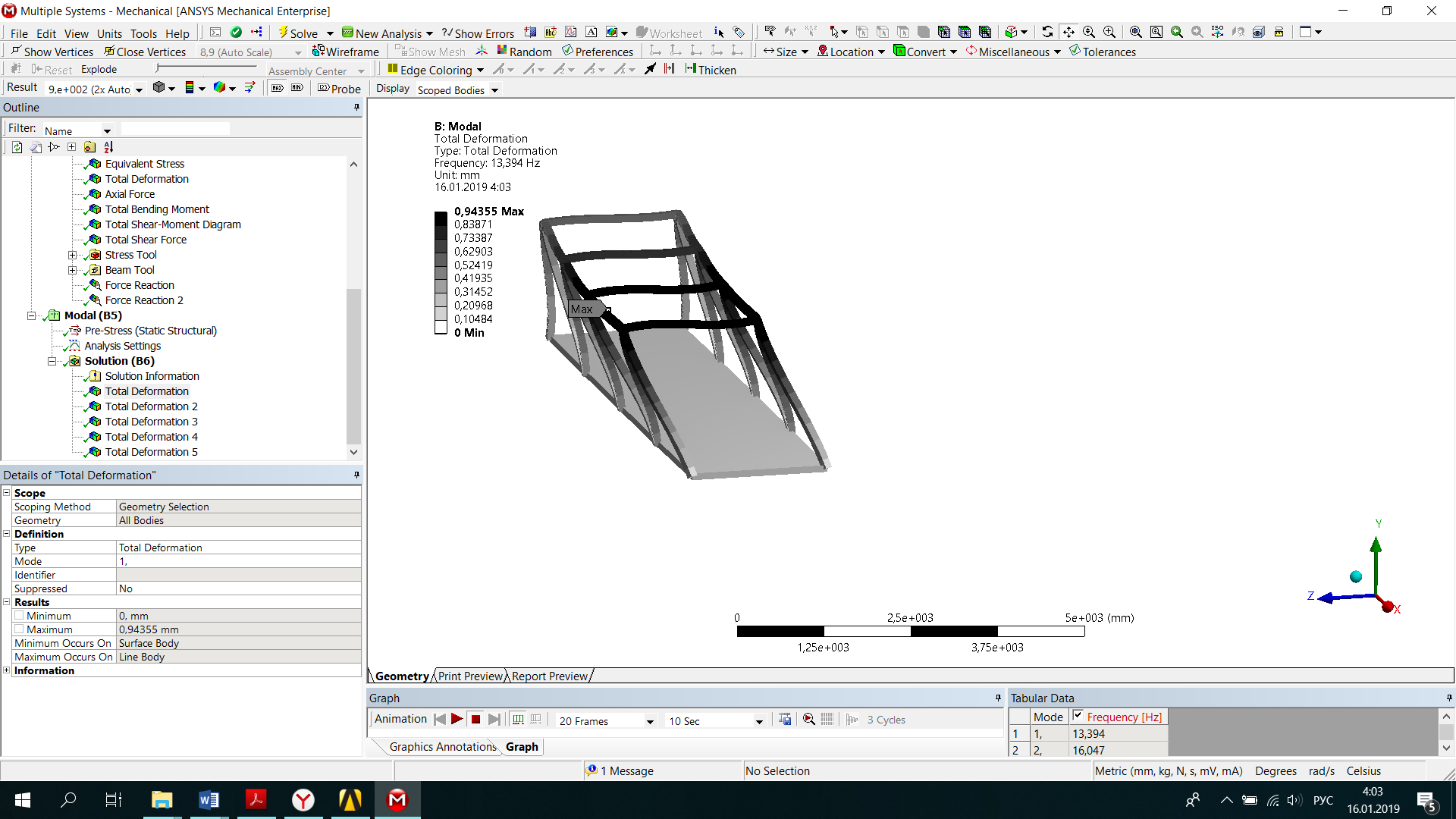


Рисунок 18 – Форма колебаний на частоте 13,394 Гц

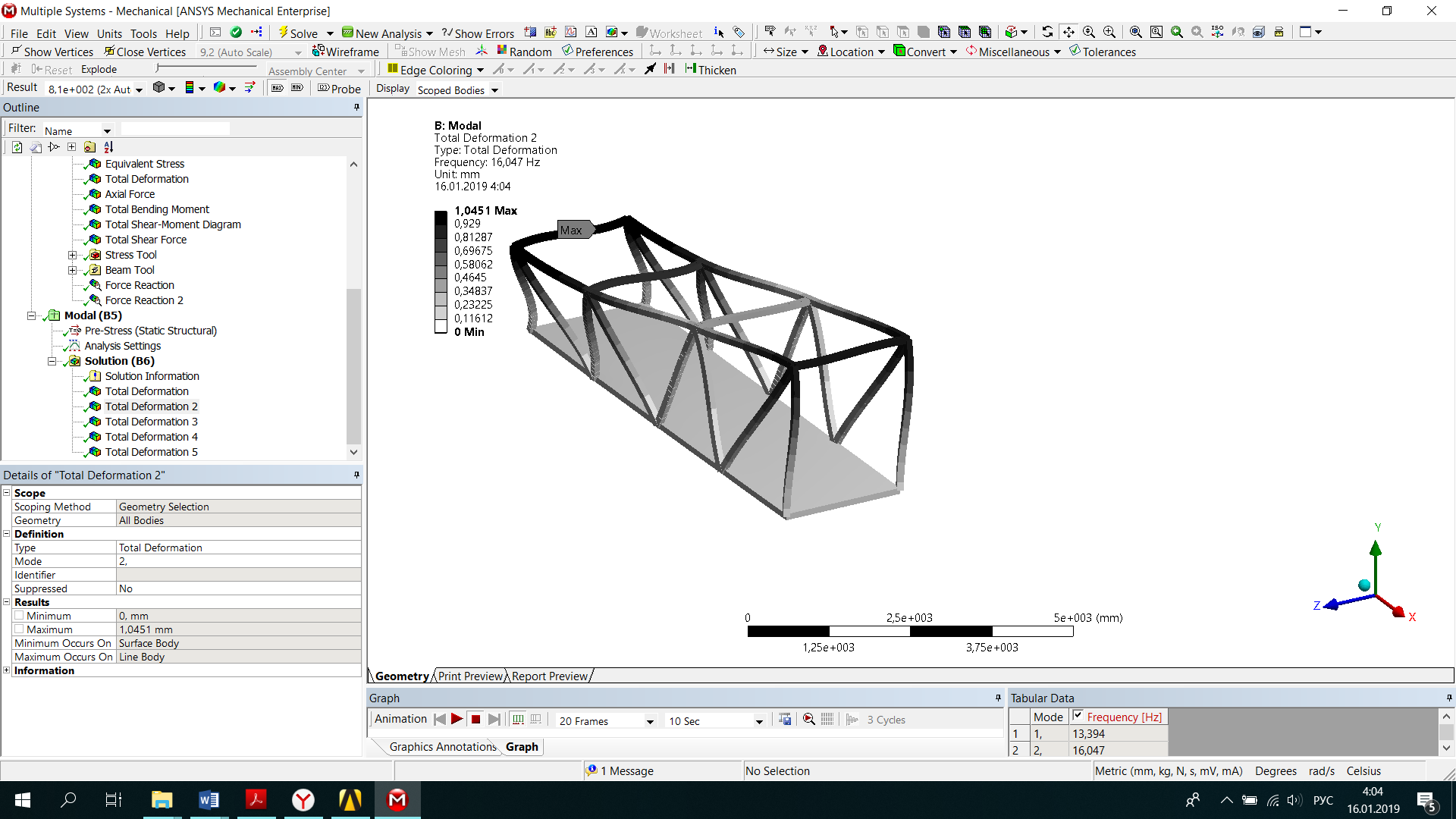


Рисунок 19 – Форма колебаний на частоте 16,047 Гц

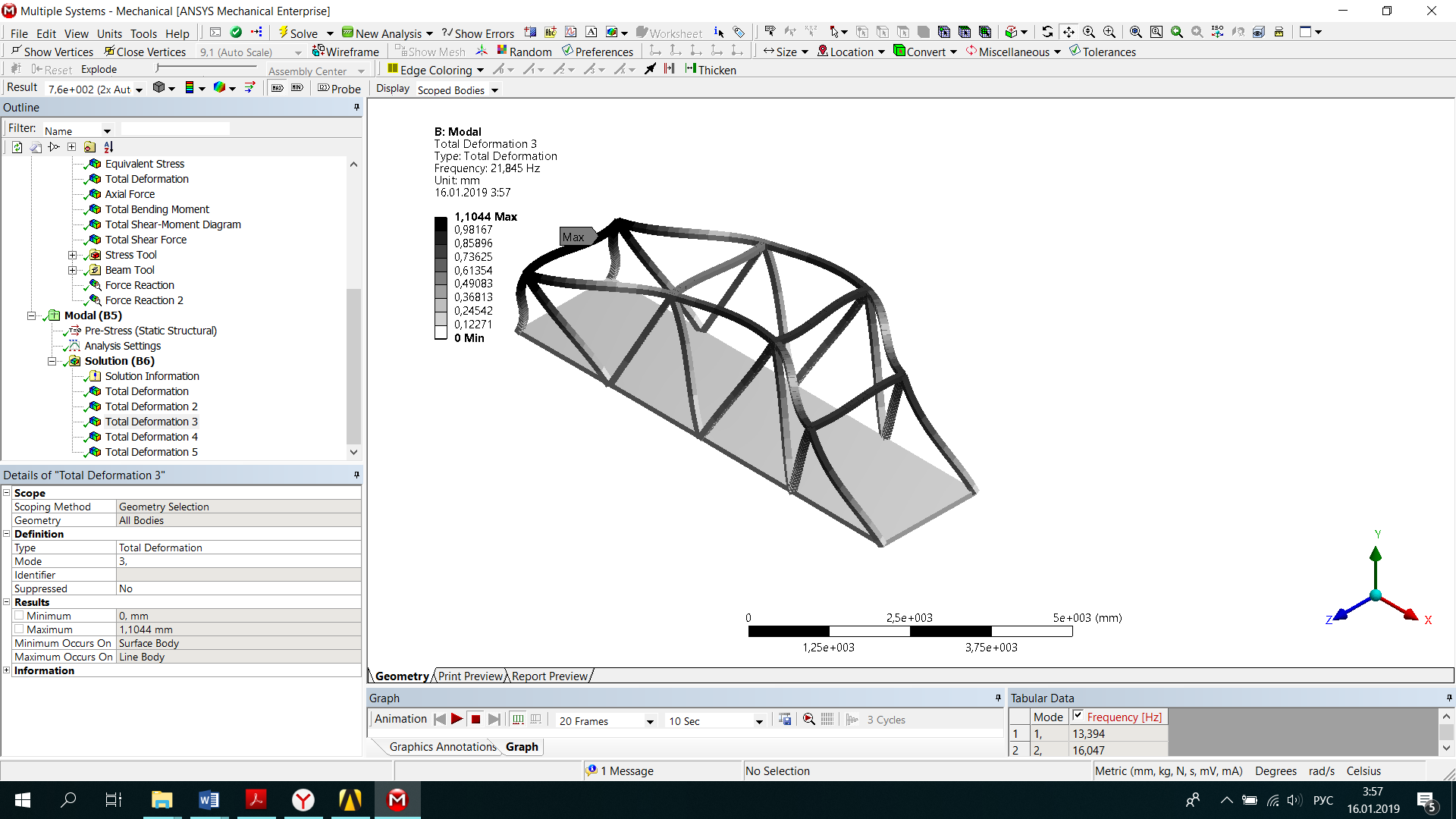


Рисунок 20 – Форма колебаний на частоте 21,845 Гц

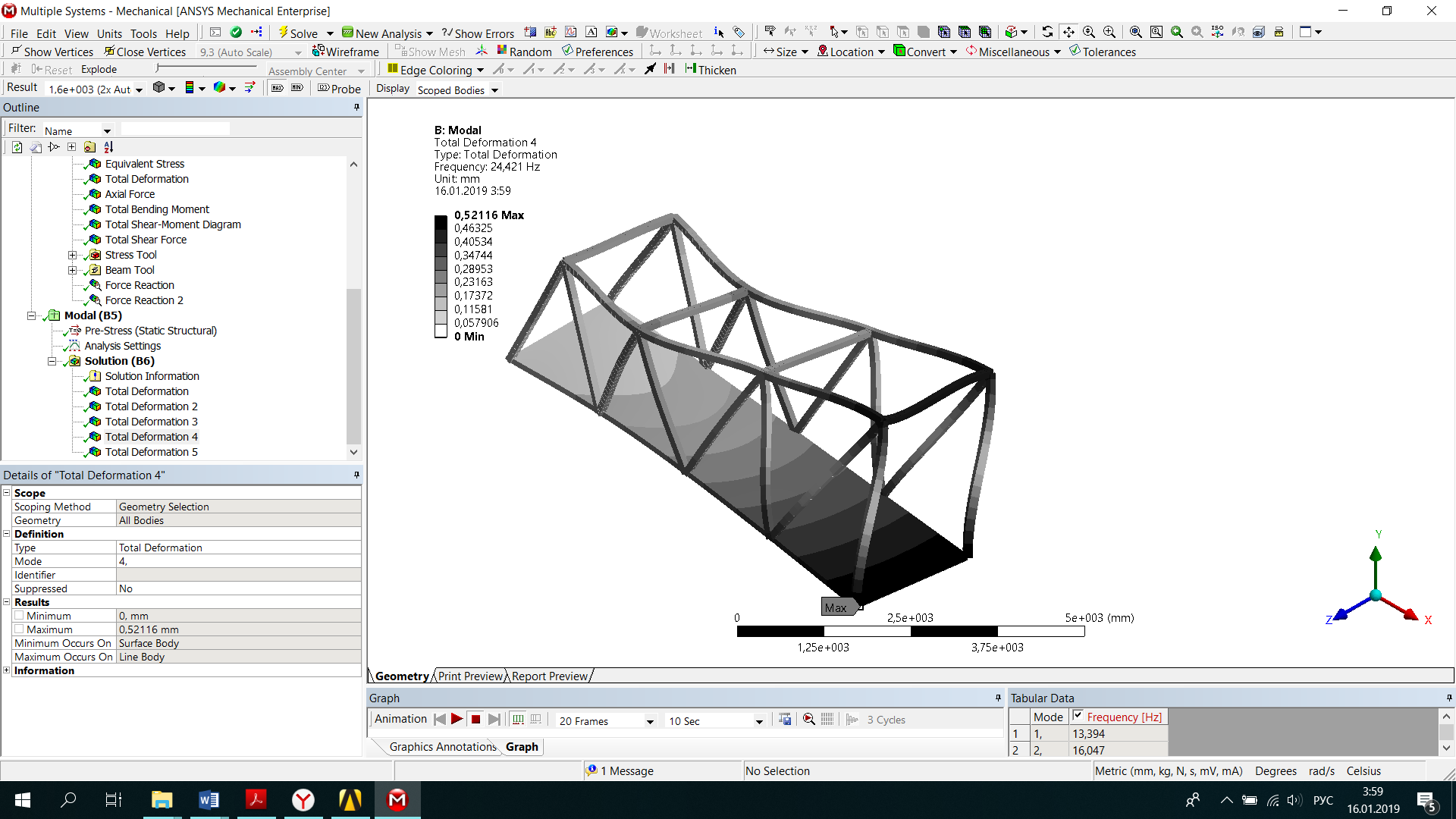


Рисунок 21 – Форма колебаний на частоте 24,421 Гц

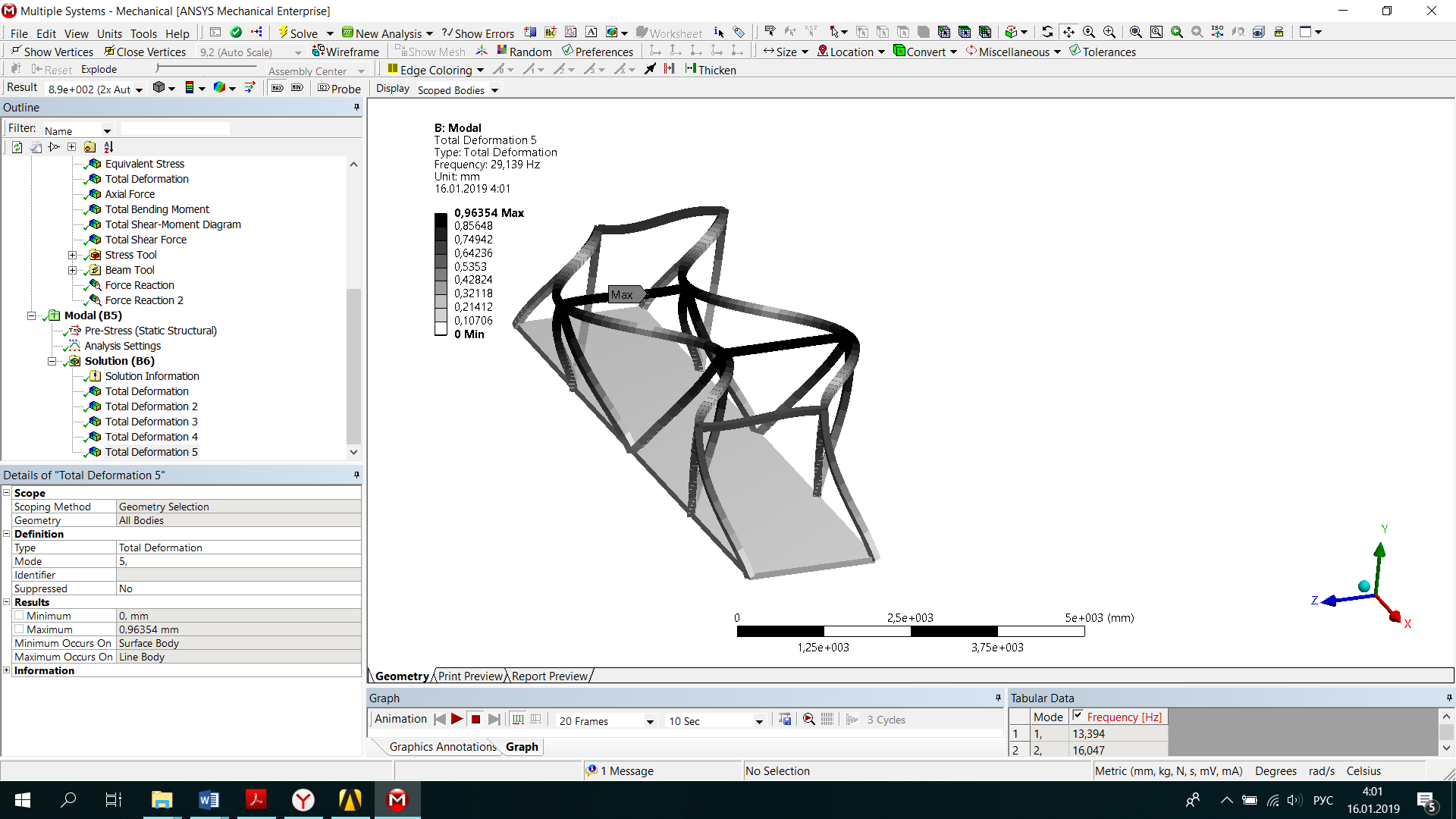


Рисунок 22 – Форма колебаний на частоте 29,139 Гц

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы автоматизированного проектирования успешно внедрены в самые различные отрасли промышленности и продолжают активно развиваться. В настоящее время ни одно предприятие не обходиться без систем автоматизированного проектирования. Вектор развития программных средств направлен на то, чтобы внедрять такие системы на всех стадиях жизненного цикла изделия, от анализа рынка до утилизации. В связи с тем, что данные программы являются часть информационных технологий, их развитие происходит стремительно. Современному инженеру нужно идти в ногу со временем и уметь использовать текущие программные средства, а также быть готовым к изучению новых, будущих систем.

Программный комплекс ANSYS позволяет решать большой спектр задач методом конечных элементов с применением ЭВМ. Интерфейс программы позволяет наглядно представлять полученный результат, и с опорой на полученные данные принимать решения по дальнейшему проектированию деталей и узлов системы. Возможность быстрого изменения нагрузки или других параметров позволяет посмотреть какое влияние они оказывают на конечный результат, и таким образом найти оптимальный вариант решения поставленной задачи.

Время, потраченное на выполнение произведенных расчётов несравнимо меньше, чем было бы затрачено при аналитическом расчёте. Выигранное время в процессе реальных разработок должно быть потрачено на проведение дальнейших экспериментов, построение моделей и изготовления опытных образцов. Это вытекает из того, что любые расчёты можно назвать предположением и они безусловно подтверждаться реальными опытами и экспериментами. Это связано с тем, что любой человек может ошибаться и получать результаты, отличные от реальных, даже использую точные вычислительные машины.

В ходе работы был выполнен прочностной расчет мостовой фермы. На основании расчетов можно сделать вывод о том, что мостовая ферма удовлетворяет условиям прочности. Коэффициенты запаса прочности, рассчитанные “вручную” (*n=*1,56) и в программе ANSYS Workbench (*n=*1,42) можно считать сопоставимыми. С целью повышения прочности конструкции можно применить очертание фермы, соответствующее параболическому очертанию эпюры моментов (например, арочное или полигональное), а также использовать стойки совместно с раскосами.

В результате модального анализа были выявлены пять наиболее опасных частот собственных колебаний конструкции. По результатам данного анализа можно сделать вывод о том, что при низкочатотных резонансах возникают критические для данной конструкции напряжения, следовательно нельзя допускать воздействия таких частот на рассматривоемую конструкцию.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Н.Н., Основы работы в ANSYS 17. / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
2. Павлов А.С., Решение задач механики деформируемого твёрдого тела в программе ANSYS: практикум / А.С. Павлов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – 34с.
3. Бруяка BA., Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб, пособ. / В. А. Бруяка. ВТ. Фокин. Е.А. Солдусова, НА. Глазунова. И.Е. Адеянов. - Самара: Самар, гос. техн. ун-т, 2010. - 271 с.: ил.
4. Шерешевский И.А., Конструирование промышленных зданий и сооружений. Учеб. пособие для студентов строительных специальностей. «Архитектура-С», 2005. 168 с, ил.
5. Протасов К. Г., Схемы ферм и поперечные сечения их элементов. [«Металлические мосты», Изд-во «Транспорт», 1973](http://www.arhplan.ru/source/115).
6. Ферма в строительстве [Электронный ресурс] <https://stroyvolga.ru/ферма-в-строительстве/> (дата обращения: 16.12.2018).
7. Бояршинов С.В., Основы строительной механики машин. Учебное пособие для студентов вузов. Изд-во «Машиностроение», 1973.
8. ГОСТ 19281-2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.
9. ГОСТ 8639-82 Трубы стальные квадратные. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2006.
10. ANSYS Help.