

Л. П. Вовк, д-р техн. наук, М. С. Яворенко

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И РАСЧЕТЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Разработан конечно-элементный алгоритм определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний проушины и эквивалентных напряжений, возникающих возле отверстия, путем проведения модального анализа в ANSYS. Данный подход позволил получить достаточно точное распределение напряжений в области возможного разрушения проушин и поэтому представляет интерес для анализа.

Ключевые слова: собственные частоты, напряженно-деформированное состояние, локальная концентрация напряжений, проушина, моделирование, конечно-элементная сетка

Постановка проблемы

В настоящее время IT-технологии не только упрощают решение тех или иных инженерных задач, но и определяют появление новых методов проектирования. Проектирование – один из наиболее сложных видов интеллектуальной работы, выполняемых человеком. Основой современного автоматизированного проектирования является трехмерное моделирование. Основным преимуществом трехмерного моделирования является возможность использовать созданную модель для проведения инженерных расчетов методом конечных элементов, применяя получившие развитие в последнее время специализированные программные средства автоматизированного инженерного анализа (CAE – Computer Aided Engineering). Трехмерные модели деталей необходимы для автоматизированного проектирования технологии изготовления, или иначе САМ-средств (CAM – Computer Aided Manufacturing). Трехмерное моделирование автомобильных деталей оказывает неоценимую помощь инженеру-конструктору также и для обнаружения и устранения ошибок, неизбежно возникающих в процессе проектирования.

Проушины являются ответственными силовыми элементами деталей, воспринимающими сосредоточенные силы. Строгий расчет их затруднителен из-за необходимости учета концентрации напряжения, возникающего возле отверстия, и одновременного учета пластических деформаций, которые снижают концентрацию. В то же время доля проушин в общей массе всей конструкции невелика, что позволяет воспользоваться приближенными подходами, опирающимися на экспериментальные данные и дающие преуменьшенные значения предельных сил.

Проушина является элементом соединения типа «ухо-вилка», которое может быть неподвижным или подвижным, т. е. допускающим взаимный поворот соединяемых деталей. В последнем случае к узлу предъявляются дополнительные требования уменьшения трения и износа, которые удовлетворяются установкой подшипников (втулок) скольжения или подшипников качения. Эти особенности также должны быть учтены в расчете проушины и при назначении безопасных размеров. Учесть сложности моделирования и проектирования, реализовать все стадии технологических расчетов и избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания» возможно с использованием универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS [1].

Данная система автоматизированного проектирования является довольно популярной у специалистов в области компьютерного инжиниринга и конечно-элементного решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций. Одним из важных средств изучения

вибрационных характеристик механических конструкций является модальный анализ (определение собственных частот и форм (мод) собственных колебаний).

Анализ последних исследований и публикаций

Для расчетного анализа напряженно-деформированного состояния и модального анализа конструкций эффективно используется метод конечных элементов (МКЭ) (например, работы [2–4]). Предварительный модальный анализ становится весьма важным при моделировании вибраций и переходных процессов в автомобильных деталях. Первый этап вибрационного исследования детали – это расчет параметров собственных колебаний. Его основной целью является определение степени опасности возможных резонансных режимов. Если опасные гармоники попадают в рабочий диапазон действующих внешних нагрузок, то конструкция считается неудовлетворительной с точки зрения прочности при вибрациях. В таком случае предпринимаются попытки изменить конструкцию таким образом, чтобы вывести ее собственные частоты за рабочий диапазон, а также может производиться оценка опасности резонансных колебаний по величине возникающих деформаций и напряжений в конструкции [5].

К настоящему времени количество публикаций, посвященных исследованию вибрационных характеристик механических конструкций, весьма значительно. Следует отметить, что численные методы решения задачи о собственных колебаниях сложных деталей автомобильных конструкций, с учетом особых областей, недостаточно разработаны. Такие исследования необходимо проводить для предотвращения резонанса. Предлагаемые для решения этих задач методики [2] обычно основываются на упрощающих гипотезах и не могут непосредственно использоваться для решения задачи о колебаниях детали. Отметим также, что существующие теоретические подходы [3] приводят к значительному расхождению результатов с экспериментальными данными, особенно на низших частотах.

Основной выгодой применения модального анализа является не только получение более точного результата в локальной области, но и возможность экспериментирования с различными вариантами конструкции в области интереса.

Целью настоящей работы является конечно-элементный модальный анализ для определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний трехмерного тела, в результате которого в нем устанавливается наиболее напряженная область.

Основной материал исследования

Для выполнения модального анализа проушины в окне *ProjectSchematic* необходимо создать блок модального анализа (*Modal*). Нажав и удерживая левую клавишу мыши, необходимо перетащить наименование блока из окна *Toolbox* в ограниченное штриховой линией место вставки блока в окне *ProjectSchematic*.

Построение геометрической модели реализуется элементом *Geometry* и производится в *DesignModeler*, реализующим современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии. *DesignModeler* позволяет подготовить модель к инженерному анализу в ANSYS. Программа позволяет выбирать необходимые твердые материалы для исследуемых моделей объектов из библиотеки материалов ANSYS. По умолчанию для каждого твердого материала уже заданы все свойства.

Уточним объект исследования. Рассматривается проушина. Геометрия проушины показана на рисунке 1; материал – сталь 08пс; модуль упругости – $2,03 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; предел текучести – 175 МПа, плотность материала – 7850 кг/м^3 . Нагрузка не учитывается, болт не моделируется.

Цель: определить первые десять низших частот и соответствующих им форм собственных колебаний. А также вычислить соответствующие им значения эквивалентных напряжений для учета концентрации напряжения, возникающей возле отверстия.

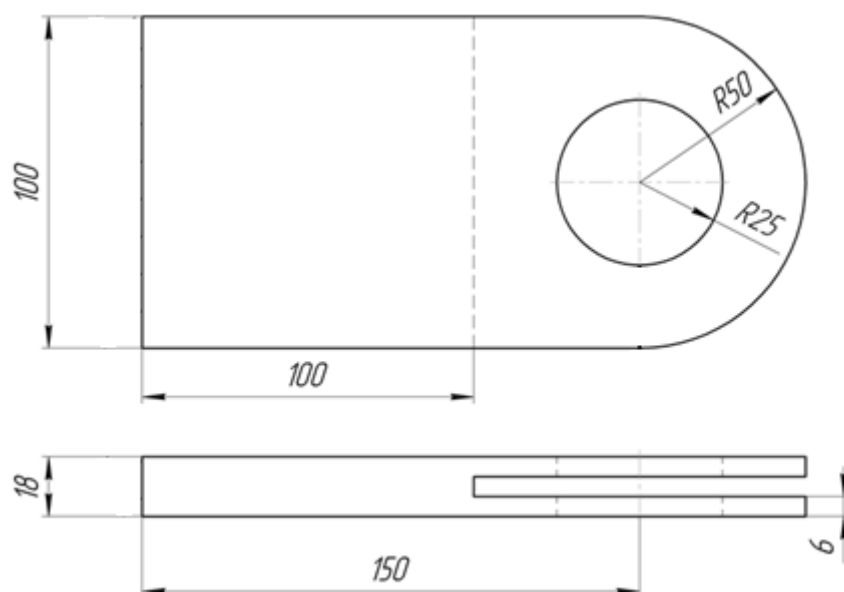


Рисунок 1 – Геометрия проушины

Разбиение геометрической модели конечно-элементной сеткой выполняется модулем *Mesh* дерева проекта для получения дальнейшего численного решения. В области отверстия проушины дополнительно измельчаем сетку для получения более точных результатов расчета (рисунок 2).

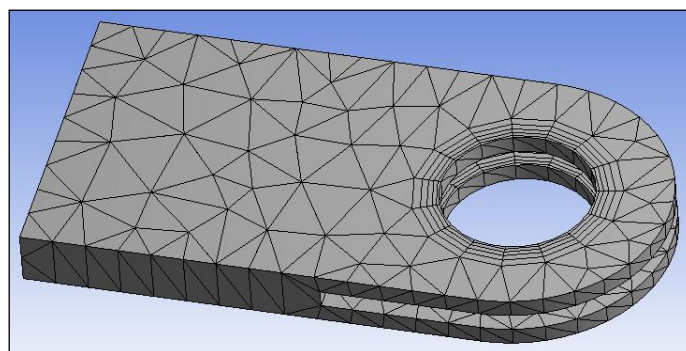
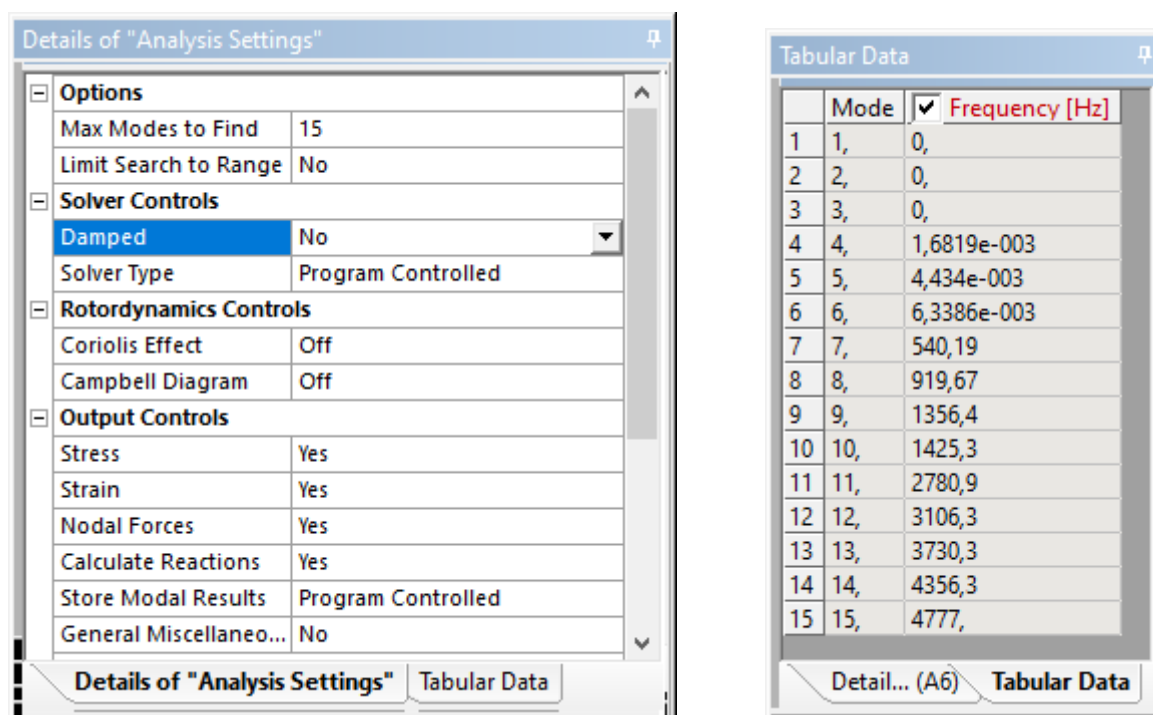


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка модели проушины

Подготовка к проведению расчета включает в себя также определение внешних воздействий на конструкцию. Внешнее воздействие определяется терминами «ограничение» и «нагрузка». В первом случае предполагается либо закрепление (ограничение перемещений и вращений), либо определение температуры в задачах теплообмена. Под «нагрузкой» понимается воздействие (приложение) сосредоточенных или распределенных сил, а в задачах теплообмена – тепловых потоков. Для данного расчета наложение нагрузок не производится, т. к. модальный анализ – это задача о нахождении собственных частот и форм колебаний конструкции.

Переходим к этапу запуска решателя и анализу результатов. Раздел *Modal* дерева проекта содержит подраздел *Analysis Settings*, который содержит и позволяет пользователю в окне *Details of «Analysis Settings»* задавать информацию о максимальном числе искомых мод, а также, при необходимости, граничные условия поиска по частоте (рисунок 3а). Задаем мак-

симальное число искомых мод равным 15. Не ограничиваем поиск мод частотным диапазоном.



a)

б)

Рисунок 3 а) окно настроек Details of «Analysis Settings»;
б) контекстное меню окна *Tabular Data*

Переходим к решению задачи. Для этого нажимаем кнопку *Solve* в контекстном меню раздела *Modal* окна *Outline*. При верном указании всех исходных данных и настройке решателя, при выполнении расчета в окне дерева проекта возле раздела *Solution* появляется зеленая галочка. А в окнах *Graph* и *Tabular Data*, расположенных в нижней части экрана, отражено графическое и численное представление собственных частот первых десяти мод (рисунок 3б). Форма собственных колебаний представляет собой совокупность амплитуд перемещений всех точек тела на определенной собственной частоте. Амплитуды (суммарные деформации) отражаются в виде цветовой шкалы, расположенной слева от графической модели. Красный цвет характеризует максимальное отклонение, синий – минимальное.

Для первой моды проушины характерна собственная частота равная 540,19 Гц (рисунок 4). Такая большая величина собственной частоты для первой моды говорит о том, что конструкция достаточно устойчива к вибрационному воздействию. Как правило, частотный диапазон вибрации от работы в деталях автомобиля расположен в пределах от 1 до 100 Гц, поэтому можно сказать, что резонанс в нашем случае не возникает.

Основным результатом расчета напряженно-деформированного состояния, проводимого с помощью МКЭ в модуле *Static Structural*, являются перемещения (*Deformation*) узлов КЭ-модели. Максимальное суммарное перемещение (*Total Deformation*) для данной частоты колебаний равно 2,8019 мм и возникает на крайней скругленной части проушины. Это связано с тем, что эта область (выделение красным цветом) является минимально закрепленной и максимально подвижной по сравнению со всеми остальными точками конструкции, а значит наиболее подвержена вибрационному воздействию [6]. Подобласть минимального суммарного перемещения расположена в сплошной части проушины, не содержащей вырезов и отверстий.

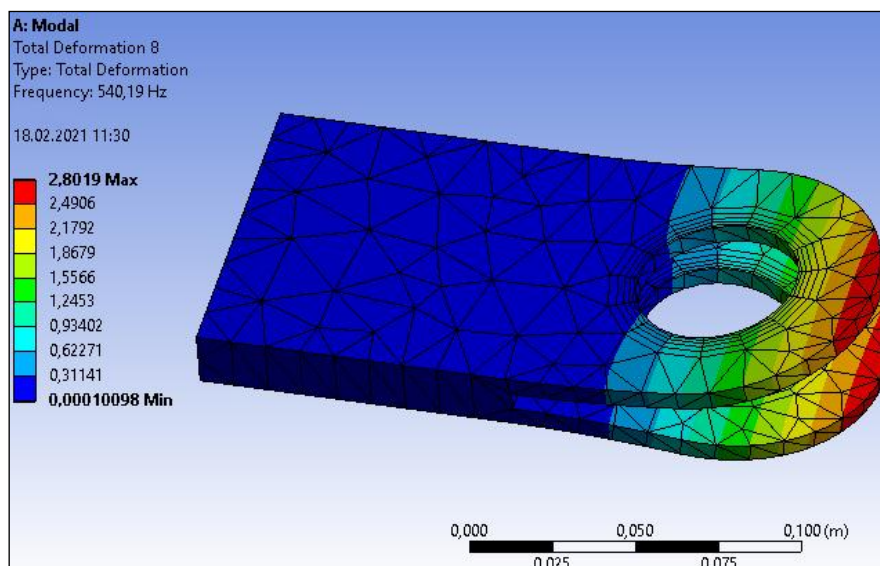


Рисунок 4 – Результаты расчета максимального суммарного перемещения для первой моды

Остальные моды характеризуются еще большими собственными частотами (рисунок 3б). Просматривая формы и частоты собственных колебаний, можно прогнозировать динамический отклик конструкции на внешнее возбуждение в различных направлениях. Приведем результаты расчета эквивалентных напряжений для первой моды (рисунок 5). Отмечается большая концентрация напряжений в средней части проушины, в области перехода между областями с максимальным и минимальным суммарным перемещением, а также в области отверстий. Данный результат является прогнозируемым и общим для большего числа найденных собственных частот [7, 8].

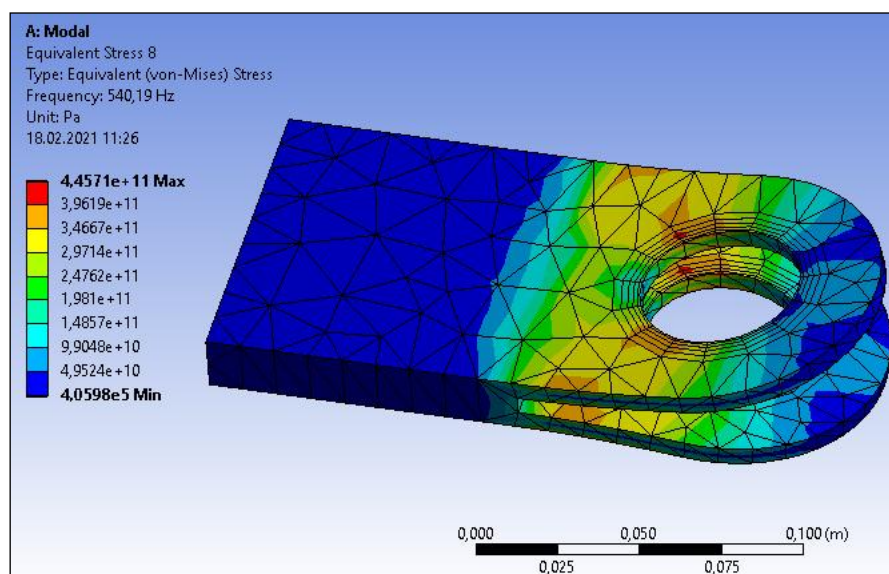


Рисунок 5 – Результаты расчета эквивалентных напряжений для первой моды

Выводы

Современные средства моделирования, используемые для анализа, разработки и проектирования новых производств, а также анализа работы действующих, очень многообразны. Они позволяют автоматизировать почти все стадии инженерного труда и минимизировать затраты трудовых ресурсов, денежных средств и рабочего времени. При этом достигается оптимальное решение поставленной задачи с учетом имеющихся данных и опыта. Очевидно,

что конкурентное развитие технологии и техники немыслимо без широкомасштабного использования подобных средств моделирования в исследовательских и проектных организациях и на производстве.

Поставленная задача решалась методом конечных элементов в пакете ANSYS Workbench. Метод решения и проведенный модальный анализ помогли установить параметры колебаний модели проушины: были определены собственные частоты и формы колебаний, результирующие максимальные и минимальные перемещения, эквивалентные напряжения для соответствующих собственных частот. Преимуществом приведенной методики является визуализация колебаний детали, а также возможность быстро смоделировать варианты решения проблем прочности путем оптимизации геометрических и физических параметров модели. Представляет интерес применение приведенной методики при исследовании преднапряженной конструкции, в частности для решения связанной задачи термоупругости, электротермоупругости.

Данный анализ может быть использован как отправная точка для других, более подробных динамических расчетов, таких, как нестационарный динамический анализ или отклик системы на гармоническое воздействие. На основе предложенного метода исследования могут быть выявлены дополнительные факторы, влияющие на рассматриваемые вопросы прочностных расчетов динамического напряженно-деформированного состояния автомобильных деталей.

Список литературы

1. Сборник руководств программы ANSYS. – Текст : электронный. – URL: <http://iamdrunk.ru/teach/!%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B8/ANSYS/%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%BC%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%BC.pdf> .
2. Леонтьев, Н. В. Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа / Н. В. Леонтьев. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2006. – 101 с.
3. Расчетно-экспериментальные исследования собственных частот и форм колебаний лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов / М. А. Гринев, А. Н. Аношкин, П. В. Писарев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 106–119.
4. Ефимик, В. А. Применение метода конечных элементов к задаче собственных колебаний прямоугольных пластин и цилиндрических оболочек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 72–92.
5. Ткач, В. В. Применение модального анализа в междисциплинарном исследовании ЖРД / В. В. Ткач // Труды МАИ : электронный журнал. – 2010. – № 38.
6. Межин, В. С. Практика применения модальных испытаний для целей верификации конечно-элементных моделей конструкции изделий ракетно-космической техники / В. В. Межин, В. В. Обухов // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1(4). – С. 86–91.
7. Силкина, Л. А. Технология подмоделирования применительно к анализу элементов космического аппарата / Л. А. Силкина // Решетневские чтения. – 2016. – Т. 1, № 20. – С. 455–457.
8. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера: механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – Москва : ЛЕНАНД, 2014. – 456 с.

Л. П. Вовк, М. С. Яворенко

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

**Информационные технологии при автоматизированном проектировании
и расчете автомобильных деталей**

Динамической конечно-элементной модели принадлежит ключевая роль в решении комплексной задачи обеспечения вибропрочности конструкции изделия. Современная вычислительная техника, программные продукты, испытательно-измерительные комплексы позволяют создать подробную модель конструкции изде-

лия, а на основе эксперимента отстроить и подтвердить ее достоверность. Решение данных задач возможно в современных системах КЭ анализа. Программа ANSYS является одной из самых универсальных, развивающихся и популярных систем конечно-элементного анализа у специалистов, занимающихся автоматизированными инженерными расчетами (CAE, Computer-Aided Engineering). Конечно-элементная модель автомобильной детали является надежным инструментом анализа прочности изделия при изменении условий его эксплуатации, изменениях его конструкции, а также при создании новых изделий подобного класса. Методологическая ценность данного исследования заключается в разработке алгоритма определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний проушины и эквивалентных напряжений, возникающих возле отверстия, путем проведения модального анализа в ANSYS. Практический интерес представляет вопрос оценки локальной концентрации напряжений в окрестности отверстий проушины, а также их влияние на прочностные изменения в детали. Объект исследования – проушина, являющаяся элементом соединения типа «ухо-вилка». При построении алгоритма, в основу расчета определения собственных частот и форм (мод) собственных колебаний проушины положен модальный анализ (определение собственных частот и форм (мод) собственных колебаний). Поставленная задача решалась методом конечных элементов в пакете ANSYS Workbench. Метод решения и проведенный модальный анализ помогли установить параметры колебаний модели проушины: были определены собственные частоты и формы колебаний, результирующие максимальные и минимальные перемещения, эквивалентные напряжения для соответствующих собственных частот. Используя данную методику, можно предотвращать возникновение опасных напряжений в конструкциях путем моделирования мероприятий по устранению резонансных частот в модели исследуемой автомобильной детали.

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, ЛОКАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ПРОУШИНА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ СЕТКА

L. P. Vovk, M. S. Iavorenko

Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Information Technology in the Computer-aided Design and the Calculation of Automobile Parts

The dynamic finite-element model plays a key role in solving the complex problem of ensuring the vibration strength of the product structure. The modern computer technology, software products, test and measuring complexes allow to create a detailed model of the product design, and, on the basis of the experiment, to rebuild and confirm its reliability. The solution of these problems is possible in modern FE analysis systems. The ANSYS program is one of the most versatile, developing and popular systems of the finite element analysis among specialists engaged in the automated engineering calculations (CAE, Computer-Aided Engineering). The finite-element model of the automobile part is a reliable tool for analyzing the strength of the product when changing conditions of its operation, changes in its design, as well as when creating new products of the similar class. The methodological value of this study is in the development of the algorithm to determine the natural frequencies and modes (modes) of the ear natural oscillations and the equivalent stresses arising near the hole by means of the modal analysis in the ANSYS. The issue of assessing the local stress concentration near the ear holes, as well as their effect on the strength changes in the part is of practical interest. The object of the study is an ear, which is an element of the «ear-fork» connection. When constructing the algorithm, the calculation of the determination of natural frequencies and modes (modes) of the ear natural vibrations is based on the modal analysis (the determination of natural frequencies and modes (modes) of natural vibrations). The task was solved by the finite element method in the ANSYS Workbench package. The solution method and the performed modal analysis helped to establish the oscillation parameters of the ear model: the natural frequencies and modes of vibrations, resulting maximum and minimum displacements, equivalent stresses for the corresponding natural frequencies were determined. Using this technique, it is possible to prevent the dangerous stresses in structures by simulating the measures to eliminate resonant frequencies in the model of the investigated automobile part.

NATURAL FREQUENCIES, DEFLECTED MODE, LOCAL STRESS CONCENTRATION, EAR, MODELLING, FINITE-ELEMENT MESH

Сведения об авторах:

Л. П. Вовк

SPIN-код: 9860-6682

Телефон: +38 (071) 301-98-55

Эл. почта: lv777@list.ru

М. С. Яворенко

Телефон: +38 (071) 448-15-67

Эл. почта: maximik2011@gmail.com

Статья поступила 24.02.2021

© Л. П. Вовк, М. С. Яворенко, 2021

Рецензент: Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»