

УДК 629.365

С.А. Сергиевский

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ДВУХСЕКЦИОННОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ**

ООО “Эм-Эс-Си Софтвэр Рус”, г. Москва

Представлены результаты разработки подхода к виртуальному моделированию двухсекционной гусеничной машины с помощью проблемно-ориентированного программного модуля Adams Tracked Vehicle Toolkit. Разработанный подход позволяет выполнять оценку нагрузок, действующих на поворотное-цепное устройство двухсекционной гусеничной машины.

Ключевые слова: двухсекционная гусеничная машина, поворотное-цепное устройство, нагрузки, моделирование.

По сравнению с колёсными машинами гусеничные транспортные средства обладают значительными преимуществами в части проходимости. Низкое удельное давление гусеничного движителя на опорную поверхность позволяет создавать транспортные средства, способные перевозить значительные грузы по пересечённой местности и по грунтам с низкой несущей способностью. Перспективы дальнейшего повышения проходимости и грузоподъёмности гусеничных машин связаны, в том числе, с применением двухсекционной схемы транспортного средства. Применение двухсекционной схемы позволяет повысить маневренность гусеничной машины за счёт использования схемы поворота путём изменения взаимного положения секций в горизонтальной плоскости и проходимость за счёт естественного и/или принудительного складывания секций в вертикальной плоскости, а также за счёт относительного поворота секций вокруг продольной горизонтальной оси.

Наряду с преимуществами машины с гусеничными движителями отличаются также недостатками, среди которых повышенная сложность и высокая стоимость. Кроме того, применение устройств управления двухсекционными гусеничными машинами за счёт изменения взаимного положения секций также способствует усложнению и удорожанию машины. Указанные обстоятельства неизбежно влекут усложнение и удорожание процесса разработки двухсекционной гусеничной машины. В этих условиях особенно актуальным является применение современных технологий компьютерного виртуального моделирования двухсекционной гусеничной машины, позволяющее выбрать рациональные конструктивные параметры изделия на возможно раннем этапе проектирования, свести к минимуму объём конструкторско-доводочных испытаний и доработок опытных образцов.

Эффективность использования виртуального моделирования зависит от применяемого программного обеспечения. Наиболее распространённым в транспортной промышленности мира программным пакетом для виртуального моделирования механизмов является комплекс Adams (Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems = автоматический динамический анализ механических систем). Adams предоставляет возможности создания и исследования расчётных моделей динамических систем практически любой сложности. Кроме того, Adams имеет открытую архитектуру, которая позволяет разрабатывать проблемно-ориентированные приложения, обеспечивающие автоматизацию решения сложных динамических задач, актуальных для высокотехнологичных отраслей промышленности. В числе таких приложений Adams Tracked Vehicle Toolkit – проблемно-ориентированный модуль, обеспечивающий автоматизацию построения и расчёта виртуальных моделей транспортных средств с гусеничным движителем.

В принципе, средств базовой конфигурации программного пакета Adams достаточно

для построения виртуальной модели гусеничной машины. Однако создание моделей гусеничной ленты (включающей десятки траков), задание параметров взаимодействия траков гусеницы между собой, с катками, с ведущими звёздочками и с опорной поверхностью характеризуется очень большой трудоёмкостью и содержит в себе высокую потенциальную опасность совершения ошибок. Применение Adams Tracked Vehicle Toolkit позволяет автоматизировать указанные операции, сократить время построения виртуальной модели гусеничного движителя и понизить вероятность совершения ошибок.

Программное обеспечение Adams Tracked Vehicle Toolkit включает:

- параметризованные модели элементов гусеничной ленты (траков, соединителей), опорных и поддерживающих катков, устройств натяжения гусениц, ведущих звёздочек, приводов звёздочек (силовых установок);
- геометрические модели опорных поверхностей;
- модели свойств грунтов;
- инструменты создания пользовательских моделей вышеуказанных элементов;
- средства генерации моделей гусениц, сопряжения их с катками и звёздочками, а также с опорной поверхностью;
- средства задания параметров движения виртуальной модели машины, параметров счёта и вывода результатов.

Создание виртуальной модели гусеничной машины включает следующие этапы:

1. Выбор параметризованных моделей элементов гусеничной машины, соответствующих требуемым или (в случае если в библиотеке параметризованных моделей отсутствуют требуемые параметризованные модели) разработка собственных параметризованных моделей с заданной кинематической схемой;

2. “Настройка” параметризованных моделей элементов машины путём задания конкретных значений конструктивных параметров (например, для опорных катков радиусов и ширины катков, длины балансиров подвески катков, колеи и т.п.);

3. “Сборка” виртуальной модели машины из моделей отдельных элементов (моделей подвесок опорных катков, устройств натяжения гусениц, поддерживающих катков, ведущих звёздочек, *одного* трака на каждую гусеничную ленту);

4. Построение модели гусеничного движителя в сборе (генерация заданного количества траков, сопряжение их между собой, задание контактных взаимодействий траков гусениц между собой, с опорными и поддерживающими катками, с “ленивцами”, с ведущими звёздочками, с корпусом машины);

5. Построение модели опорной поверхности с заданными геометрическими параметрами и упруго-диссипативными характеристиками, задание контактных взаимодействий траков, катков и корпуса с опорной поверхностью.

Виртуальная модель *односекционной* гусеничной машины, подготовленная с использованием модуля Adams Tracked Vehicle Toolkit, представлена на рис. 1.

При запуске расчёта задаются длительность временной реализации, начальная скорость движения модели машины, количество временных интервалов вывода результатов. По окончании расчёта с использованием постпроцессора могут быть построены и выведены результаты в виде графиков и анимационных файлов. Среди количественных результатов могут быть перемещения, скорости и ускорения отдельных элементов машины (в том числе элементов гусеничного движителя), силовые факторы и т.д. Если среди элементов расчётной модели присутствовали упругие тела, импортированные из конечно-элементных программных систем (например, из MSC Nastran), то среди результатов расчётов могут быть параметры напряжённо-деформированного состояния этих упругих тел. Полученные временные зависимости могут быть обработаны с применением различных алгоритмов, предоставляемых постпроцессором, например, ускорения могут быть подвергнуты преобразованию Фурье с использованием частотных фильтров для получения характеристик плавности хода транспортного средства.

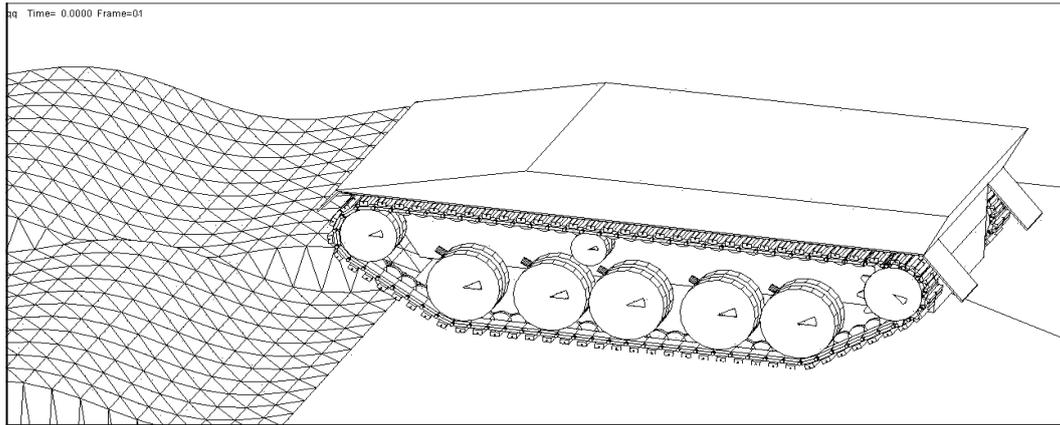


Рис. 1. Виртуальная модель односекционной гусеничной машины

Ранее указывалось, что программное обеспечение Adams имеет открытую архитектуру, позволяющую создавать на его базе проблемно-ориентированные приложения, одним из которых является Adams Tracked Vehicle Toolkit. В свою очередь, Adams Tracked Vehicle Toolkit также является открытой архитектурой, но более высокого уровня. Расчётная модель Adams Tracked Vehicle Toolkit имеет структуру базы данных, в которой строго определённым образом хранятся компоненты модели: *шаблоны* (параметризованные модели элементов машины с *обобщёнными* параметрами), *подсистемы* (параметризованные модели элементов машины с *конкретными* параметрами), *сборки* (модели гусеничных машин в сборе). В базе данных Adams Tracked Vehicle Toolkit присутствует инструмент разграничения доступа. Пользователь со “стандартными” полномочиями имеет возможность “собрать” виртуальные модели гусеничных машин из *имеющихся в базе данных* параметризованных моделей элементов, настраивать (конкретизировать) значения параметров моделей, запускать счёт и анализировать результаты. Таким образом, пользователь со “стандартными” полномочиями дистанцирован от проблем разработки моделей и их отладки, его задача – исследование динамики гусеничной машины и разработка рекомендаций по выбору оптимальных параметров изделия. Пользователь с “экспертными” полномочиями имеет все возможности “стандартного” пользователя плюс возможности разработки, отладки и включения в базу данных новых параметризованных моделей элементов гусеничного движителя и других частей машины. Разработка виртуальной имитационной модели двухсекционной гусеничной машины базируется на принципах, положенных в основу Adams Tracked Vehicle Toolkit, и позволяющих этому программному обеспечению распознавать связи между моделями отдельных частей машины и “собрать” из них модель машины в сборе.

Для сообщения программе Adams Tracked Vehicle Toolkit функционального назначения узла машины, ассоциированного с конкретной параметризованной моделью, ей назначается “роль”, значение которой кодируется именем специальной переменной, определяемой при разработке параметризованной модели. Примеры “ролей”: “корпус”, “элемент гусеничного движителя” (например, опорный каток и его подвеска), “привод звёздочки”, “башня” (крана, экскаватора или боевой машины). Может применяться также “обобщённая роль” для обозначения моделей элементов машины, которые невозможно отнести ни к одной из классифицированных частей транспортного средства. Следует отметить, что для модели поворотносцепного устройства (ПСУ) назначается “обобщённая роль”.

Для того чтобы Adams Tracked Vehicle Toolkit “мог распознать”, что две параметризованные модели частей машины должны сопрягаться между собой, в параметризованных моделях, определяются специальные переменные (*коммуникаторы*). На этапе сборки модели машины Adams Tracked Vehicle Toolkit просматривает списки коммуникаторов и если в двух параметризованных моделях обнаруживаются коммуникаторы с одним именем, это служит сигналом о необходимости сопряжения этих моделей между собой.

Модель двухсекционной гусеничной машины включает два корпуса, удвоенный набор опорных и поддерживающих катков, устройств натяжения гусениц, ведущих звёздочек, собственно гусениц, а также устройство, которое является “общим” для первой и второй секций – поворотнo-сцепное устройство. Для того чтобы на этапе сборки модели Adams Tracked Vehicle Toolkit мог корректно отнести каждую модель к первой или второй секции и правильно сопрячь модели между собой (в том числе сопрячь корпуса секций с поворотнo-сцепным устройством), параметризованные модели отдельных частей машины должны иметь соответствующие роли и включать коммуникаторы, позволяющие сопрягаться моделям частей машины, относящимся к одной и той же секции. Назначение ролей и имён коммуникаторов производится на этапе планирования структуры модели двухсекционной машины и предшествует собственно разработке параметризованных моделей частей машины. Эта работа требует определённой квалификации и выполняется пользователем-“экспертом”. Несмотря на то, что разработка параметризованных моделей частей двухсекционной машины характеризуется повышенной трудоёмкостью, затраты времени с запасом окупаются оперативностью работы с моделью на этапе выполнения расчётов с целью исследования динамики машины и выбора оптимальных параметров её конструкции.

Рассмотрим результаты применения программного обеспечения Adams Tracked Vehicle Toolkit для виртуального моделирования динамики двухсекционной гусеничной машины.

Для отработки методики виртуального моделирования двухсекционной гусеничной машины в качестве “основы” для моделей секций была взята модель гусеничной машины, изображённая на рис. 1. Для применения в модели двухсекционной машины параметризованные модели всех составных частей (модели корпуса, катков, звёздочек, ленивцев, трансмиссии) были модифицированы путём назначения соответствующих ролей и коммуникаторов, обеспечивающих на этапе сборки модели гусеничной машины возможность однозначной идентификации моделей составных частей как относящихся к первой и второй секции, а также корректное их сопряжение.

Кроме того, потребовалось создание специальной дополнительной модели – поворотнo-сцепного устройства, сопрягающего секции гусеничной машины и обеспечивающее её поворот за счёт изменения взаимного положения секций. Для отработки методики моделирования двухсекционной машины использовалась упрощённая модель ПСУ (рис. 2), включающая два звена, неподвижно соединяемых с корпусам секций, шаровой шарнир, соединяющий звенья, и актуаторы, соединённые со звеньями. Длины актуаторов изменяются по кинематическому закону. В используемой модели ПСУ звенья представлены упругими телами, конечно-элементные модели которых импортированы из пакета MSC Nastran.

Виртуальная модель двухсекционной гусеничной машины приведена на рис. 3. Длина опорной базы каждой секции составляет 4591 мм, колея по серединам гусениц 2540 мм. Масса каждой секции около 16 т.

С использованием разработанной модели выполнено два расчёта: поворот машины “на месте” при заторможенных ведущих звёздочках и переезд единичной неровности при заблокированных актуаторах ПСУ.

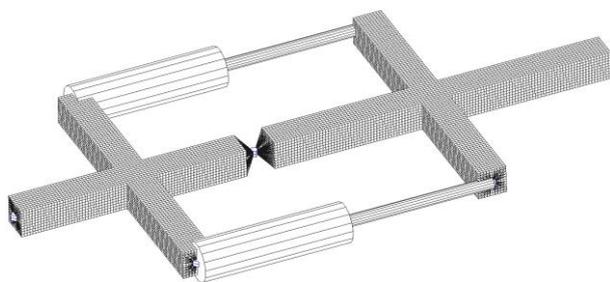


Рис. 2. Модель поворотнo-сцепного устройства

Поворот машины “на месте” выполнялся путём удлинения правого актуатора ПСУ на величину 300 мм и соответственно уменьшением длины левого актуатора на 300 мм. Зависимость удлинения правого актуатора от времени приведена на рис. 4.

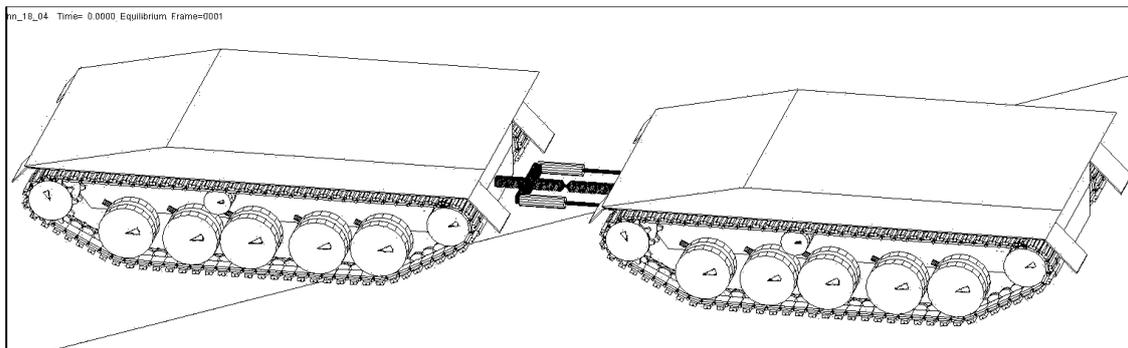


Рис. 3. Виртуальная модель двухсекционной гусеничной машины

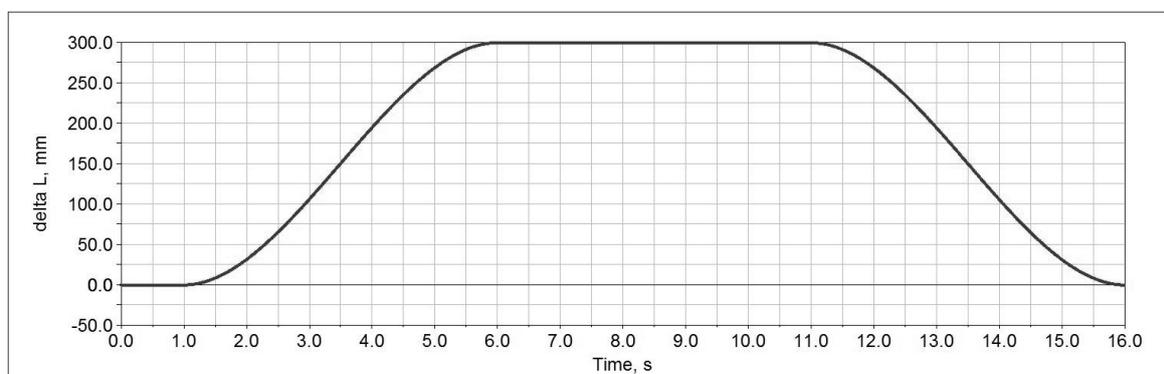


Рис. 4. Зависимость удлинения правого актуатора от времени при моделировании поворота машины “на месте”

При расчёте значение статического коэффициента трения в паре “трак гусеницы-опорная поверхность” принято на уровне 0,9, а динамического коэффициента трения на уровне 0,7, т.е. моделируется поворот в “жёстких” условиях (трение между траками гусениц и опорной поверхностью велико).

Полученная в результате расчёта зависимость от времени угла между продольными осями корпусов секций гусеничной машины приведена на рис. 5. На рис. 6 представлена зависимость от времени абсолютного значения момента нагрузки в точке сопряжения ПСУ с корпусом первой секции гусеничной машины.

При виртуальном моделировании переезда машиной единичной неровности высота последней принята 0,4 м, длина по вершине – 3,4 м, по основанию – 4,6 м. Скорость движения машины – $5 \text{ м/с} = 18 \text{ км/ч}$.

Положение частей машины в один из моментов времени в процессе переезда единичной неровности представлено на рис. 7. Зависимость от времени ускорений центров масс корпусов секций машины представлены на рис. 8, а зависимость от времени абсолютного значения момента нагрузки в точке сопряжения ПСУ с корпусом первой секции гусеничной машины – на рис. 9. Начало взаимодействия первой секции машины с неровностью (первое касание трака гусеницы с неровностью) происходит при $t = 3,085 \text{ с}$, а “окончание” переезда (момент, когда обе гусеницы второй секции машины опираются на поверхность дороги) происходит при $t = 6,485 \text{ с}$.

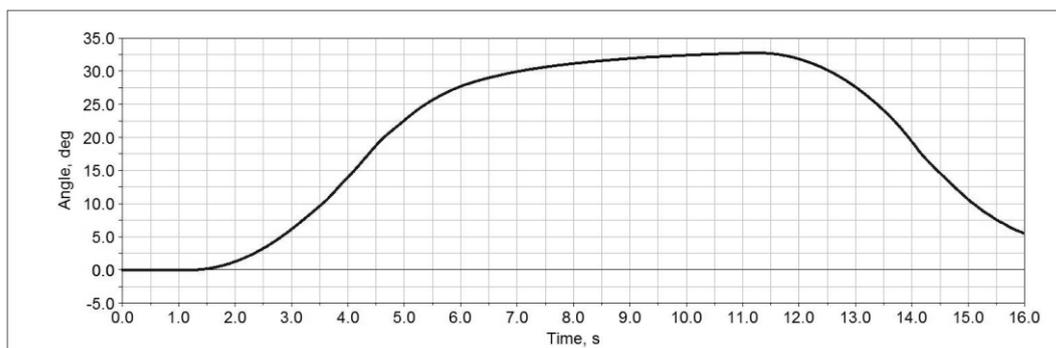


Рис. 5. Зависимость от времени угла между продольными осями корпусов секций гусеничной машины при повороте «на месте»

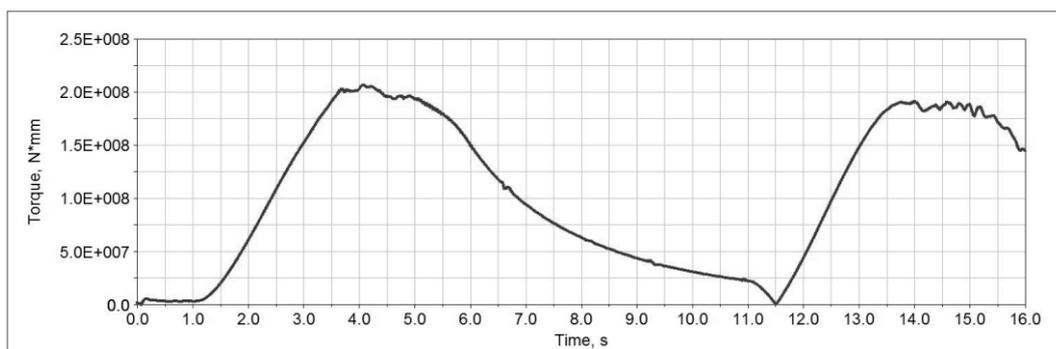


Рис. 6. Зависимость от времени абсолютного значения момента нагрузки в точке сопряжения ПСУ с корпусом первой секции гусеничной машины при повороте «на месте»

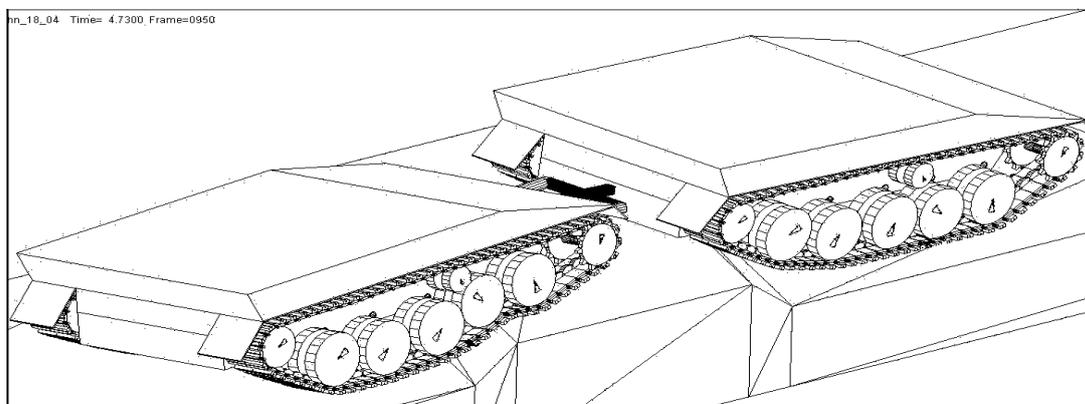


Рис. 7. Переезд двухсекционной гусеничной машиной единичной неровности

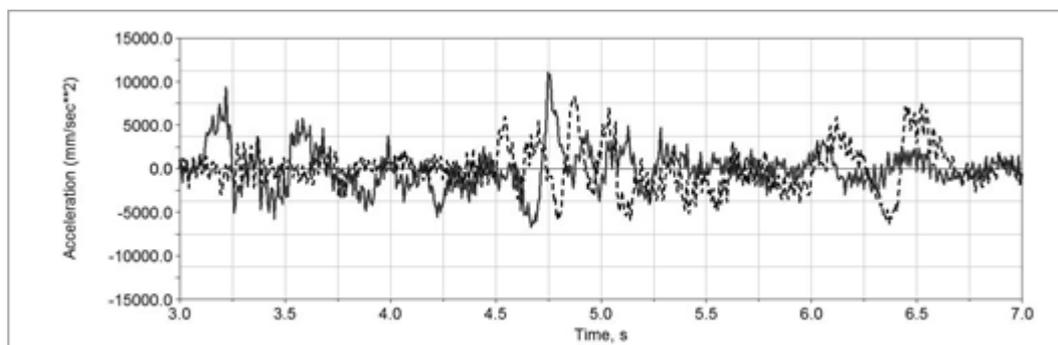


Рис. 8. Вертикальные ускорения центров масс корпусов секций машины (сплошная линия – корпус первой секции, штриховая линия – корпус второй секции)

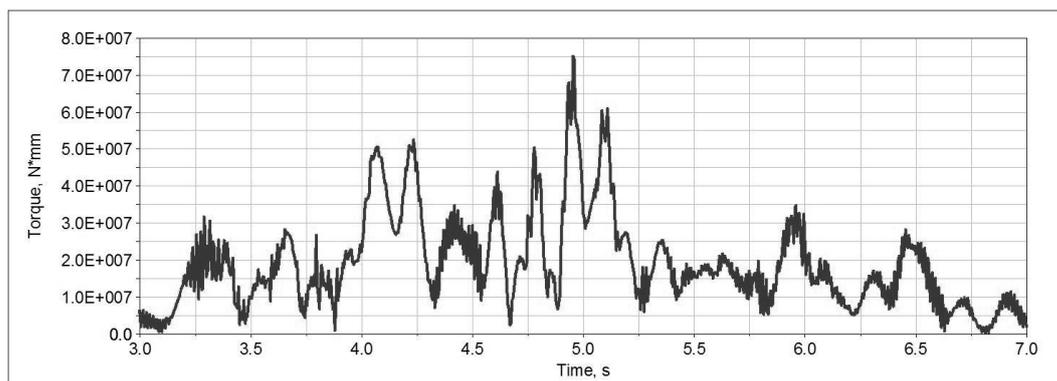


Рис. 9. Зависимость от времени абсолютного значения момента нагрузки в точке сопряжения ПСУ с корпусом первой секции гусеничной машины при переезде единичной неровности

В результате проведённых работ продемонстрирована возможность применения проблемно-ориентированного программного модуля Adams Tracked Vehicle Toolkit для виртуального моделирования двухсекционной гусеничной машины. Применение специализированного программного модуля для автоматизированного виртуального моделирования гусеничных транспортных средств обеспечивает значительную экономию времени на разработку расчётной модели и практически исключает возможные ошибки, которые с большой долей вероятности возникают при создании расчётных моделей большой размерности и насыщенных большим количеством упруго-демпфирующих связей и контактных взаимодействий.

Виртуальное моделирование двухсекционной машины позволяет на раннем этапе разработки оценить нагрузки, действующие на поворотно-сцепное устройство, что дает возможность оптимизировать его конструкцию, обеспечив требуемую прочность и функциональность.

*Дата поступления
в редакцию 20.09.2014*

S.A. Sergievskiy

COMPUTER VIRTUAL SIMULATION OF THE TWO SECTION ARTICULATED TRACKED VEHICLE DYNAMICS

Limited Liability Company “MSC Software RUS”, Moscow

Results of a development of approach to virtual simulation of two-section articulated tracked vehicle by a problem-oriented software Adams Tracked Vehicle Toolkit are presented. The developed approach allows to assess of loads acting on the steering and coupling device of a two-section articulated tracked vehicle.

Key words: two-section articulated tracked vehicle, steering and coupling device, loads, simulation.