

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАТОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ<sup>1</sup>

**Орлов Сергей Павлович**

Д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
orlovsp1946@gmail.com

## SIMULATION OF ROBOTIC TRUCK'S UNITS USING DIGITAL TWINS

**S. Orlov**

*Summary:* The article is devoted to the problem of creating robotic trucks for industrial use. The design of such complex vehicles is carried out using digital twins of the main units and components. The structure of a complex model of a robotic chassis is described. The digital twin set of the main systems has been developed: engine, gearbox, transmission, brake system, steering, and suspension. The results of the simulation on the digital twin of the gearbox are presented. The developed models are used both at the design stage and during the operation of robotic vehicles.

*Keywords:* robotic vehicle, simulation, virtual tests, digital twin, gearbox.

### Введение

Современное развитие транспортных систем неразрывно связано с созданием беспилотных и автономных автомобилей. В промышленности, роботизированные грузовые автомобили активно используются при выполнении логистических операций на производственных территориях большой площади [1–3].

Необходимость оснащения роботизированных автомобилей средствами компьютерного зрения, измерительными системами, датчиками, микроконтроллерами привело к разработке информационных систем дистанционного управления, включающих аналитическую систему, базу данных, набор моделей [4–6]. В связи с этим появилась техническая возможность как проведения виртуальных испытаний в процессе проектирования роботизированных автомобилей [7, 8], так и построения комплекса моделей агрегатов и узлов для диагностики и прогноза технических состояний по результатам эксплуатации.

### Модельно-ориентированный подход и виртуальные испытания при проектировании роботизированных автомобилей

При создании системы роботизированных агротехнических автомобилей в рамках проекта с ПАО «КАМАЗ» [9] было использовано модельно-ориентированное проектирование, базирующееся на систематическом

*Аннотация.* Статья посвящена проблеме создания роботизированных грузовых автомобилей промышленного назначения. Проектирование таких сложных транспортных средств проводится с использованием цифровых двойников основных агрегатов и узлов. Описана структура комплексной модели роботизированного шасси. Разработан набор цифровых двойников основных систем: двигателя, коробки переключения передач, трансмиссии, тормозной системы, рулевого управления и подвески. Приведены результаты имитационного эксперимента на цифровом двойнике коробки переключения передач. Разработанные модели используются как на этапе проектирования, так и при эксплуатации роботизированных автомобилей.

*Ключевые слова:* роботизированные автомобили, моделирование, виртуальные испытания, цифровой двойник, коробка переключения передач.

применении моделей подсистем, агрегатов и узлов автомобиля, которые развиваются, уточняются и используются на всех этапах жизненного цикла изделия.

На рис. 1 представлена взаимосвязь между компонентами комплексной модели роботизированного автомобиля, включая обмен информацией между ними [10].

Реализация такого подхода опирается на развитую бортовую информационно-измерительную систему роботизированного автомобиля и телекоммуникационные средства, позволяющие в реальном времени получать и обрабатывать большой объем данных. Наиболее сложными (с точки зрения идентификации) являются модели износа, которые могут быть получены либо эмпирическим путем, либо с помощью гибридных испытаний и инженерных расчетов с учетом всех возможных режимов работы конкретного узла или автомобиля в целом.

Построение комплексной модели дает возможность проведения виртуальных испытаний еще на этапе проектирования автомобиля. Это обеспечивает не только исследование режимов работы агрегатов, но и анализ различных сценариев эксплуатации роботизированных автомобилей. Большую роль играет имитационное моделирование, что позволяет изучать динамику на дискретно-событийных моделях. В частности, для системы агротехнических роботизированных автомобилей были разработаны и успешно использовались иерархические модели на сетях Петри. Эти модели учитывают факто-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00797.



Рис. 1. Компоненты комплексной модели роботизированного автомобиля

ры эксплуатации и фиксируют данные об отклонениях от номинального состояния с учетом процессов деградации и износа агрегатов. Особенно эффективно применение таких моделей для диагностики транспортных средств и организации технического обслуживания и ремонта [11, 12].

Аналитическая система комплексной модели предназначена для обработки информации по конкретному автомобилю, поступающей в базу данных с учетом истории параметров узлов и агрегатов автомобилей. Аналитическая система состоит из трех модулей:

- комплексная модель автомобиля, включающая феноменологические, динамические, статические модели и модели износа узлов, деталей, агрегатов и систем автомобиля;
- дерево отказов (аналитическая модель надежности) с показателями и признаками износа узлов, деталей и агрегатов автомобиля на основании статистических данных автопроизводителей, результатов аналитических расчетов и гибридных испытаний на базе моделей;
- интеллектуальный алгоритм анализа данных о параметрах функционирования автомобиля, снимаемых как со стандартных датчиков систем автомо-

биля, так и с дополнительных сенсоров системы диагностики и прогнозирования технического состояния автомобиля [13].

#### Цифровые двойники агрегатов автомобиля

В рамках создания комплексной модели автомобиля на шасси КАМАЗ 65111 были разработаны цифровые двойники основных агрегатов и систем. Большинство цифровых двойников реализовано с использованием инструментальных средств LMS ImagineLab AMESim фирмы Siemens и MATLAB/Simulink. Пакет для моделирования LMS Imagine.Lab AMESim является частью портфолио Simcenter Siemens PLM Software. Пакет LMS Imagine.Lab AMESim имеет достаточно широкие возможности в сфере моделирования для различного спектра решаемых задач проектирования автомобилей: от уровня моделирования отдельных компонентов и систем объекта «автомобиль» в целом до моделирования различных динамических задач движения. Необходимо отметить, что AMESim содержит ряд специализированных библиотек компонентов, на основе которых можно разрабатывать математические модели легковых и грузовых автомобилей, модели электронных и электромеханических бортовых систем.

В состав комплексной модели входят цифровые двойники следующих узлов и агрегатов:

- двигателя,
- коробки переключения передач КПП,
- трансмиссии,
- тормозной системы,
- системы рулевого управления,
- колес автомобиля,
- подвески.

В настоящей статье в качестве примера приведена модель коробки переключения передач роботизированного шасси КАМАЗ. Настроечные параметры компонентов для параметрического синтеза математической модели роботизированного шасси представлены в таблице 1. В результате была построена модель КПП в системе MATLAB, фрагмент которой показан на рис. 2.

Таблица 1.

Данные для параметрического синтеза модели коробки переключения передач роботизированного шасси КАМАЗ

№ пп	Параметр	Значение
1	Диапазон используемых передач	1–8
2	Номинальный крутящий момент на входе, Н·м	1000
3	Первая передача — передаточное отношение	12,84
4	Вторая передача — передаточное отношение	11,27
5	Третья передача — передаточное отношение	10,13
6	Четвертая передача — передаточное отношение	9,15
7	Время переключения передачи, с	1,2
8	Постоянная времени объекта управления «Переключение передачи — крутящий момент на выходном валу КПП», с	6,3
9	Коэффициент усиления переходной характеристики объекта управления «Переключение передачи — крутящий момент на выходном валу КПП», В/Н·м	1,08

Цифровые испытания интегрированной модели роботизированного шасси проводились для различных сценариев эксплуатации:

Сценарий 1. На модели имитируется движение роботизированного грузового автомобиля по дороге с ровным покрытием без подъемов и уклонов. Устанавливается режим разгона в течение 15 секунд, затем производится торможение до полной остановки. В этот момент устанавливается нейтральная передача и крутящий момент на колеса не передается. Общее время моделирования равно 25 секунд.

Сценарий 2. Данный сценарий предназначен для моделирования движения грузового автомобиля при подъеме в гору с постоянным уклоном в 25 градусов. Время моделирования составляет 25 секунд.

Сценарий 3. В этом сценарии с помощью модели рулевого управления производится имитация смены полосы грузовым автомобилем при движении по горизонтальной поверхности и при относительно установившемся скоростном режиме. Начальная скорость движения — 10 м/с, время моделирования — 20 секунд. Изменение ускорения автомобиля в данном сценарии равно нулю, а скорость — постоянна.

Сценарий 4. Сценарий имитирует движение автомобиля в условиях движения по закруглению дороги. Время моделирования составляет 25 секунд. Автомобиль разгоняется в течение 15 секунд по ровному участку, а затем делает резкий поворот и движется до момента бокового опрокидывания.

**Результаты экспериментов**

Выполненные эксперименты дают большой объем информации о динамике роботизированного автомобиля в разных режимах. В данном пункте проиллюстрированы экспериментальные данные, получен-

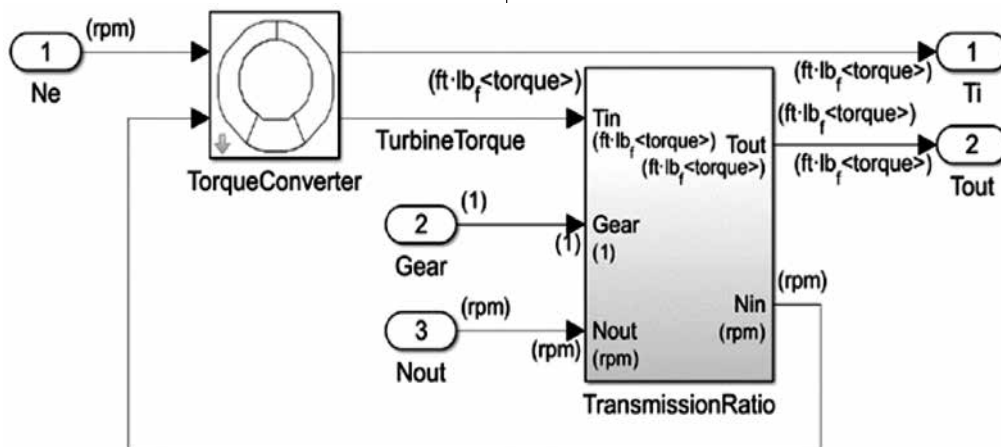


Рис. 2. Модель коробки переключения передач в среде MATLAB

ные в результате моделирования работы коробки переключения передач при реализации сценария 2. Тормозной момент на всех колесах устанавливается равный нулю. Графики изменения частоты вращения, крутящего момента на выходном валу, а также номер передачи в КПП показаны на рис. 3. Падение крутящего момента на выходном валу, зарегистрированное на 4-й секунде, обусловлено сбросом газа при въезде автомобиля в гору.

Графики изменения скорости и ускорения груженого автомобиля приведены на рис. 4 и рис. 5. Из этих графиков видно, что на выходном валу КПП возникают неконтролируемые высокочастотные изменения вращения, что приводит к вибрации и «рывкам» автомобиля. Эти вибрации обусловлены имитацией нарушения режима

в системе зажигания при сбросе газа при подъеме автомобиля в гору.

### Заключение

Разработанные математические и имитационные модели используются на этапах проектирования и производства агрегатов, а затем на этапе эксплуатации для организации технического обслуживания и ремонта роботизированных грузовых автомобилей. Данные, накапливаемые информационной системой при испытании прототипа автомобиля, используются для коррекции или кардинального изменения цифровых двойников.

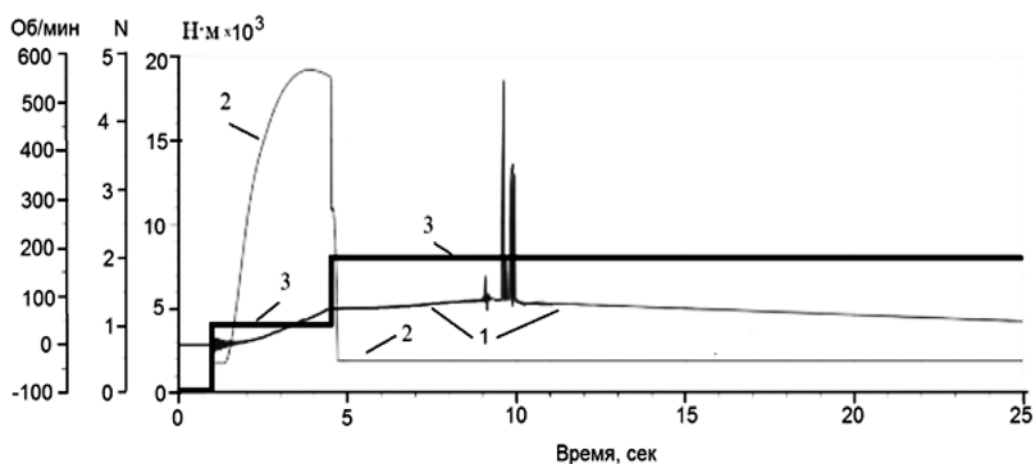


Рис. 3. Графики параметров КПП:

1 — частота вращения выходного вала КПП, об/мин; 2 — крутящий момент М на выходном валу КПП, Н·м; 3 — номер текущей передачи N

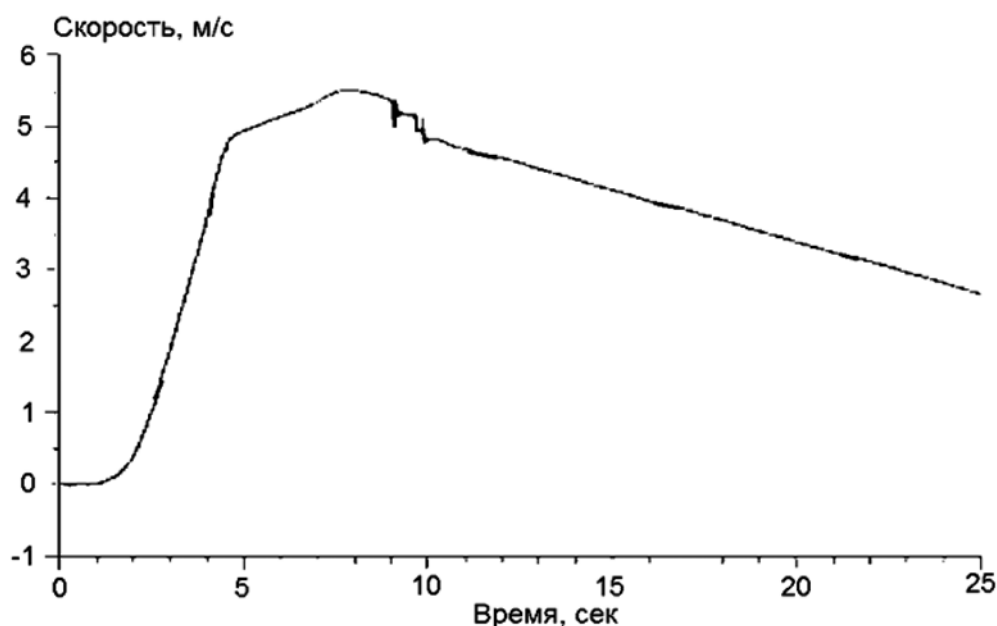


Рис. 4. График скорости движения груженого автомобиля

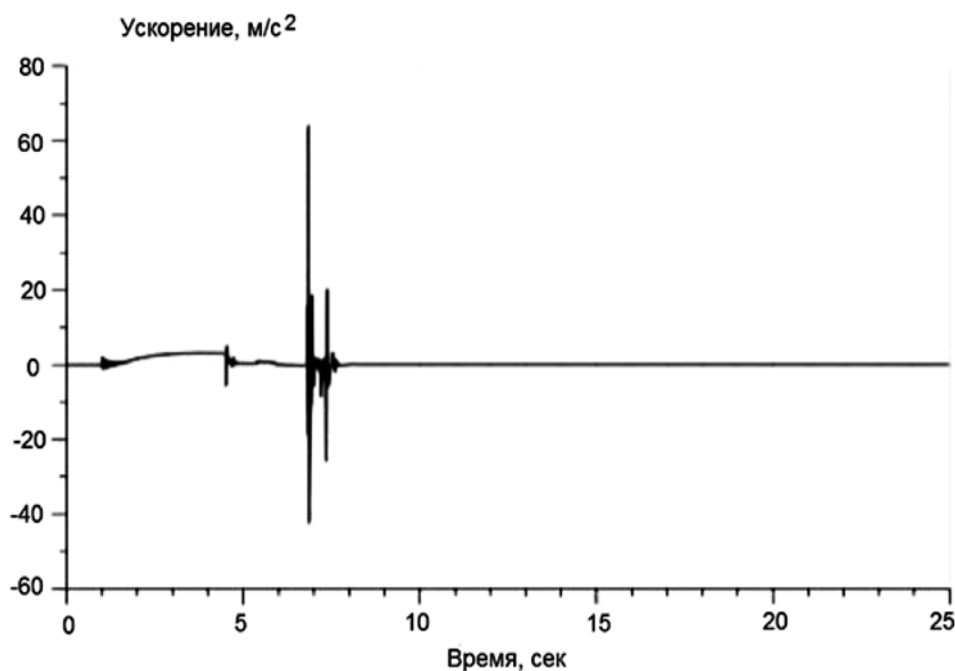


Рис. 5. График ускорения движения груженого автомобиля

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов И.А., Мишарин А.С., Куприяновский В.П., Покусаев О.Н., Куприяновская Ю.В. Роботы, автономные робототехнические системы, искусственный интеллект и вопросы трансформации рынка транспортно-логистических услуг в условиях цифровизации экономики // International Journal of Open Information Technologies. — 2018. — Vol. 6. — No.4. — P. 92–108.
2. Thomasson J.A., Baillie C.P., Antille D.L., Lobsey C.R., McCarthy C.L. Autonomous technologies in agricultural equipment: A review of the state of the art // Proc. of 2019 Agricultural Equipment Technology Conf. (Louisville, Kentucky, USA). — 2019. — P. 1–17.
3. Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B. Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture. London: UK-RAS Network White papers, 2018. — 36 p.
4. Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O. Ya., Morev A.S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1399 (033020). — P. 1–5.
5. Bazhanov A., Vashchenko R., Rubanov V., Bazhanova O. Development of an automated system for monitoring and diagnostics a guided robotic vehicle // In: Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control. — Springer International Publishing, Cham. 2020. — Vol. 259. — P. 93–107.
6. Федотов А.И., Бойко А.В. Математическое моделирование процессов функционирования автомобилей. — Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический ун-т, 2016. — 160 с.
7. Шмелев, А.В. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности / А.В. Шмелев, Э.В. Лисовский, В.С. Короткий // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 3 (32). — С. 64–72.
8. Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». — 2021. — Том 29(1). — С. 46–57.
9. Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В. Принципы построения систем управления роботизированными транспортными средствами с автономным и дистанционным режимом управления // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Самара. — 2019. — Т. 2. — С. 107–110.
10. Susarev S.V., Orlov S.P., Morev A.S., Kravets O.Ja. Digital tests of the robotic chassis' cyber-physical system for agricultural unmanned vehicle // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1399(4), 044032.
11. Орлов С.П., Сусарев С.В. Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». — 2022. — № 30(4). — С. 49–75.
12. Волхонская Е.Е., Орлов С.П. Модель стратегии каннибализации при техническом обслуживании роботизированных автомобилей // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2023. — № 1. — С. 52–56.
13. Губанов Н.Г., Михеев Ю.В., Одинцов В.П., Ахтямов Р.Н., Морев А.С. Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Самара. — 2019. Т.2. — С. 171–174.

© Орлов Сергей Павлович (orlovsp1946@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»