

УДК 629.113, 630.377.44

В. Е. Клубничкин<sup>1</sup>, Е. Е. Клубничкин<sup>1</sup>, В.С. Макаров<sup>2</sup>,  
Д.В. Зезюлин<sup>2</sup>, А.В. Редкозубов<sup>2</sup>, В.В. Беляков<sup>2</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН ПО ЛЕСНЫМ ДОРОГАМ

Московский государственный университет леса,<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,<sup>2</sup>

Рассматривается актуальность исследования гусеничных машин при помощи современных средств компьютерного моделирования, позволяющих проводить анализ кинематики и динамики движения. Представлен порядок моделирования гусеничного движителя и машины в целом. Показаны принципы формирования модели полотна пути, а именно кривизны пути, уклонов макропрофиля, микропрофиль, распределение дискретных препятствий, изменение сопротивления движению. Приведены наглядные примеры виртуального эксперимента по движению гусеничной машины в разных условиях.

*Ключевые слова:* гусеничная машина, гусеничный движитель, моделирование, ходовая система

Лес относится к одному из первых, известных человечеству источников древесины топлива, дичи и других продуктов. Древесина и по сей день остается актуальным и не дорогим, не только строительным материалом, но и экологичным возобновляемым источником энергии.

Для лесных машин получили распространение колесные и гусеничные. Несмотря на то, что в последнее время имеется рост числа колесных машин (у них выше за счет более высоких транспортных скоростей), актуальность применения гусеничных машин остается неизменной (более чем 60% территории лесного фонда России почвогрунты слабые, что существенно ограничивает возможность применения машин на колесной базе) [1].

Движитель гусеничной машины состоит из гусеничных лент, включающих в себя большое количество траков шарнирно соединенных друг с другом, опорных и поддерживающих катков, механизмов натяжения, ведущих звезд и является многозвенным сложным механизмом [2, 3]. Моделирование таких систем можно производить аналитически. Но также существуют компьютерные программы, позволяющие производить моделирование кинематики и динамики движения гусеничных машин. Программами, способными реализовать задачи такого рода, являются MSC ADAMS View, ADAMS Tracked Vehicle (ATV) Toolkit и UM Tracked Vehicles (Универсальный механизм) и т.д. [4,5].

Рассмотрим моделирование движения лесозаготовительной гусеничной машины (ГЛЗМ) [6], исследования кинематики, динамики движителя и оценки нагруженности элементов трансмиссии ГЛЗМ при криволинейном и преодолении единичных препятствий со случайным распределением.

Примеры моделирования элементов ходовой системы гусеничной машины в программе UM Tracked Vehicles показано далее. Создание включает в себя выбор структурной схемы гусеничного движителя, здание подвески, добавление ведущего колеса, добавление направляющего колеса, создание модели гусеничной ленты, добавление упругих элементов.

На рис. 1 показана структурная схема гусеничного движителя, а на рис. 2 – общий вид полученной модели с указанием структурных звеньев. Более подробно схема моделирования представлена в работе [6].

Геометрия общего вида остова (корпуса) ЛЗГМ может быть импортирована из программы трехмерного моделирования формы.

Далее задается модель грунта, который будет использоваться при проведении экспе-

риментальных исследований ГЛЗМ. Модель грунта может быть выбрана из базы данных моделей грунтов или задаваться, используя данные о сдвиговых и компрессионных характеристиках. В основе модели взаимодействия катка с гусеничной лентой лежит предположение о пропорциональности силы площади жесткого внедрения. Моделируется взаимодействие катков с гребнями траков. Следующий шаг – это построение модели взаимодействия ведущих звездочек ГЛЗМ с траками гусеничных лент.

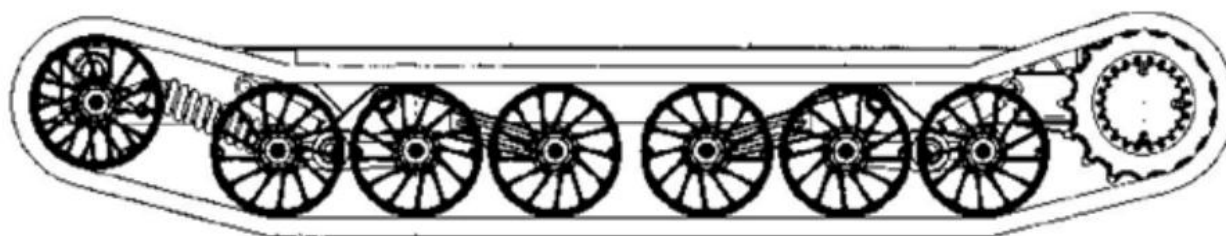


Рис. 1. Структурная схема гусеничного движителя

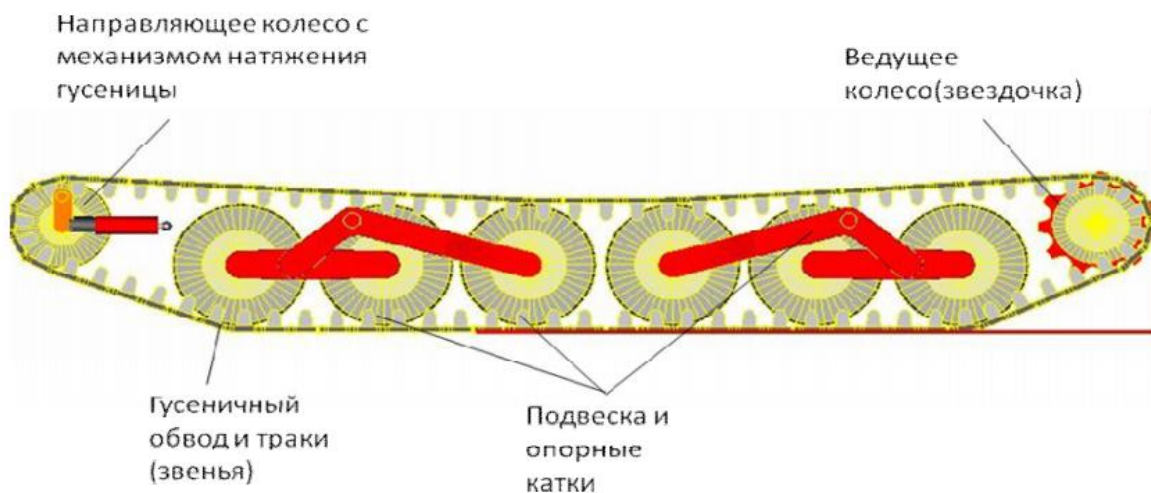


Рис. 2. Общий вид модели гусеничного движителя с указанием структурных звеньев

Распределение вероятностей кривизны пути с достаточной для практических исследований точностью описывается нормальным законом распределения.

Распределение уклонов макропрофиля носит сложный характер, который можно описать многопараметрической зависимостью, включающей части как минимум двух составляющих, имеющих нормальное распределение [7, 8].

Зависимость для расчета распределения будет выглядеть следующим образом:

$$\rho(\alpha_i) = k_1 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_1^2}} + k_2 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_2^2}},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$  – параметры распределения;  $(k_1 + k_2) = 1$ ,  $\alpha_{i(j+1)} = \alpha_{ij} + \Delta\alpha$ ,  $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ ,  $\alpha_i = 0,5(\alpha_{ij} + \alpha_{i(j+1)})$ .

Общепринятыми методами представления неровностей дорожной поверхности как у нас в стране, так и за рубежом являются аппроксимации спектральной плотности микропрофиля дорожного полотна. Функция спектральной плотности характеризует плотность распределения дисперсии процесса по частотам. Она представляет наибольший интерес при анализе случайных процессов, так как содержит одновременно информацию об их частотном и амплитудном составе. Данное распределение носит показательный характер.

Профиль дорог характеризуется спектральной плотностью вида:

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-\omega} \text{ или } \Phi(n) = \Phi(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega},$$

где  $\Omega = \frac{2\pi}{L}$  [рад/м] – волновая (дорожная) частота;  $L$  – длина волны;  $\Phi(\Omega_0)$  – спектральная плотность при  $\Omega_0=1$  рад/м;  $\omega$  – волнистость (волнообразность),  $\omega=2$ ; размерность  $[\Phi(\Omega)] = \text{м}^2/(\text{рад}/\text{м})$ ;  $n = \frac{\Omega}{2\pi}$  – пространственная частота;  $n_0=0,1$  цикл/м. [8].

Моделировать микропрофиль можно в программном комплексе MATLAB/Simulink. На рис. 3 приведена блок-схема модели, позволяющая получать случайные координаты. Блок Band-Limited White Noise (генератор белого шума) служит для создания шумового сигнала с заданной мощностью, равномерно распределенной по частоте. Генератор характеризуется мощностью шума «Noise Power», эталонным временем «Sample time» и числом «Seed», служащим для инициализации генератора случайных чисел. Генератор фактически является квантователем непрерывного сигнала, представляющего белый шум.

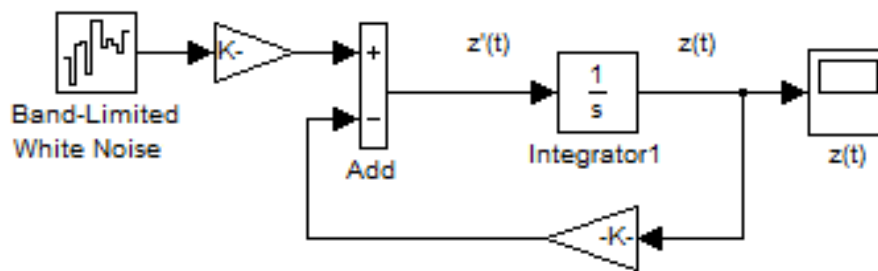


Рис. 3. Блок-схема Simulink-модели

Пример смоделированного микропрофиля показан на рис. 4.

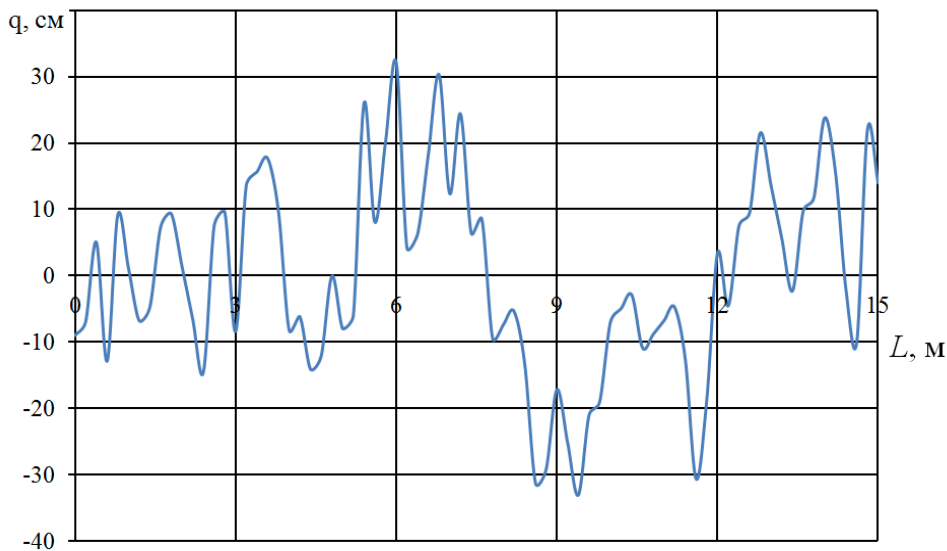


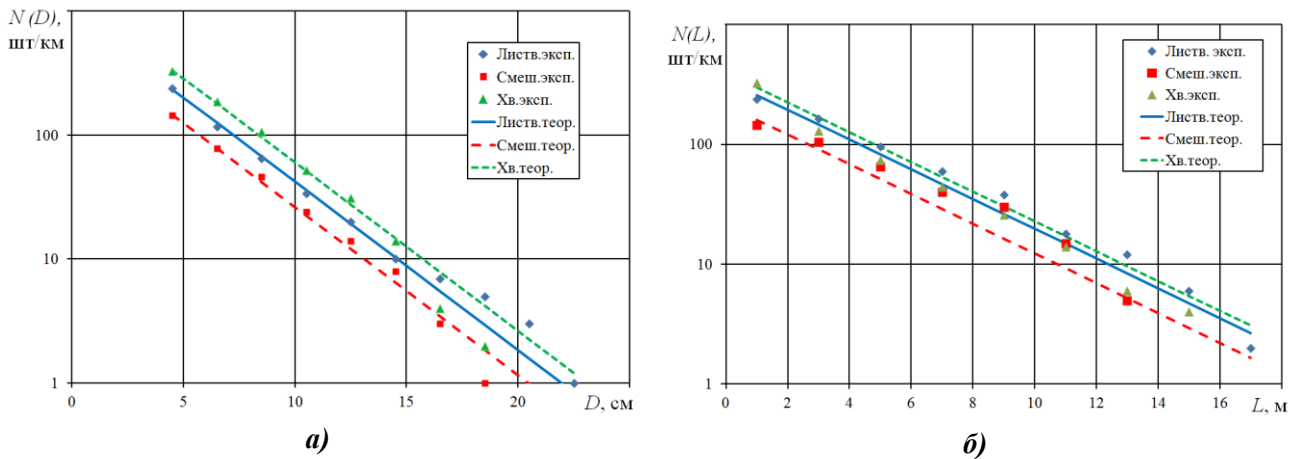
Рис. 4. Блок-схема Simulink-модели

Также на лесных дорогах имеют место дискретные препятствия, такие как многочисленные ветки, упавшие деревья и корневища, причем число таких препятствий со временем увеличивается.

Зависимость числа неровностей (веток, деревьев и корневищ) от их диаметра, а также размеров между ними выражается по:

$$N(x) = \begin{cases} A \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}, & \text{при } x \geq 0, \\ 0, & \text{при } x < 0, \end{cases}$$

где  $A = a \Delta x$ ,  $\lambda, A, a > 0$  – параметры данного распределения;  $\Delta x$  – шаг дискретизации диаметров или размеров между ними;  $x = D$  – диаметр неровности,  $\Delta x = \Delta D$  – шаг дискретизации диаметров;  $N(x) = N(D)$  – число неровностей больше  $D$  при заданных  $D$  и  $\Delta D$ ,  $\lambda = \lambda_D, A = A_D, a = a_D$ . Примеры графиков показаны на рис. 5 [9-11].



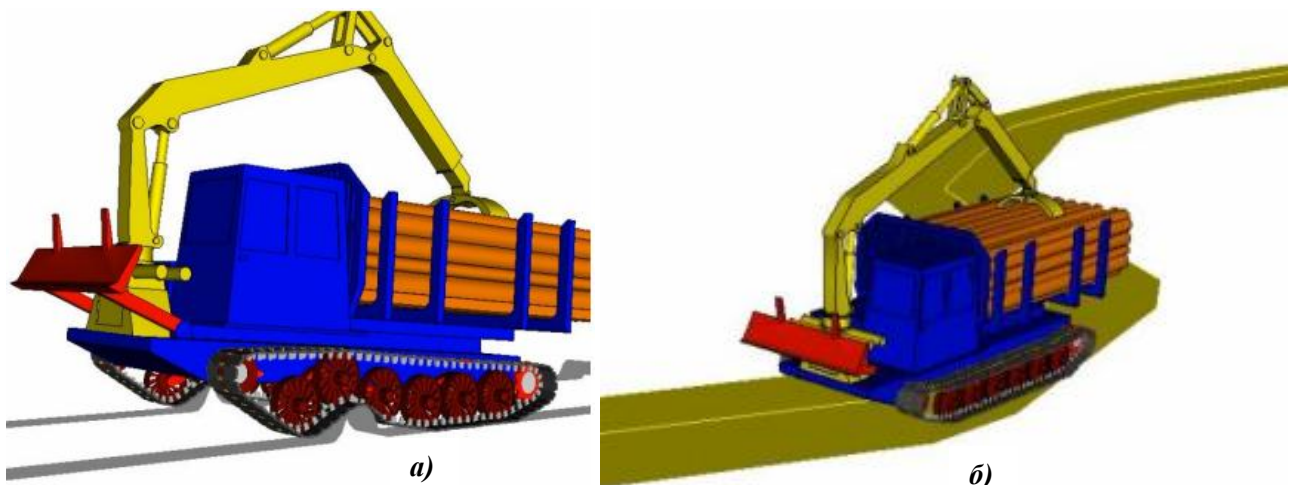
**Рис. 5. Моделирование неровностей лесных дорог:**

*a* – число неровностями больше  $D$  на 1 км пути в зависимости от их диаметров;

*б* – суммарное число расстояний между неровностями больше  $L$  на 1 км пути в зависимости от расстояний между ними

Коэффициент сопротивления прямолинейному движению является определенно положительной случайной величиной [12-14]. Для оценки его плотности вероятностей можно использовать распределение Релея.

Таким образом, смоделировав гусеничный обвод, задав внешний вид и подставив все необходимые условия для моделирования ЛЗГМ, получается виртуальная модель, позволяющая проводить исследования кинематики, динамики движителя и оценки нагруженности элементов трансмиссии. Пример движения гусеничной машины показан на рис. 6.



**Рис. 6. Примеры виртуального эксперимента по движению через дискретные препятствия (а) и криволинейному движению (б)**

Таким образом, зная статистические характеристики грунтовых дорог, по которым эксплуатируются ЛЗГМ, а именно макро (уклоны) и микропрофиль, распределение дискрет-

ных препятствий и поворотов, опорных и сдвиговых характеристик можно достаточно правдоподобно смоделировать полотно пути. Используя пакеты прикладных программ, например UM Tracked Vehicles, можно смоделировать гусеничную машину и оценить необходимые характеристики. Проведение таких испытаний целесообразнее с экономической точки зрения, так как проведение таких виртуальных испытаний дешевле и можно отработать целую гамму конструкций, оценить их подвижность [15-17] и выбрать более эффективные.

### Библиографический список

1. **Григорьев, И.** Достоинства и недостатки колесной и гусеничной баз лесопромышленных тракторов / И. Григорьев, А. Никифорова, В. Лисов // ЛесПромИнформ 2014. №4 (102). С. 82–87.
2. **Клубничкин, Е. Е.** Ходовые системы гусеничных лесозаготовительных машин: учебно-методическое пособие / Е. Е. Клубничкин, В. А. Макуев, В. Е. Клубничкин. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2010. – 110 с.
3. **Wong, J. Y.** Terramechanics and Off -Road Vehicle Engineering / J. Y. Wong, 2nd Edition. – 2009. – 488 p.
4. **Погорелов, Д. Ю.** Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 4. С. 27–34.
5. **Клубничкин, Е. Е.** Динамическое моделирование движения гусеничной лесозаготовительной машины с использованием прикладных пакетов компьютерных программ / Е. Е. Клубничкин [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 8. С. 41–47.
6. **Клубничкин, В.Е.** Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, Л.Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. 2014. Т. 4. № 4 (16). С. 179–190.
7. **Огороднов, С. М.** Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту / С.М. Огороднов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 224.
8. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
9. **Редкозубов, А.В.** математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 348–352.
10. **Макаров, В.С.** Математическая модель поверхности дорожно-грунтовых оснований, насыщенных характерными повторяющимися дискретными препятствиями / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 119.
11. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 113.
12. **Баженов, Е.Е.** Разработка научных методов прогнозирования эксплуатационных свойств сочлененных наземных транспортно-технологических машин: дисс. ... д-ра техн. наук /Баженов, Е.Е. – Екатеринбург, 2011.
13. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, Е.В. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 203 с.
14. Вездеходные транспортно-технологические машины Основы теории движения / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В. В. Белякова и А. П. Куляшова. – Н. Новгород, 2004.
15. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145–174.
16. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.

Дата поступления  
в редакцию 15.01.2016

V.E. Klubnichkin <sup>1</sup>, E.E. Klubnichkin <sup>1</sup>, V.S. Makarov <sup>2</sup>  
D.V. Zeziulin <sup>2</sup>, A.V. Redkozubov <sup>2</sup>, V.V. Belyakov <sup>2</sup>

## MODELING MOVEMENT OF TRACKED VEHICLES ON FOREST ROADS

Moscow state forest university, <sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** Showing an opportunity of research of tracked vehicles with the help of modern means of computer simulation, making possible conducting analysis of kinematics and dynamics of motion.

**Design/methodology/approach:** The order of modeling track mover and the vehicle in general is presented. There are shown the following principles of formation of the model of roads: path curvature, slopes of topography, microprofile, distribution of discrete obstacles, changes of the movement resistance.

**Findings:** Illustrative examples of the virtual experiment of motion of the tracked vehicle in different conditions are given.

**Research limitations/implications:** This study is the basis for further investigation of motion of tracked vehicles on forest roads.

**Originality/value:** The proposed model allows using modern software packages for modeling tracked vehicles in conjunction with the developed model of ground surfaces.

*Key words:* tracked vehicle, caterpillar mover, modeling, chassis system