

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОДХОДА СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ ПРИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ АВТОНОМНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

## APPLICATION OF A SYSTEMS ENGINEERING APPROACH IN VIRTUAL TESTING OF AUTONOMOUS VEHICLES

E. Kosareva  
S. Orlov

*Summary.* The article is devoted to the modern approach to the design of transport cyber-physical systems based on the model-based systems engineering. A platform for implementing a digital twin for a system of autonomous agricultural vehicles based on the KAMAZ family is proposed. Digital twins of the system and individual units have been developed. During virtual testing of an autonomous vehicle, various operating scenarios are analyzed. Experiments were carried out on models and the behavior of units was assessed under changing scenarios. The results obtained were used in the design of the robotic chassis of the KAMAZ vehicle.

*Keywords:* autonomous vehicle, system engineering, digital twin, simulation, virtual tests.

**Косарева Екатерина Алексеевна**

Аспирант, ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
katena\_kosareva@inbox.ru

**Орлов Сергей Павлович**

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

*Аннотация.* Статья посвящена современному подходу к проектированию автотранспортных киберфизических систем на основе моделирующей системной инженерии. Предлагается платформа внедрения цифрового двойника для системы автономных сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства «КАМАЗ». Разработаны цифровые двойники подсистем и отдельных агрегатов. В процессе виртуальных испытаний автономного автомобиля анализируются различные сценарии эксплуатации. Проведены эксперименты на моделях и выполнена оценка поведения агрегатов при меняющихся сценариях. Полученные результаты использованы при проектировании роботизированного шасси автомобиля «КАМАЗ».

*Ключевые слова:* автономные автомобили, системный инжиниринг, цифровые двойники, моделирование, виртуальные испытания.

### Введение

Интеллектуальное производство в рамках концепции индустрии 4.0 включает в себя новейшие технологии, такие как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), дополненная реальность (AR), аналитика больших данных, позволяющие осуществлять цифровую трансформацию предприятий [1, 2]. В основе этих технологий лежит концепция создания цифровых двойников как проектируемого технического объекта в целом, так и его отдельных узлов и агрегатов [3, 4]. Современный промышленный автономный или роботизированный автомобиль АА с дистанционным управлением представляет собой сложную киберфизическую систему [5, 6]. Цифровой двойник (ЦД) автономного автомобиля — это инструмент, который отражает физическую систему в виртуальном мире. Он поддерживает непрерывную связь со своим аналогом в реальном мире по информационному каналу. Производители АА могут использовать цифровые двойники для разработки продукта, мониторинга, анализа данных, организации прогнозного технического обслуживания, планировании процессов проектирования продукции и эксплуатации.

В настоящей статье рассматривается применение цифровых двойников в рамках системной инженерии

на основе моделей (MBSE) при проведении виртуальных испытаний на этапе виртуального ввода в эксплуатацию автономных автомобилей [7, 8].

### Модели MBSE

Методология системной инженерии на основе моделей (MBSE — Model-based Systems Engineering) — это подход, который обеспечивает проектирование сложных систем с использованием цифровых двойников. Такой подход направлен на создание моделей предметной области для сохранения информации и обмена данными, при этом применяется компьютерное моделирование для определения функционирования систем на основе свойств, спецификаций и будущего поведения [9]. Системное моделирование эффективно для процессов архитектурного проектирования. Основная цель MBSE — в достижении точности, согласованности, совместимости, отслеживаемости и интеграции на протяжении всего жизненного цикла проектируемой системы.

Основные этапы MBSE при проектировании автономных транспортных средств:

1. Определение требований: на этом этапе команда инженеров и заказчиков определяет требования

к системе автономных автомобилей, которые будут использоваться как основа для дальнейшей разработки.

2. Моделирование архитектуры и подсистем АА: на этом этапе создаются модели архитектуры системы и более детализированные модели каждой подсистемы и агрегата, описывающие их функции, компоненты и взаимодействия.
3. Моделирование прототипов: выполняется проектирование прототипов агрегатов и подсистем АА, которые могут быть использованы для тестирования и проверки.
4. Анализ, проверка и верификация: определение возможных проблем и недостатков в проекте системы.
5. Документирование: на этом этапе команда создает документацию на основе моделей, которая может быть использована для коммуникации с заказчиком, производства и поддержки системы.
6. Реализация: проводится реализация и производство агрегатов и подсистем автономного автомобиля на основе моделей, созданных ранее.
7. Интеграция и тестирование: на этом этапе команда интегрирует компоненты и подсистемы в единую систему и проводит тестирование на предмет функциональности, производительности и безопасности.

8. Внедрение и поддержка: выполняется внедрение автономных автомобилей в производственную среду и обеспечивается поддержка в течение всего жизненного цикла.

Преимущества применения MBSE при создании автономных автомобилей:

1. Улучшение качества: MBSE позволяет обнаруживать проблемы на ранних этапах разработки, что уменьшает вероятность возникновения дефектов в производственном процессе.
2. Ускорение разработки: MBSE позволяет инженерам работать с единой, унифицированной моделью системы, что упрощает процесс разработки и повышает эффективность.
3. Улучшение коммуникации: MBSE позволяет команде легко обмениваться информацией в процессе проектирования.

### Проектирование автономного автомобиля

Подход MBSE поддерживает применение V-модели системной инженерии для разработки проектов. V-модель включает в себя:

- системные требования, основанные на потребностях различных заинтересованных сторон;



Рис. 1. Структура компонентов виртуального запуска в эксплуатацию

- проектирование, интеграцию и тестирование системы;
- процессы верификации и валидации для определения корректности работы и соответствия системы требуемой функциональности.

Использование Модели — V начинается с разработки проекта и завершается его практической реализацией. На рис. 1 показана концептуальная структура автономного автомобиля на базе семейства грузовых автомобилей «КАМАЗ» как информационная зеркальная модель, отображающая продукт в виртуальном пространстве.

При разработке концепции и проекта автономного автомобиля на шасси КАМАЗ [10] и проведении виртуальных испытаний авторы использовали для моделирования системы такой инструмент MBSE, как SysML [11]. На рис. 2 изображен V-цикл проектирования с использованием цифровых и гибридных испытаний.

Процесс виртуальных испытаний использует блок «Имитационное моделирование», в котором реализуется множество тестовых сценариев эксплуатации автономных автомобилей.

### Сценарии виртуальных испытаний автономных автомобилей

Проектируемые автономные автомобили КАМАЗ ориентированы на использование в крупных агропромышленных предприятиях для перевозки грузов: минеральных удобрений, убираемых культур, воды для поливочных станций и т.п. При виртуальных испытаниях для заданных конфигураций полей и транспортной сети формируется набор тестовых сценариев.

Эти сценарии проверяются на цифровом двойнике автономного автомобиля для определения наиболее эффективных режимов работы агрегатов [12]. Кроме того, имитационные модели позволяют исследовать влияние случайных факторов на процесс выполнения производственных работ [13].

### Результаты экспериментов

#### Сценарий 1.

В данном сценарии изучена динамика движения АА при разгоне и торможении на ровной дороге. Время моделирования составляет 25 секунд. Время разгона равно 15 секундам, после чего начинается торможение до полной остановки автомобиля. В ходе процесса тор-



Рис. 2. V— модель проектирования АА

можения крутящий момент не поступает на колеса, при этом в коробку передач передается сигнал о переходе на нейтральную передачу.

Некоторые графики изменения характеристик движения грузового автомобиля в данном сценарии представлены на рис. 3.

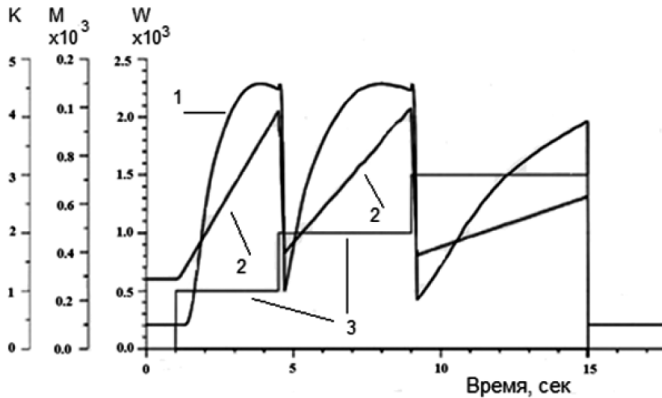


Рис. 3. Характеристики двигателя: 1 — крутящий момент  $M$  на валу двигателя,  $Nm$ ; 2 — частота вращения  $W$  вала двигателя, об/мин; 3 — сигнал  $K$  переключения передач в КПП

Сценарий 2.

Сценарий предназначен для моделирования движения грузового автомобиля при подъеме в гору с постоянным уклоном в 25 градусов. Время моделирования составляет 25 секунд. Графики изменения крутящего момента на валу двигателя, частоты вращения и передачи в КПП показаны на рис. 4.

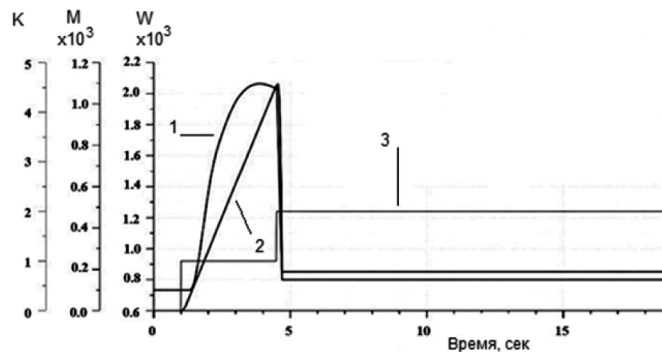


Рис. 4. Характеристики двигателя: 1 — крутящий момент  $M$  на валу двигателя,  $Nm$ ; 2 — частота вращения  $W$  вала двигателя, об/мин; 3 — сигнал  $K$  переключения передач в КПП

Сценарий 3.

В этом сценарии производится имитация объезда автономным автомобилем препятствия при движении

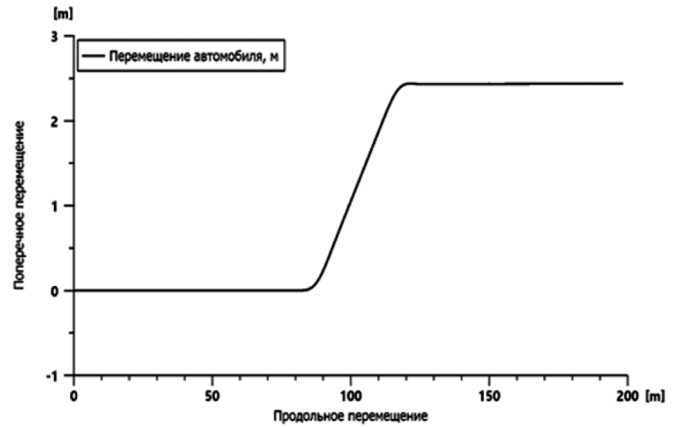


Рис. 5. Траектория центра масс автономного автомобиля в горизонтальной плоскости движения

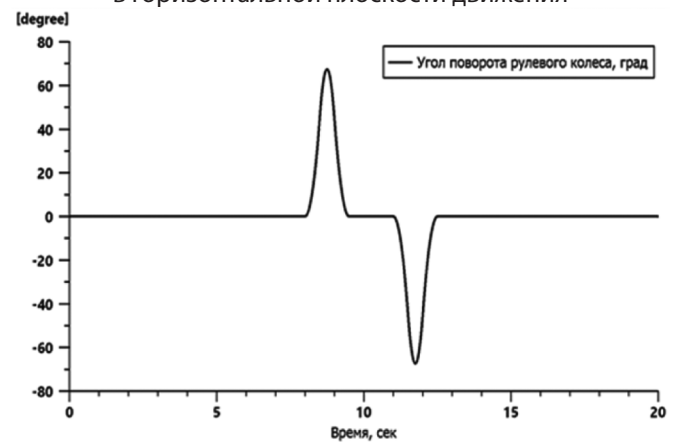


Рис. 6. График угла поворота рулевого колеса

по горизонтальной поверхности и при установившемся скоростном режиме. Управление при этом выполняется только с помощью рулевого механизма. Начальная скорость движения — 10 м/с, время моделирования — 20 секунд. Изменение ускорения  $AA$  в этом случае равно нулю, а скорость — постоянна. Траектория центра масс автомобиля представлена на рис. 5. Тормозная система в этом сценарии не применяется, поэтому тормозной момент на колесах во время движения равен нулю. График изменения угла поворота рулевого колеса представлен на рис. 6.

Заключение

Предложенный подход обеспечивает выявление на ранних стадиях проектирования автономного автомобиля наиболее эффективных режимов работы основных агрегатов с учетом случайных факторов. К ним относятся: процессы деградации элементов и узлов, возникновение дефектов и отказов, изменение условий эксплуатации автономных транспортных средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития// Стратегии бизнеса. — 2018. — №6 (50). — С.57–63.
2. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison//In IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 3585–3593.
3. Lu Y., Liu C., Wang K.I.-K., Huang H., Xu, X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues// Robot. Comput. Integr. Manuf. — 2020. — Vol. 61, 101837.
4. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review// Adv. Manuf. — 2021. — Vol. 9. — P. 1–21.
5. Saad A., Faddel S., Mohammed O. IoT-Based Digital Twin for Energy Cyber-Physical Systems: Design and Implementation// Energies. — 2020. — Vol. 13, 4762.
6. Yang W., Yoshida K., Takakuwa S. Digital Twin-Driven Simulation for a Cyber-Physical System in Industry 4.0 Era// In Daaam International Scientific Book. DAAAM International Vienna: Vienna, Austria. — 2017. — P. 227–234.
7. Yildiz E., Møller C., Bilberg A. Virtual Factory: Digital Twin Based Integrated Factory Simulations// Procedia CIRP. — 2020. — Vol. 93. — P.216–221.
8. Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». — 2021. — Том 29(1). — С. 46–57.
9. Siemens. Digital Industries Software. Системный подход к разработке беспилотных автомобилей. URL: <https://resources.sw.siemens.com/ru-RU/white-paper-autonomous-vehicles> (дата обращения 03.02.2024).
10. 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. — С. 107–110.
11. SysML. Systems Modeling Language (SysML) Specification. 2005. URL: <https://sysml.org/.res/docs/specs/SysML—v0.9-PDF-050110R1.pdf> (дата обращения: 26.01.2024).
12. Орлов С.П. Моделирование агрегатов роботизированного грузового автомобиля с помощью цифровых двойников// Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2023. — №5. — С.88–92.
13. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств// Известия Санкт-Петербургского гос. технолог. ин-та (технического университета). — 2021. — № 58(84). — С. 98–104.

© Косарева Екатерина Алексеевна (katena\_kosareva@inbox.ru); Орлов Сергей Павлович (orlovsp1946@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»