

УДК 631.31, 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕСНЫХ МТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ  
ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

Лысыч М.Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Воронежский государственный  
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Email: [miklynea@yandex.ru](mailto:miklynea@yandex.ru)

**Аннотация:** Статья посвящена анализу существующих методов моделирования колесных машинно-тракторных агрегатов с использованием специализированных приложений для инженерных расчетов. Приводятся примеры наиболее интересных исследований. Дается оценка возможностей применения данных методов для решения практических задач.

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, многотельная динамика, имитационное моделирование.

SIMULATION OF WHEEL MACHINE-TRACTOR UNIT USING  
SPECIALIZED APPLICATIONS FOR ENGINEERING CALCULATIONS

Lysych M.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

Email: [miklynea@yandex.ru](mailto:miklynea@yandex.ru)

**Summary:** The article is devoted to the analysis of existing methods for modeling wheeled machine-tractor units using specialized applications for engineering calculations. Examples of the most interesting studies are given. The possibility of using these methods to solve practical problems is assessed.

**Keywords:** machine-tractor unit, multi-body dynamics, simulation.

**Введение**

Все более широкое распространение находят исследования где моделирование движения МТА, и оценка его колебаний и устойчивости производятся с использованием специализированных приложений для инженерных расчетов. В данном направлении наибольшее число исследований относятся к моделированию легковых и грузовых автомобилей [1-3]. Это связано с наличием специализированных приложений, например, Adams Car.

Значительно меньшее количество исследований посвящено моделированию

тракторных МТА [4-11]. Это объясняется тем что возникает необходимость расчета взаимодействий технологического оборудования с почвенной средой и препятствиями, а без учета данного сложно моделируемого принципиального фактора имитационная модель фактически становится аналогичной автомобильной.

Есть также ряд исследований, посвящённых моделированию гусеничных МТА [12-20].

### Цель исследования

Целью исследования является анализ по доступным отечественным и зарубежным литературным источникам существующих подходов к моделированию рабочих процессов МТА осуществляемых с применением приложений для инженерных расчетов и 3D-моделирования.

### Материал и методы исследования

Исследование выполнено на основе изучения научных трудов отечественных и зарубежных ученых и специалистов, занимающихся разработкой и исследованием рабочих процессов МТА с использованием приложений для инженерных расчетов и 3D-моделирования.

### Результаты исследования и их обсуждение

В работе [8] для разработки модели колесного трактора был применен прикладной пакет CaMEL -View, разработанный специалистами фирмы iXtronics GmbH (Германия). Программа использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и предназначена для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации [2, 3].

На рисунке 1 представлено топологическое отображение мехатронной

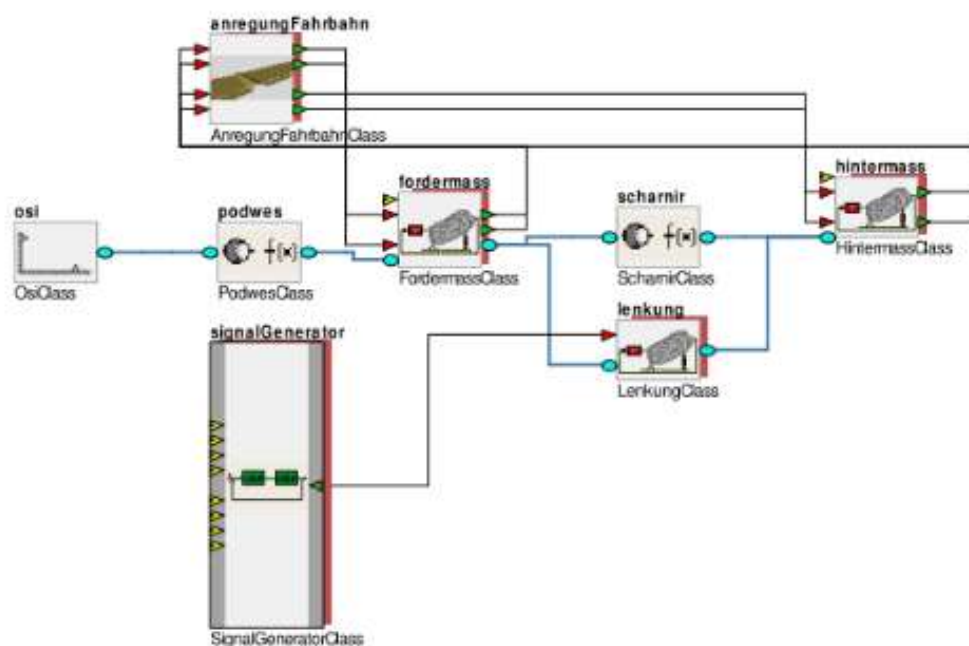


Рисунок 1 – Топологическое отображение модели трактора K-701 Трактор

модели колесного трактора К-701.

На рисунке 2 изображена 3D-модель трактора К-701 созданная в приложении CaMEL -View.

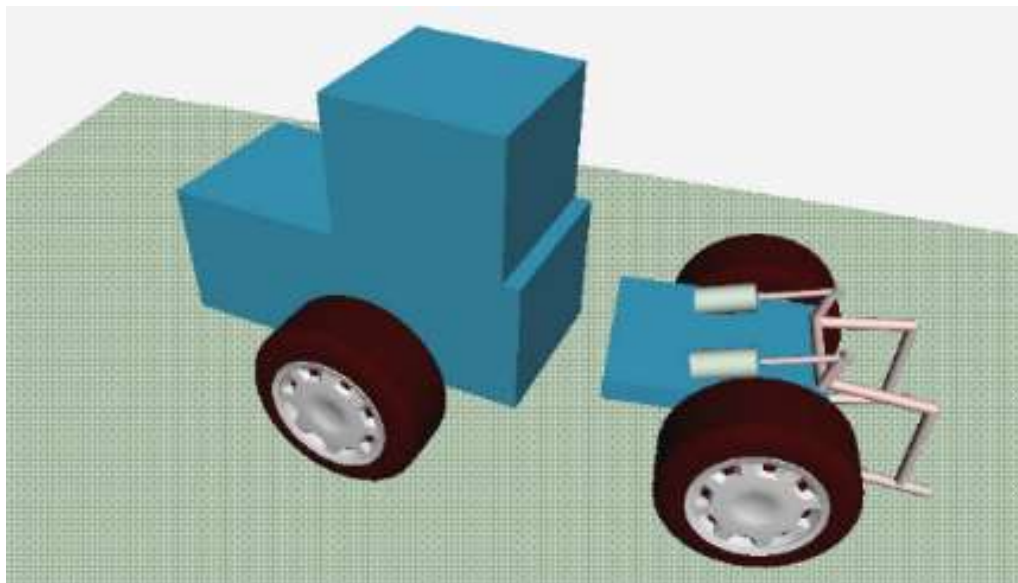


Рисунок 2 – 3D-модель трактора К-701 в CaMEL-View

Достоинством представленной модели является то, что она позволяет определять, как кинематические характеристики тел, входящих в ее состав, так и величины сил взаимодействия между ними. Это позволяет оценить уровень нагруженности отдельных узлов трактора при его работе на различных технологических операциях и произвести при необходимости конструктивные изменения. Следует отметить, что модели, описание которых основано на применении уравнений Лагранжа 2 рода, не позволяют определять внутренние усилия между отдельными составными частями, что является их существенным недостатком.

В исследовании итальянских ученых [6] была описана процедура разработки глобальной имитационной модели сельскохозяйственного трактора включая механическую и гидравлическую системы. Сельскохозяйственный трактор был разделен на три различные подсистемы: трансмиссия, система технологического оборудования и система вспомогательных приводов.

Каждая подмодель на первом этапе была смоделирована в одномерной среде моделирования (LMS-AMESim) и испытана в типичных рабочих циклах, чтобы определить влияние основных конструктивных и эксплуатационных параметров (рис. 3).

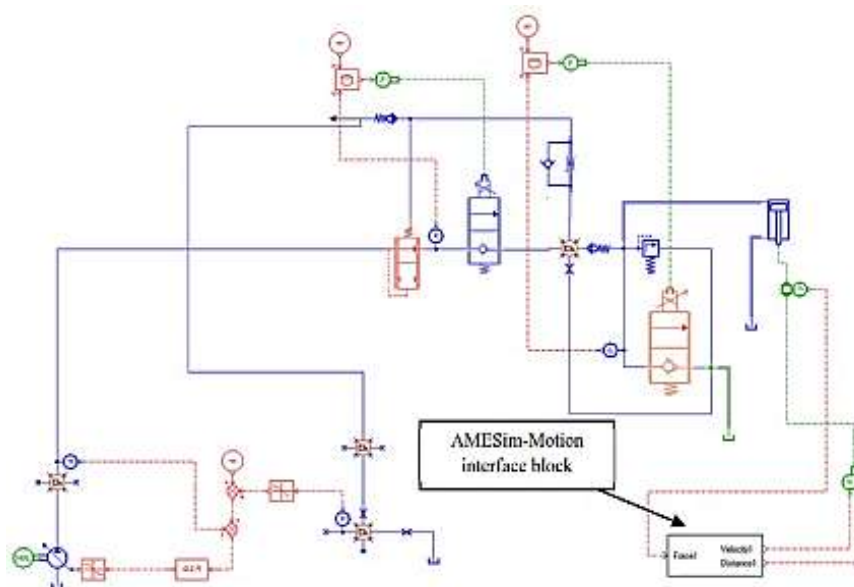


Рисунок 3 – Модель гидравлического контура задней сцепки, сопряженная с многотельной 3D-моделью

На втором этапе использовалось трехмерное программное обеспечение (LMS-Virtual.Lab Motion) для моделирования МТА методами многотельной динамики с заданием инерционных параметров (вес, кинематические ограничения, демпфирование и т. д.), которые игнорировались или искажались в одномерной среде моделирования. При моделировании многотельная среда взаимодействует с одномерной посредством интерфейса LMS Virtual.Lab Motion-AMESim, который позволяет выполнять сопряженное моделирование между трехмерной механической системой, смоделированной в Virtual.Lab Motion и одномерными электрическими, гидравлическими или механическими системами, смоделированными в AMESim (рис. 4).

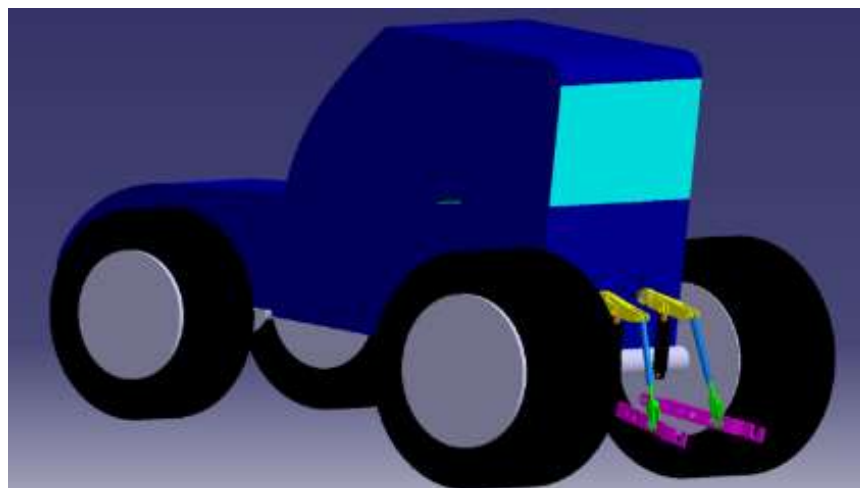


Рисунок 4 – Многотельная модель сельскохозяйственного трактора

На последнем этапе была выполнена полная интеграция моделей, и разработана и изучена интегрированная модель сельскохозяйственного трактора.

В исследовании индийских ученых моделируется рабочий процесс фронтального погрузчика [11]. Данный тип МТА широко применяется для погрузочно-разгрузочных работ и таких операций как выкорчевывание пней и снятие поверхностного слоя грунта, что требует прочностной проверки рамы трактора.

Виртуальное моделирование выполнялось в программе MSC ADAMS. Для этого была создана динамическая модель с трактора с погрузчиком, а рабочий процесс воспроизводился с использованием испытательных нагрузок (рис. 5).

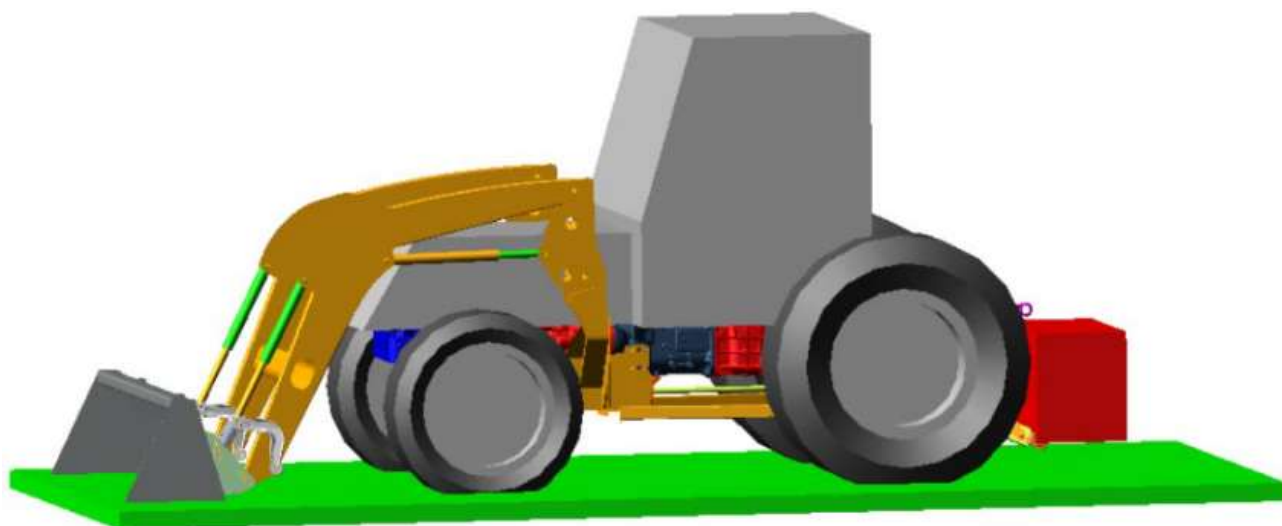


Рисунок 5 – Многодельная модель фронтального погрузчика

Силы и моменты, полученные с применением MBD модели, экспортировались MSC Nastran где проводился прочностной анализ методом конечных элементов (рис. 6).

Проведенные экспериментальные исследования позволили сопоставить физический и виртуальный тесты. Данные полученные с применением виртуального моделирования совпали с экспериментальными на 80-94 %.

В исследованиях корейских ученых направленных на повышение производительности автономного почвообрабатывающего трактора описывается имитационное исследование, проведенное с использованием трехмерного компьютерного симулятора [7]. Модель воспроизводит движение виртуального трактора с буксованием в зависимости от характеристик сцепления с грунтом.

Как показано на рисунке 7, в среде клиента навигации желаемый путь



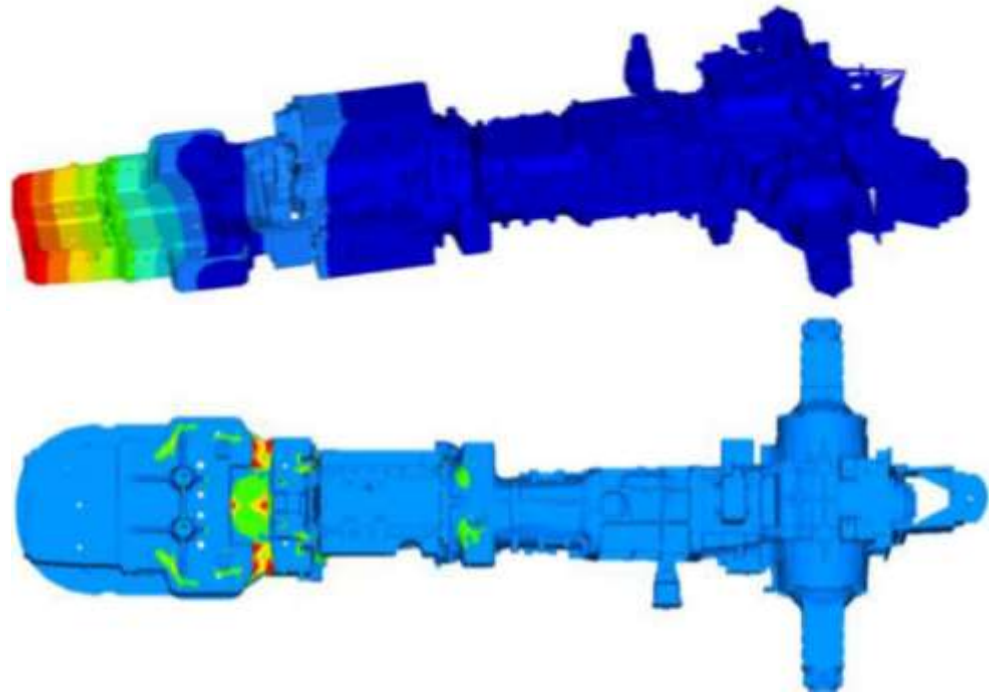


Рисунок 6 – Прочностные исследования рамы трактора

МТА, состоящий из путевых точек ранее сгенерированных с использованием алгоритма планирования пути [21] был наложен на симулятор в качестве целевого положения для трактора. В серверной среде движение виртуального трактора определялось с использованием динамической модели транспортного средства, которая учитывает изменяющуюся боковую силу, действующую на передние и задние шины. Углы поворота и скорости были получены от клиента навигации.

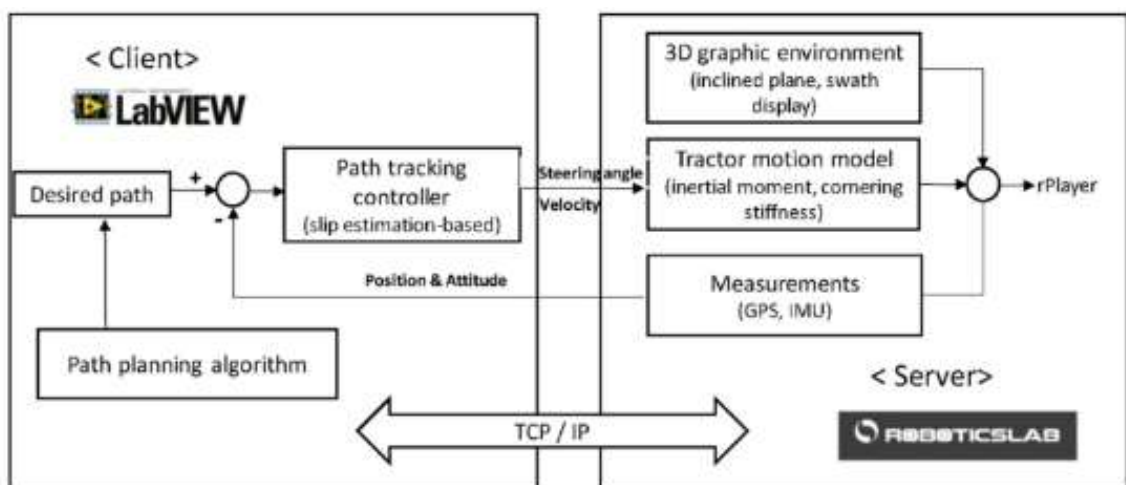


Рисунок 7 – Архитектура симулятора движения МТА состоящего из клиента навигации и сервера движения транспортного средства

Трехмерная графическая среда была реализована путем создания наклонной плоскости (рис. 8).

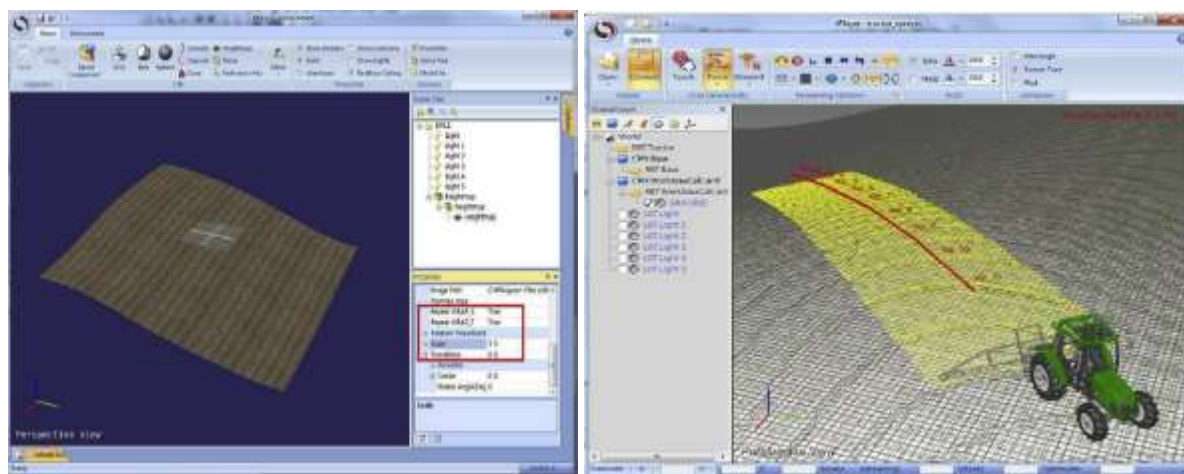


Рисунок 8 – Демонстрация создания трехмерной карты (а) и реализация моделирования (б)

Данная плоскость имитирует пересеченную сельскохозяйственную местность, и отображает рабочие полосы различных агрегатов, прикрепленных к виртуальному трактору (рис. 9).



а – роторный культиватор; б – штанговый опрыскиватель; в – сеялка

Рисунок 9 – Различные сельскохозяйственные орудия использованные при моделировании

### Выводы

Проведенный анализ исследований выявил что интенсивное развитие цифрового проектирования и программных комплексов, позволяющих создавать мультидисциплинарные имитационные модели открывает широкие возможности для моделирования МТА, однако применяемые программные продукты являются коммерческими и не всегда недостаточно полно учитывают специфику взаимодействия движителей и рабочих органов с почвенной средой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00920.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Blundell M., Harty D. Multibody systems approach to vehicle dynamics. 2004. 541 p.
- 2 Ren A. J., Wu Z. C., Bao J. Study on lateral stability of vehicle-trailer system based on multi-body dynamic simulation // Adv. Mater. Res. 2013. Vol. 765-767. P. 345-350.
- 3 Ziel N. Das, Ii D., Testrig C. Domänenübergreifende Modellbildung eines aktiv gefederten Nutzfahrzeugs ( CAMEL-View TestRig ) // Auslegung A Grad. J. Philos. 2006. P. 117-136.
- 4 Moslim E. M. Design of a tractor guidance system using simulation trajectory results of multibody dy: program "DADS" // Retrospect. Theses Diss. 1997. P. 157.
- 5 Gironimo G. DI et al. Simulation of forest harvesting alternative processes and concept design of an innovative skidding winch focused on productivity improvement // Turkish J. Agric. For. 2015. Vol. 39. P. 350-359.
- 6 Bonanno A., Paoluzzi R. Vehicle dynamic simulation for efficiency improvement in agricultural tractors // Proc. 17th Int. Conf. ISTVS. 2011. № August 2014. P. 169-179.
- 7 Han X. et al. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation // Biosyst. Eng. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 178. P. 70-85.
- 8 Поддубный В. И., Павлюк А. С., Warkentin A. Мехатронная модель колесного трактора для исследования устойчивости движения и управляемости // Вестник КрасГАУ. 2008. Vol. 2. P. 228-232.
- 9 Previati G., Gobbi M., Mastinu G. Farm tractor models for research and development purposes // Veh. Syst. Dyn. 2007. Vol. 45, № 1. P. 37-60.
- 10 Prakash K. Tire-soil interaction analysis of forest machines // Master of Science Thesis Industrial Engineering and Management Machine Design. 2014. P. 143.
- 11 Subbaiyan P. B. et al. Method development to virtually validate farm tractor



skid for front end loader application // SAE Tech. Pap. 2019-26-0080. 2019. P. 1-6.

12 Lupyan M., Kuzminov K. Analysing Possible Applications for Available Mathematical Models of Tracked Vehicle Movement Over the Rough Terrain to Examine Tracked Chain Dynamic Processes // Sci. Educ. Bauman MSTU. 2014. Vol. 14, № 11. P. 213-226.

13 Frimpong S. Contact and joint forces modeling and simulation of crawler-formation interactions // J. Powder Metall. Min. 2015. Vol. 04, № 02. P. 1-14.

14 Sojka M., Cornak S. Tracked vehicle movement modelling // Eng. Rural Dev. 2018. Vol. 358. P. 2098-2103.

15 Nicolini A., Mocera F., Somà A. Multibody simulation of a tracked vehicle with deformable ground contact model // Proc. Inst. Mech. Eng. Part K J. Multi-body Dyn. 2018. Vol. 0, № 0. P. 1-11.

16 Omar M. A. Modular multibody formulation for simulating off-road tracked vehicles // Stud. Eng. Technol. 2014. Vol. 1, № 2. P. 77-100.

17 Matej J. Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC.ADAMS/View // Res. Agric. Eng. 2010. Vol. 56, № 1. P. 1-7.

18 Mocera F., Nicolini A. Multibody simulation of a small size farming tracked vehicle // Procedia Struct. Integr. 2018. Vol. 8. P. 118-125.

19 Rubinstein D., Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles // J. Terramechanics. 2004. Vol. 41, № 2-3. P. 163-173.

20 Клубничкин В. Е. et al. Динамическое моделирование движения гусеничной лесозаготовительной машины с использованием прикладных пакетов компьютерных программ // Лесной вестник. 2012. № 8 (91). P. 41-47.

21 Han X. Z. et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field // Comput. Electron. Agric. Elsevier B. V., 2015. Vol. 112. P. 161-171.