

УДК 004.942

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО ВВОДА В ПРОИЗВОДСТВО РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ

С.П. Орлов, Е.Е. Бизюкова, А.Е. Яковлева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Аннотация. Создание роботизированных автомобилей сельскохозяйственного назначения является перспективным направлением в автомобилестроении. Сложность конструкции беспилотного грузового автомобиля, работа в тяжелых условиях эксплуатации, наличие большого числа измерительных устройств и подсистем обработки данных делают актуальным создание системы виртуальных испытаний. Данные испытания являются частью общего процесса виртуального ввода в эксплуатацию роботизированного автомобиля. В статье рассматривается комплекс подсистем, которые обеспечивают проведение виртуальных испытаний на основе модели ориентированного подхода: подсистема математического моделирования, подсистема имитации измерений, информационная подсистема с базами данных. Разработаны метрологические модели измерительных каналов для виртуальных испытаний, которые позволяют имитировать случайные изменения параметров автомобиля и погрешности измерения. Процесс тестирования охватывает все важнейшие агрегаты роботизированного автомобиля. В качестве примера рассматривается динамическая модель тормозной системы шасси КАМАЗ и приведены результаты виртуальных испытаний режимов торможения. Разработанная система виртуальных испытаний используется при создании грузового автомобиля КАМАЗ в составе роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей.

Ключевые слова: системный анализ, беспилотные автомобили, виртуальный ввод в эксплуатацию, виртуальные испытания, моделирование, информационные системы, автоматическое управление.

Введение

Создание роботизированных транспортных средств охватывает новые области применения. Одно из перспективных направлений, активно развиваемое в настоящее время, – разработка роботизированных автомобилей (РА) сельскохозяйственного назначения [1–6]. Фирма ПАО «КАМАЗ» в кооперации с Самарским государственным техническим университетом реализует проект создания роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства КАМАЗ с автономным и дистанционным режимами управления [7, 8].

Орлов Сергей Павлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Вычислительная техника».

Бизюкова Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Яковлева Анастасия Евгеньевна, аспирант кафедры «Вычислительная техника».

Такая система обуславливает повышенные требования к надежности агрегатов роботизированных автомобилей, которые следует обеспечивать уже на стадии проектирования отдельных агрегатов.

Решение этой задачи сталкивается с рядом проблем, вызванных сложными условиями эксплуатации автомобилей при работе на некачественном покрытии полевых дорог. Современный подход к управлению жизненным циклом (PLM) включает в себя базовую компоненту – виртуальный ввод изделия в эксплуатацию (Virtual Commissioning) [9–12]. Виртуальный ввод в эксплуатацию охватывает широкий спектр задач: от создания концепции и конструкции роботизированного автомобиля до проектирования производственных линий и цехов.

При разработке роботизированного автомобиля КАМАЗ было предложено использовать модели-ориентированный подход к проектированию кибер-физических систем, базирующийся на широком использовании математических и имитационных моделей [13–16]. В то же время из-за невозможности получения полностью адекватных моделей агрегатов автомобиля необходимая информация выявляется с помощью натуральных испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла.

В настоящей статье рассматривается подход, связанный с использованием виртуальных моделей агрегатов автомобиля и виртуальных испытаний. Виртуальные испытания [17, 18] являются составной частью более общего процесса – виртуального ввода в эксплуатацию сложных технических объектов. С одной стороны, виртуальная модель агрегата позволяет на ранних этапах проектирования выявить несоответствие требованиям к основным эксплуатационным характеристикам. С другой стороны, виртуальные испытания автомобиля также позволяют выполнить отладку производственных процессов и проектирование производственных линий.

Управление виртуальными испытаниями агрегатов автомобиля

Проведение физических экспериментов по испытаниям агрегатов, систем и всего автомобиля – достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс, занимающий значительное время. Это обстоятельство ограничивало число проводимых испытаний с уже изготовленными агрегатами автомобиля. Цифровизация производства и развитие информационных технологий позволяют сочетать натурные испытания агрегатов и подсистем автомобиля с имитацией их испытаний на компьютере. Такой подход сокращает объем физических испытаний и затраты на эксплуатацию комплекса испытательного оборудования. Кроме того, появляется возможность исследования таких режимов и сценариев работы автомобиля, которые не были охвачены ранее.

В состав системы виртуальных испытаний входят следующие основные компоненты:

- подсистема математического моделирования агрегатов;
- подсистема планирования эксперимента;
- подсистема имитации погрешностей установки параметров и измерений;
- подсистема визуализации процесса испытаний и документирования.

Общая структура системы виртуальных испытаний представлена на рис. 1. Методологической основой является экспертная система, содержащая базу знаний математических моделей агрегатов и интерфейс специалиста-аналитика. В базе знаний реализована онтология предметной области автомобильных агрегатов

с ориентацией на шасси КАМАЗ, которая используется в сочетании с методом поиска моделей. Экспертная система обеспечивает вывод решений на основе новых фактов, получаемых при виртуальных испытаниях.

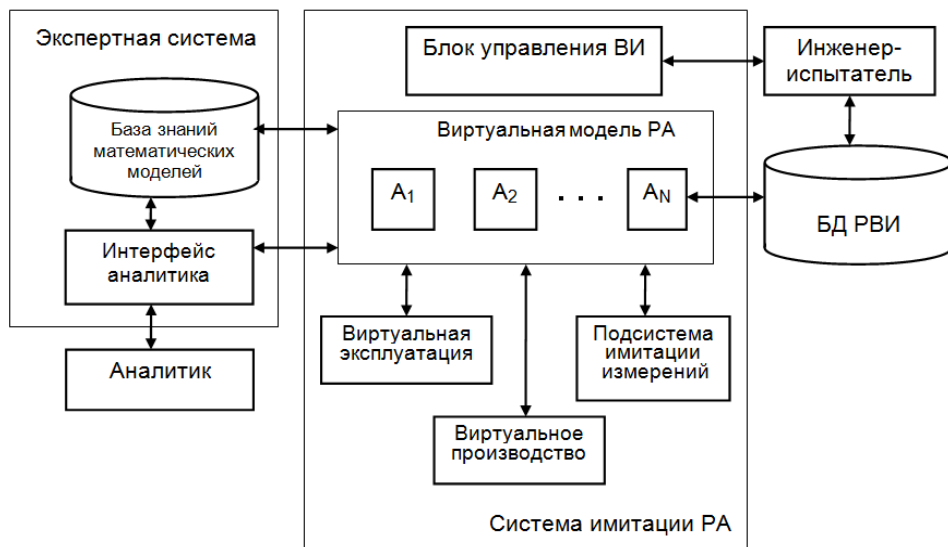


Рис. 1. Общая структура системы виртуальных испытаний агрегатов:
 A_1, A_2, \dots, A_N – модели агрегатов; БД РВИ – база данных результатов виртуальных испытаний;
 РА – роботизированный автомобиль

Одна из важных задач – идентификация математической модели по результатам виртуальных испытаний. Идентификация математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов по значениям измеряемых величин в процессе. В результате формируется математическая модель исследуемого экземпляра агрегата, согласованная с экспериментальными данными. Эта информация передается в базу знаний экспертной системы.

Подсистема планирования эксперимента предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: например, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента.

Набор виртуальных моделей A_1, A_2, \dots, A_N агрегатов роботизированного автомобиля РА выбирается в подсистеме планирования эксперимента и может модифицироваться в процессе испытаний.

База данных результатов виртуальных испытаний (БД РВИ) обеспечивает запись, хранение и визуализацию информации о проведенных испытаниях.

Система имитации ориентирована на работу в двух режимах:

1. Виртуальная эксплуатация – имитация воздействий на агрегат условий движения: дорожного покрытия, внешней среды (температуры, влажности, осадков), а также режимов работы автомобиля: перевоз груза, порожний пробег, буксировка и т. п.

2. Виртуальное производство – имитация производственных процессов изготовления агрегатов с учетом изменений проектных параметров по результатам виртуальных испытаний.

Роль инженера-испытателя заключается в задании режимов работы системы имитации в целом, контроле над ходом виртуальных испытаний, формировании отчетной документации. Аналитик обеспечивает функционирование экспертной системы, проводит изменение математических моделей, модифицирует правила вывода по результатам испытаний.

Структура информационной подсистемы и алгоритм виртуальных испытаний

Информационная подсистема представляет собой совокупность баз данных: базы знаний математических моделей агрегата и базы данных результатов виртуальных испытаний.

База знаний математических моделей является составной частью подсистемы математического моделирования агрегата и хранит информацию о математических моделях узлов, агрегатов и систем автомобиля. На основе этих моделей проводятся имитационные испытания, проектный расчет агрегата и расчет его эксплуатационных характеристик.

База данных результатов виртуальных испытаний БД РВИ содержит следующую информацию:

- название модели и типа агрегата автомобиля;
- серийный номер;
- конструктивные особенности агрегата;
- год производства и сертификации;
- производитель агрегата;
- основные технические характеристики;
- история виртуальных и натуральных испытаний, проводившихся с данным экземпляром агрегата.

Алгоритм виртуальных испытаний представляет собой последовательность этапов:

1. Осуществляется выбор типа и модели i -го агрегата и передача соответствующей математической модели из базы знаний в систему имитации РА.

2. Исходные параметры агрегата и данные об условиях эксплуатации передаются в подсистему математического моделирования, где совместно с математической моделью они составляют виртуальную модель агрегата A_j .

3. В подсистеме планирования эксперимента выбирается задача испытаний, проводится расчет характеристик агрегата и выполняется виртуальный эксперимент с имитацией случайных девиаций значений определенного набора параметров.

4. Выполняется имитация измерений параметров агрегата со случайными погрешностями в измерительных каналах, соответствующих реальным измерительным устройствам роботизированного автомобиля.

5. На основании полученных результатов имитационного эксперимента выполняется идентификация математической модели агрегата.

6. В случае значительного расхождения аналитик принимает решение о модификации исходной математической модели. После этого возможно повторение п. 2.

7. После проведения виртуального эксперимента данные заносятся в БД РВИ и формируется протокол испытаний. На основе этих данных строятся различные диаграммы, иллюстрирующие различные взаимозависимости параметров агрегата.

Имитация измерительных процессов при виртуальных испытаниях

Качество и адекватность моделей во многом определяются возможностью имитировать факторы, имеющие случайный характер: внешние воздействия окружающей среды, отклонения параметров агрегата от проектных значений. В результате появляется возможность учета индивидуальных особенностей каждого конкретного экземпляра агрегата, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления блока цилиндров, сборки кривошипно-шатунного механизма, коленчатого вала и т. п.). Значительное влияние оказывает и неточность измерения параметров испытываемого агрегата. В разработанной системе виртуальных испытаний используется подсистема имитации погрешностей установки параметров и измерений, которая служит для приближения модели к реальным условиям эксплуатации (рис. 2).

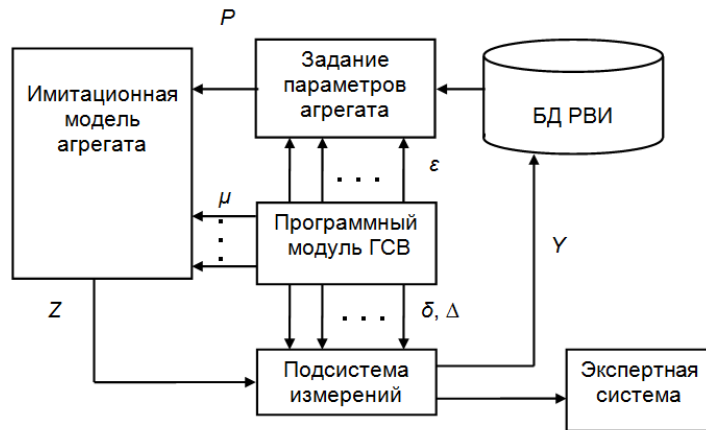


Рис. 2. Имитация погрешностей установки и измерения параметров агрегата:
БД РВИ – база данных результатов виртуальных испытаний;
ГСВ – генерация случайных величин

Номинальный вектор результатов виртуальных испытаний

$$Y_D = F(X, P, W),$$

где P – вектор параметров режимов работы агрегата;
 X – вектор измеряемых характеристик;
 W – множество внутренних состояний агрегата.

Вектор результатов при имитации случайных воздействий на агрегат:

$$Y_{IM} = F(Z(\delta, \Delta), P(\varepsilon), W(\mu)),$$

где ε – отклонения параметров P агрегата от номинальных значений;
 μ – отклонения внутренних состояний агрегатов от номинальных значений;
 δ, Δ – мультипликативные и аддитивные погрешности измерительных каналов.

Анализ метрологических характеристик измерительных каналов подсистемы имитации измерений проводится с использованием метрологической модели, связывающей функции преобразования, мультипликативные погрешности δ и аддитивные погрешности Δ по методике, представленной в работах [19, 20]. На рис. 3

приведена структурная схема метрологической модели линейного измерительного канала.

Номинальная функция преобразования некоторого параметра X определяется выражением

$$X^{\text{НОМ}} = X \prod_{i=1}^K S_i,$$

где S_i – функции преобразования (коэффициенты чувствительности) измерительных устройств;

X – входной сигнал.

Тогда общая случайная погрешность измерения ε равна разности между номинальной величиной и реально измеренным значением:

$$\varepsilon = X^{\text{НОМ}} - X_{\text{ИЗМ}}.$$

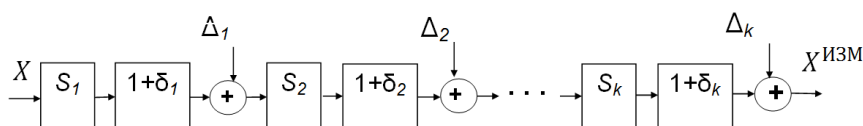


Рис. 3. Структурная схема измерительного канала для метрологической модели

Реально измеряемое значение $X_{\text{ИЗМ}}$ зависит от величины мультипликативных δ_i и аддитивных Δ_i составляющих погрешностей:

$$X_{\text{ИЗМ}} = (S_1(1 + \delta_1) + \Delta_1)(S_2(1 + \delta_2) + \Delta_2) \dots (S_k(1 + \delta_k) + \Delta_k). \quad (1)$$

Предполагая, что произведения погрешностей δ_i и Δ_i имеют пренебрежимо малые значения, получим следующие выражения для общей мультипликативной погрешности δ и общей аддитивной погрешности Δ :

$$\delta = \sum_{i=1}^K \delta_i, \quad (2)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^K \left(\Delta_i \prod_{j=1}^K S_j \right). \quad (3)$$

Случайный закон распределения общей погрешности задается путем генерации вероятностных характеристик величин δ_i и Δ_i в формулах (2) и (3). Более сложные измерительные каналы, имеющие параллельно-последовательную структуру, описываются суперпозицией выражений вида (2) и (3).

Подсистема имитации измерений соответствует физической измерительной системе роботизированного шасси на базе модифицированной модели КАМАЗ 65119.

Полный набор контролируемых параметров включает:

- скорость (м/с);
- переключение передач (-1 (R), 0 (N), 1...7 (D));
- обороты двигателя (об/мин);
- температуру охлаждающей жидкости (°C);

- давление масла ($^{\circ}\text{C}$);
- давление в первом и втором контурах (кПа);
- напряжение бортовой сети (В);
- предупреждения об ошибках, поступающие от двигателя, трансмиссии и EBS;
- направление движения (градус);
- угол поворота колес (градус);
- состояние (system ready – готовность к запуску двигателя);
- координаты нахождения автомобиля: *lat* (широта); *lon* (долгота).

Моделирование тормозной системы роботизированного шасси КАМАЗ

Виртуальные испытания проводились с большим числом видов агрегатов автомобиля, поэтому в данной статье для примера приводятся результаты моделирования тормозной системы. Моделирование агрегатов выполнялось в среде MATLAB/Simulink.

В роботизированном шасси КАМАЗ установлена тормозная система Wabco Standard. Виртуальные испытания проводились с учетом работы подсистем тормозной системы:

- ABS – антиблокировочная система;
- ASR – антипробуксовочная система;
- EBD – система распределения тормозных усилий;
- EBA – система экстренного торможения.

Функциональная динамическая модель тормозной системы приведена на рис. 4. Результаты моделирования приведены на рис. 5, где показан коэффициент проскальзывания $\rho(t)$ колеса при торможении с использованием ABS и без ABS.

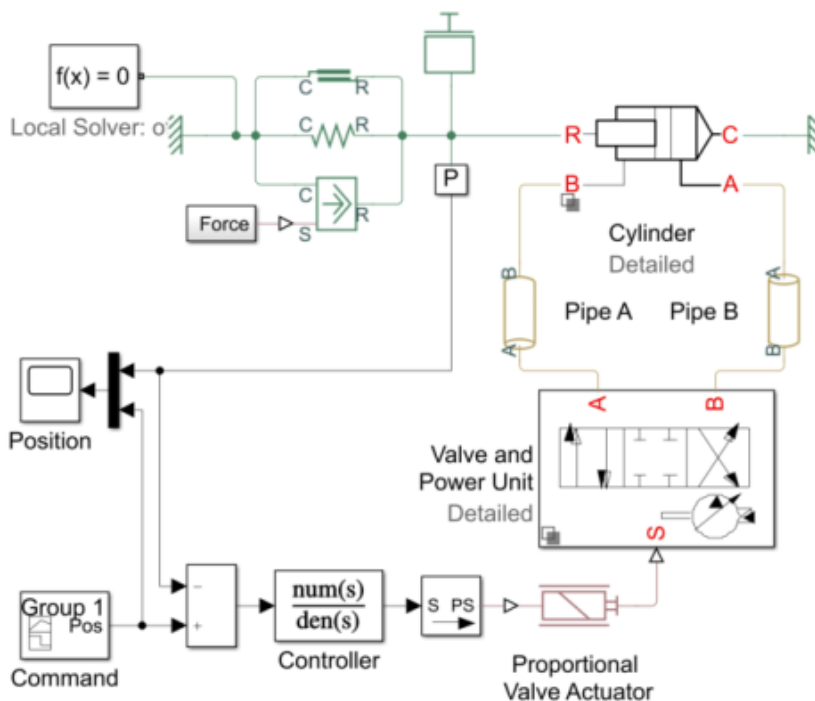


Рис. 4. Модель тормозной системы

На рис. 6 представлены графики угловой скорости вращения $R(t)$ колеса и линейной скорости автомобиля $V(t)$ в двух режимах.

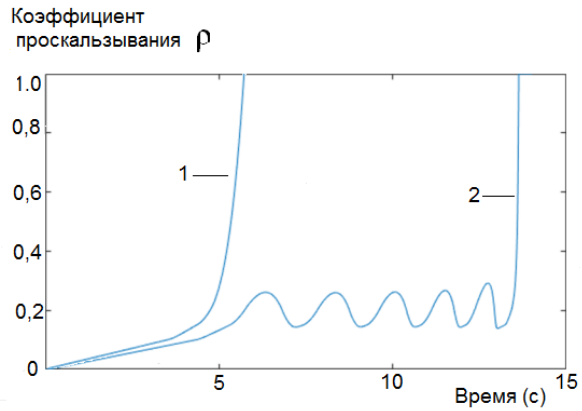


Рис. 5. Коэффициент проскальзывания колеса $\rho(t)$:
1 – без ABS; 2 – с ABS

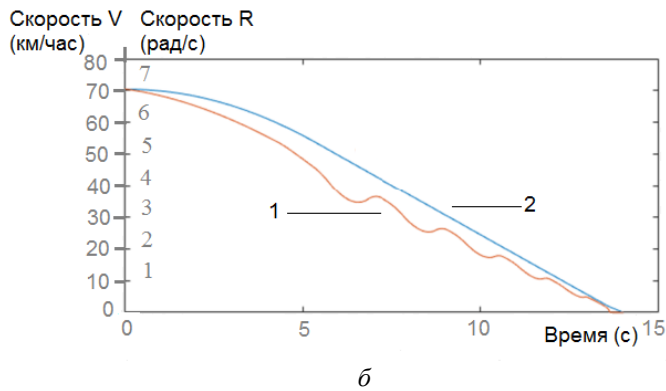
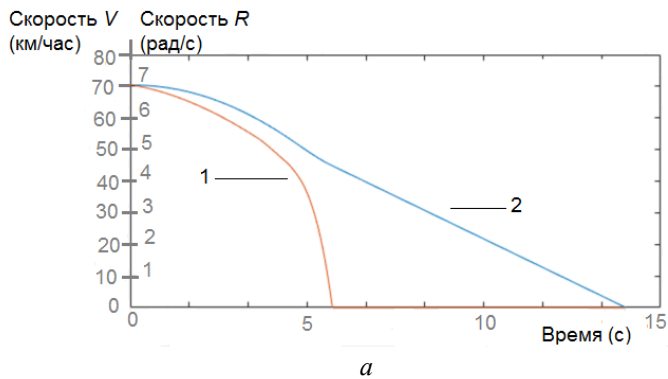


Рис. 6. Скорость автомобиля V и угловая скорость вращения колеса R :
 a – без ABS; b – с ABS;
1 – скорость колеса; 2 – скорость автомобиля

С целью определения параметров настройки модели проводились натурные эксперименты для режимов торможения на различных поверхностях. Контроль дорожной поверхности на экспериментальном автомобильном шасси выполнялся с помощью ультразвукового датчика, установленного под днищем автомобиля [21]. За счет определения времени и фазы отраженного сигнала была получена информация о степени шероховатости профиля покрытия, которая в дальнейшем использовалась для расчета коэффициентов модели.

В результате анализа модельных экспериментов было выявлено, что при работе ABS время скольжения с заблокированными колесами уменьшается в 2,4 раза. При этом время движения автомобиля до остановки практически совпадает для обоих режимов и равно 14 с. Важно отметить, что в режиме с ABS сохраняется степень управляемости рулем, что имеет особое значение для беспилотного автомобиля.

Полученные результаты моделирования движения при торможении обеспечивают проектирование «электронной педали», управляющей роботизированным автомобилем при перемещении по полевым дорогам.

Заключение

Разработка комплекса моделей агрегатов роботизированного автомобиля и проведение виртуальных испытаний значительно сокращают период от концептуального проектирования до создания экспериментального образца автомобиля. Виртуальные испытания агрегатов выявили некорректные проектные решения и неучтенные факторы, влияющих на процесс эксплуатации.

Дальнейшее развитие системы виртуальных испытаний связано с разработкой методов и алгоритмов виртуальных сценариев эксплуатации роботизированного автомобиля в различных условиях. Полученная информация будет обрабатываться с использованием метода оценки эффективности Data Envelopment Analysis (DEA) [22]. Это позволит на ранних этапах определять планируемые остаточные ресурсы агрегатов и прогнозировать их надежность. В рамках виртуального ввода в эксплуатацию полученные результаты будут положены в основу организации системы технического обслуживания и ремонта роботизированных сельскохозяйственных автомобилей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B.* Agricultural robotics: The Future of robotic agriculture. UK-RAS Network White papers. London. 2018. 36 p.
2. *Tsiropoulos Z., Spyro F., Liakos V., Tekin A.V., Aygun T., Blackmore S.* Web-based Farm Management Information System for Agricultural Robots. Proceedings of EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation." Turin. 2013. Pp. 1–8.
3. *Thomasson J.A., Antille D.J., Baillie C.P., Lobsey C.R., Maccarthy C.L.* Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art. Proceedings of the 2019 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA. 2019. Vol. 40. Pp. 1–17.
4. *Behere S., Torngren M.* A functional architecture for autonomous driving. Information and Software Technology. 2015. Vol. 73. Pp. 1–8.
5. *Emmi L., Gonzalez-de-Soto M., Pajares G., Gonzalez-de-Santos P.* New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots. The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 404059. 21 p.
6. *Billingsley J., Visala A., Dunn M.* Robotics in Agriculture and Forestry. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1065–1077.
7. *Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гащенко Ю.В.* Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом

- управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. – Т. 2. – Самара: Офорт, 2019. – С. 107–110.
8. 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). Pp. 1–5.
 9. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
 10. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
 11. Siemens. Virtually commission your automation systems prior to launch <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/virtual-commissioning.html> (accessed December 8, 2020).
 12. SIMIT – Simulation Platform for Virtual Commissioning. <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10166253/info/> (accessed December 10, 2020).
 13. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Gubanov N.G., Sidorenko K.V. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System. *Proceedings of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*. Tomsk: Polytechnic University Publishing House. 2019. Pp. 469–474.
 14. Daigle M. Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (accessed February 15, 2009).
 15. Schulte P.Z., Spenser D.A. On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations. *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress (IAC)*, Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
 16. Berrada J. Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
 17. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2015. – № 3 (32). – С. 64–72.
 18. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2011. – № 3(27). – С. 326–331.
 19. Шлыков Г.П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности. – Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2008. – 100 с.
 20. Орлов С.П., Ахполова Е.А., Уютова О.Ю. Метрологическая модель измерительных каналов ИИС контроля оптико-электронного преобразователя // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): Труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова*. – Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2017. – С. 142–146.
 21. Kavitha C., Ashok B., Nanthagopal K., Desai R., Rastogi N., Shetty S. Braking distance algorithm for autonomous cars using road surface recognition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 263 (062034). Pp. 1–15.
 22. Susarev S.V., Orlov S.P. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919 (052056). Pp. 1–7.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

VIRTUAL TESTS OF ROBOTIC VEHICLE UNITS FOR VIRTUAL COMMISSIONING

S.P. Orlov, E.E. Bizyukova, A.E. Iakovleva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Abstract. *The creation of robotic vehicles for agricultural purposes is a promising direction in the automotive industry. The complexity of the self-driving truck's design, work in difficult operating conditions, and a large number of measuring devices and processing subsystems determine the relevance of creating a virtual test system. These tests are part of the overall virtual commissioning process for a robotic vehicle. The article discusses a set of basic subsystems that provide virtual tests based on a model-based approach: mathematical modeling, measurement modeling, information subsystem with databases, visualization and documentation subsystem. Metrological models of measuring channels for virtual tests have been developed, allowing simulating random vehicle parameter changes. The testing process covers all the most essential components of a robotic vehicle. For example, the article presents a dynamic model of the braking system of a robotic chassis and shows the results of braking modes' virtual tests. The developed virtual test system is used to create a KAMAZ truck as part of a robotic system for agricultural vehicles.*

Keywords: *system analysis, self-driving vehicle, virtual commissioning, virtual tests, simulation, information systems, automatic control.*

REFERENCES

1. Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B. Agricultural robotics: The Future of robotic agriculture. UK-RAS Network White papers. London. 2018. 36 p.
2. Tsiropoulos Z., Spyro F., Liakos V., Tekin A.V., Aygun T., Blackmore S. Web-based Farm Management Information System for Agricultural Robots. Proceedings of EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation." Turin. 2013. Pp. 1–8.
3. Thomasson J.A., Antille D.J., Baillie C.P., Lobsey C.R., Maccarthy C.L. Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art. Proceedings of the 2019 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA. 2019. Vol. 40. Pp. 1–17.
4. Behere S., Torngren M. A functional architecture for autonomous driving. Information and Software Technology. 2015. Vol. 73. Pp. 1–8.
5. Emmi L., Gonzalez-de-Soto M., Pajares G., Gonzalez-de-Santos P. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots. The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 404059. 21 p.
6. Billingsley J., Visala A., Dunn M. Robotics in Agriculture and Forestry. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1065–1077.
7. Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Iu.V. Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes. Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: Trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. Samara: Ofort, 2019. Vol. 2. Pp. 107–110.
8. 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). Pp. 1–5.
9. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.

*Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Elizaveta E. Bizyukova, Younger Scientific Researcher.
Anastasia E. Iakovleva, Postgraduate Student.*

10. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
11. Siemens. Virtually commission your automation systems prior to launch <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/virtual-commissioning.html> (accessed December 8, 2020).
12. SIMIT – Simulation Platform for Virtual Commissioning. <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10166253/info/> (accessed December 10, 2020).
13. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Gubanov N.G., Sidorenko K.V. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System. Proceedings of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019). Tomsk: Polytechnic University Publishing House. 2019. Pp. 469–474.
14. Daigle M. Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (accessed February 15, 2009).
15. Schulte P.Z., Spenser D.A. On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations. Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
16. Berrada J. Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art. Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
17. Shmelev A.V., Lisovskii E.V., Korotkii V.S. Fundamentals of the virtual simulation technique for testing truck cabins in accordance with passive safety requirements. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2015. № 3 (32). Pp. 64–72.
18. Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Yu. The concept of building a virtual laboratory for testing a gas turbine engine. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2011. № 3(27). C. 326–331.
19. Shlykov G.P. Measurement theory: equations, models, accuracy estimation. Penza: Publisher PGU, 2008. 100 p.
20. Orlov S.P., Akhpolova E.A., Uutova O.Yu. Metrological model of measuring channels of IMS control of an optical-electronic converter. Perspektivnye informatsionnye tekhnologii “PIT 2017”: Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Samara: Publishing House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017. Pp. 142–146.
21. Kavitha C., Ashok B., Nanthagopal K., Desai R., Rastogi N., Shetty S. Braking distance algorithm for autonomous cars using road surface recognition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 263 (062034). Pp. 1–15.
22. Susarev S.V., Orlov S.P. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919 (052056). Pp. 1–7.