

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобили: Испытания: Учеб. пособие для вузов / В.М. Беляев, М.С. Высоцкий, Л.Х. Гилелес и др.; Под ред. А.И. Гришкевича, М.С. Высоцкого. – Мн.: Вышш. шк., 1991.
2. ГОСТ 7057-2001. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний.
3. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов. - М.: "Машиностроение" 1966.
4. Испытания сельскохозяйственных тракторов. А.Т. Коробейников, В.С. Лихачев, В.Ф. Шолохов. – М.: Машиностроение, 1985.
5. Скойбеда А.Т. Обоснование и исследование автоматической блокировки межколесных дифференциалов трактора с четырьмя ведущими колесами. Автореферат канд. дис. Мн., 1972.
6. Ускоренные испытания элементов трансмиссий мобильных энергетических средств / Н.И. Афанасьев, С.Н. Демиденко, В.А. Дьяченко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1999.

УДК 621. 81: 621 – 192

Капуста П.П., Швец И.В.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ НЕСУЩИХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПНЕВМОПОДВЕСОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

Подвеска представляет собой несущую систему грузовых автомобилей и их прицепного состава, определяющих степень демпфирования нагрузок от неровностей дорожного покрытия и ресурс автомобиля в целом. Учитывая, как дорого обходятся ошибки при проектировании и расчете подвесок при постановке их на производство, и длительность полномасштабных дорожных испытаний, применяются расчетные методы исследования эксплуатационной нагруженности на этапах проектирования. В настоящей работе предпринята попытка создания алгоритма расчетной инженерной методики несущих стальных конструкций автомобильных пневмоподвесок на основании использования метода конечных элементов и имитационного моделирования эксплуатационной нагруженности.

1. Общие положения методики. В современных условиях машиностроение может быть конкурентоспособным только при условии производства новой продукции в минимальные сроки. При необходимости быстрого создания и освоения производства новых конструкций машин желательно отказаться полностью или частично от наиболее продолжительного и дорогостоящего этапа – натуральных испытаний, тем самым сократить сроки проектирования изделий.

Это представляется возможным за счет создания полномасштабных имитационных (виртуальных) моделей машины [1-6]. Проведение эксперимента на таких моделях соответствует натурным испытаниям, проводимым в экспериментальных цехах, но с гораздо меньшими затратами времени и средств. Виртуальная модель рассматривается как сложная механическая несущая система взаимосвязанных подсистем, используя которую осуществляется проектная оценка нагруженности машин для дальнейшего анализа и определения опасных по усталости элементов, прогнозирования ресурса исследуемой несущей конструкции. Чтобы создавать и работать с имитационными моделями, необходимо использовать новейшую вычислительную технику, системы автоматического проектирования, а также разрабатывать методики, алгоритмы оценки и расчетного прогнозирования нагруженности.

Для расчетного прогнозирования нагруженности на стадии проектирования используется динамический и численный анализ модели или отдельных ее частей. Динамический анализ основан на использовании обобщенного уравнения Лагранжа, а численный – на методе конечных элементов (МКЭ).

2. Разработка математического ядра и алгоритма инженерной методики расчетной оценки нагруженности на основе использования МКЭ.

При разработке математического ядра и алгоритма инженерной методики расчетной оценки нагруженности использован подход, изложенный в [1 - 6] и большой опыт теории и практики применения МКЭ в расчетах инженерных конструкций [7 – 19 и др.]. Метод конечных элементов получил развитие с появлением ЭВМ, стало возможным его широкое применение к задачам механики деформируемых твердых тел, теплопроводности и др. Развивать МКЭ можно лишь имея высокопроизводительную вычислительную технику и разрабатывая математические модели, адекватные реальным процессам с достаточной степенью точности. Метод основывается на представлении реальной конструкции совокупностью простых элементов, связанных между собой в узловых точках и имеющих конечное число степеней свободы. Математическая сущность МКЭ состоит в приведении дифференциальных уравнений, описывающих объект, к системе линейных алгебраических уравнений, порядок которой определяется числом степеней свободы созданной модели. Так как в МКЭ конструкция, имеющая бесконечное число степеней свободы, заменяется дискретизованной моделью с определенным числом степеней свободы, то расчет может быть только приближенным. Поэтому точность решения зависит от числа конечных элементов и функций, аппроксимирующих перемещения или напряжения. Предполагается, что искомые величины (перемещения, напряжения и т. д.) в пределах каждого конечного элемента при помощи задаваемых аппроксимирующих функций можно выразить через значения этих величин в узловых точках, а внешнее воздействие можно заменить эквивалентным сосредоточенным в узлах воздействием (системой эквивалентных узловых сил).

Реализация метода конечных элементов состоит из нескольких этапов:

разбиение исследуемого объекта на конечные элементы (в настоящее время целесообразно использовать программы автоматизированной разбивки объектов на конечные элементы и нумерации узлов; выбор вариационного принципа. Чаще всего в расчетах используют принцип Лагранжа, в соответствии с которым варьируются перемещения); реализация вариационного принципа (вычисление матриц жесткости элементов, построение глобальной матрицы системы и вектора узловых сил); решение системы алгебраических уравнений, используя соответствующие программы. Используя найденные перемещения узлов, в соответствии с теорией упругости, определяются деформации и напряжения.

Метод конечных элементов позволяет провести достоверную оценку нагруженности конструкции, а также является универсальным для различных объектов, варианты расчета отличаются лишь типом используемых матриц жесткости и демпфирования.

Расчет с использованием МКЭ можно провести для статического и динамического (учитываются инерционные свойства и (или) изменение во времени параметров технического объекта или внешних условий) анализа конструкции.

При динамической оценке часто во избежание излишнего усложнения расчетов на начальных стадиях проектирования считают, что динамическая модель конструкции является детерминированной, т.е. реакция системы на внешнее воздействие будет взаимно однозначной. Заключительный этап выполняют на вероятностных моделях, которые более соответствуют реальным объектам. Воздействия на них внешней среды носит случайный характер и описывается случайными функциями

Полученные реализации спектров случайного нагружения в предположительно опасных элементах конструкций стальной опоры пневмоподвески в напряжениях схематизируются и обрабатываются с учетом многочастотности нагружения и многорежимности условий эксплуатации. По результатам такого анализа строятся нагрузочные блоки, являющиеся исходными для прогнозирования усталостного ресурса (пробега) стальных деталей подвески [20-24].

3. Прогнозирование нагруженности опоры пневмоподвески. Рассмотрим реализацию прогнозирования нагруженности методом конечных элементов с использованием имитационной модели (см. рис. 1).

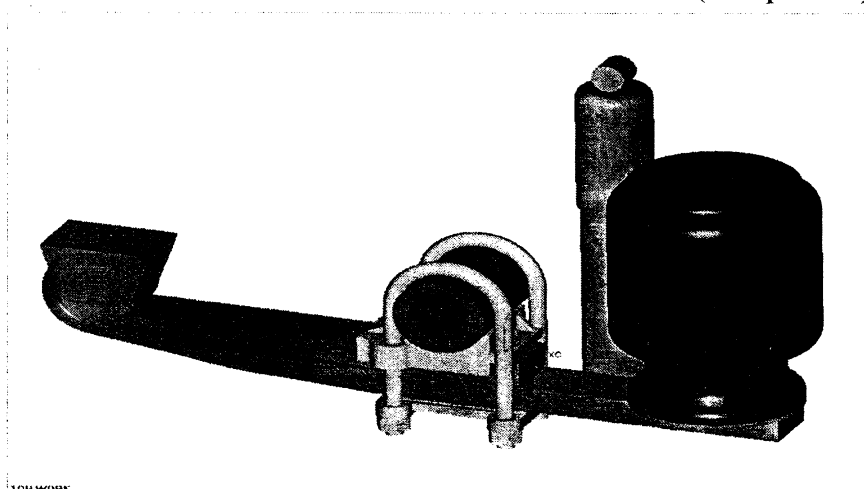


Рис. 1. Схема подвески полуприцепа

Для этого необходимо создать модель подвески в системе трехмерного моделирования. Это позволит оценить конструкцию и взаимодействие отдельных несущих элементов подвески, а также осуществить расчеты на прочность и жесткость и определить собственные колебания. Затем осуществляется конечноэлементный расчет, имеющий три основных этапа:

- создание на основе трехмерной модели конечноэлементной сетки (рис. 2) и подготовка исходных данных (геометрические параметры конечных элементов, которые можно задать либо использовать уже готовые пакеты проектирования; величины, точки приложения и направление векторов нагрузки, давления, силы; свойства материала; ограничения на узлы, на перемещения и т. д.);
- расчет модели (формирование матриц жесткости, масс, демпфирования; формирование нагрузок; расчет частот и форм собственных колебаний; вычисление перемещений узлов конечных элементов; деформаций и напряжений в конечных элементах) (рис. 3);
- оценка результатов расчета (результаты можно вывести в графической форме (рис. 4) или в виде числовых данных, т. е. получить результаты величин нагрузок на элемент, таблицы значений перемещений узлов, изображение деформированной под воздействием нагрузки сетки конечных элементов, графическое представление границ напряжений (изолинии), рисунки деталей, в которых с помощью цвета или тона выделены отдельные области в зависимости от величины напряжений или нагрузки, приложенной к элементу, также возможно посмотреть изменения формы элемента под действием динамических нагрузок).

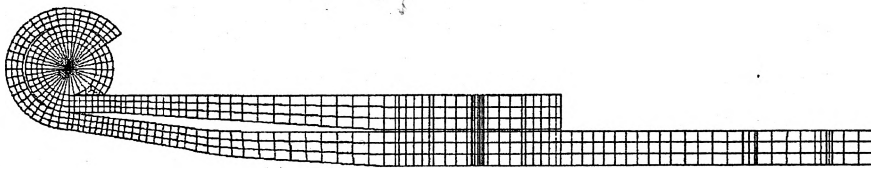


Рис. 2. Конечноэлементная модель опоры подвески полуприцепа

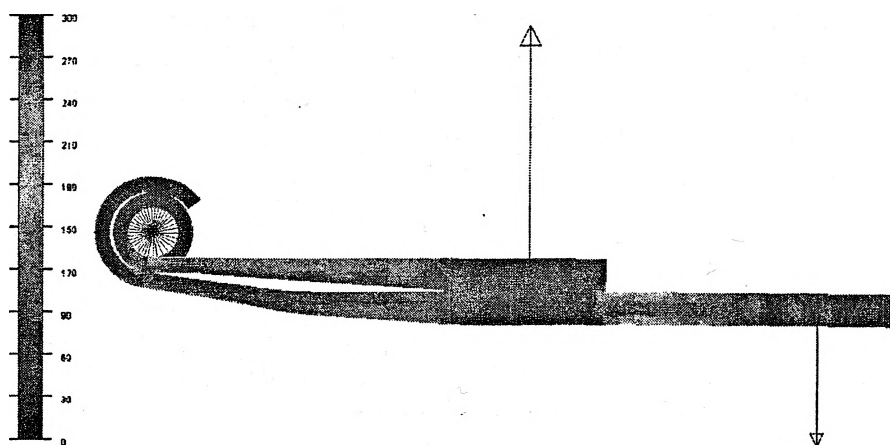


Рис. 3. Распределение напряжений в опоре подвески полуприцепа

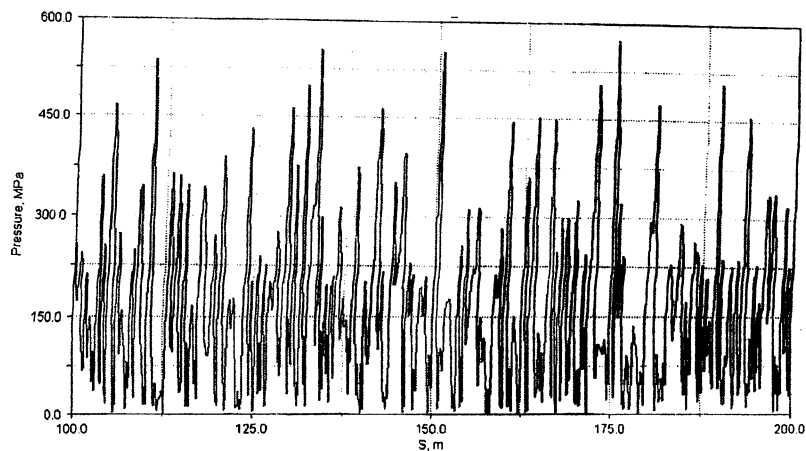


Рис. 4. Фрагмент графика изменения эквивалентных напряжений в опасном месте опоры подвески полуприцепа при движении автопоезда по участку дороги “ровный асфальт” со скоростью 90 км/ч

Данные, полученные с помощью конечноэлементного расчета, позволяют оценить нагруженность деталей, а по местам локализации наибольших значений полей напряжений можно определить локальные опасные по усталости элементы деталей.

Построение нагрузочных блоков производится по методике, изложенной в [20 - 24]. Для построения нагрузочных блоков предварительно определены характеристики статической прочности (из справочных таблиц для стали 50 ХГФА ГОСТ 14959-79) и сопротивления усталости в опасном по усталости месте опоры подвески полуприцепа [1] (нижний длинный лист у выхода из-под верхнего короткого листа, имеющий прямоугольное сечение 100x45 мм), например, для вероятности неразрушения $P=0,5$: $\sigma_{-1}=275,38$ МПа; $\sigma_{-1}=413,07$ МПа; $N_G=2 \times 10^6$ циклов; $m=13,955$.

Выбор превалирующего действия напряжений, определяющего, в свою очередь, наиболее вероятное направление появления усталостной трещины, основано на представлениях о флуктуации полей напряжений.

Заключение. Разработана методика расчетной инженерной оценки нагруженности стальных несущих конструкций пневмоподвески автотранспортных средств на основе использования МКЭ, включающая имитационное моделирование условий эксплуатации в системе рама-подвеска с осью-колесо, математическое ядро и алгоритм имитационного моделирования динамики узла и материала твердых деформируемых (стальных) конструкций подвески. Результаты проектных расчетов подтверждены экспериментальными дорожными испытаниями [25, 26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Капуста П.П. Ресурсное проектирование несущих деталей АТС// Ав-

томобильная промышленность. – 2000. -№ 2. - С. 24-26.; 2. Капуста П.П. Методология обеспечения требуемой надежности несущих систем и элементов машин на ранних стадиях проектирования// Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механике.- Минск: УП “Технопринт”, 2001. – С. 244 – 249.; 3. Капуста П.П. Математическая модель как инструмент ресурсного проектирования АТС// Автомобильная промышленность. – 2001. - № 11. - С. 15-18.; 4. Капуста П. П. Вероятностная оценка характеристик сопротивления усталости деталей на стадии проектирования машин: Учебно-методическое пособие для ВТУЗов.- Минск.: УП “Технопринт”, 2001. - 97с; 5. Капуста П.П. Теоретическая модель оценки нерегулярной нагруженности деталей и конструкций машин// Теория и практика машиностроения, 2004., №4. - С. 52-55.; 6. Капуста П.П. О принципах создания компьютерного автополигона для прогнозирования нагруженности несущих систем автотранспортных средств// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 6. Автоматизация проектирования и информационные технологии. - Мн., 2004. - С. 37-47.; 7. Прочность, устойчивость, колебания. Спр. В 3-х томах. Т. 1, Под ред. д-ра наук И. А. Биргера и чл.-корр. АН Латвийской ССР Я. Г. Пановко, М., Машиностроение, 1968.; 8. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.; 9. Хан Х. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применение. Пер. с нем.–М.: Мир, 1988.; 10. Хечумов Р.А., Кепшлер Х., Проккопьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций , 1994.; 11. Морозов Е.М. , Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы , 1980.; 12. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 1997.; 13. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: ДизайнПРО, 2004.; 14. Александров А. В. Сопротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для строит. спец. вузов/А. В. Александров, В. Д. Потапов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк. 2002.; 15. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций/ Ковальчук Б. И., Лебедев А. А., Уманский С. Э. – Киев: Наук. думка, 1987.; 16. Крушевский А. Е. Введение в аналитическую механику упругих тел / А. Е. Крушевский. – Мн.: БНТУ, 2004.; 17. Механика сплошной среды, т. II Седов Л. И. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.; 18. Введение в нелинейную строительную механику: Учебное пособие / О. Л. Рудых, Г. П. Соколов, В. Л. Пахомов; Под ред. О. Л. Рудых, – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 1998.; 19. Зубчанинов В. Г. основы теории упругости и пластичности: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1990.; 20. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Прогнозирование случайного нагружения и построение нагрузочных блоков// Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления: Сборник научных

трудов. Вып. 1. В 3 т. Т. 2/ Под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Техно-принт», 2002. - С. 334 – 344.; 21. Почтенный Е.К. Анализ и синтез усталости элементов конструкций// Доклады НАН Беларуси, 2002, т. 46, №2, с.105-107.; 22. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций.- Мн., УП “Арти-Фекс”, 2002, 186 с., ил.; 23. Почтенный Е.К., Капуста П.П. Анализ нагруженности и расчет ресурса конструкций при случайном нагружении// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 1. Перспективные направления создания машин. - Мн., 2004. - С. 125-135.; 24. Капуста П.П. Прогнозирование нагруженности и долговечности несущих конструкций на стадиях ресурсного проектирования мобильных машин заданной надежности// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 22 - 34.; 25. Капуста П.П., Швец И.В., Мальев Д.В., Вихренко Д.В., Рыбаков Д.В. Прогнозирование нагруженности несущих элементов подвески автомобильного полуприцепа с использованием имитационного моделирования// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 95 - 99.; 26. Капуста П.П., Слабко И.А., Рубцов А.В. Системная экспериментальная оценка эксплуатационной нагруженности несущих конструкций магистрального автопоезда// Современные методы проектирования машин. Вып. 2. В 7 томах. - Т. 4. Надежность и ресурсное проектирование машин. - Мн., 2004. - С. 88 – 94.

УДК 621. 81: 621 – 192

Капуста П.П.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ НЕРЕГУЛЯРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

1. Общие сведения об уравнениях нерегулярной нагруженности деталей машин. В работе [1] автором опубликованы уравнения нерегулярного нагружения деталей машин (1) и (2), предназначенные для сравнительных оценок нагруженности на стадиях проектирования, а также для текущей диагностики с целью прогнозирования остаточного ресурса и риска эксплуатации.

$$\frac{\sigma_i - \sigma}{\sigma - \sigma} = \exp \left\{ \frac{1}{w} \ln \left[\frac{\ln \left(\frac{n}{i} \right)}{\ln(n)} \right] \right\}. \quad (1)$$