

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАКТОРА В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

С.С. Шадрин, Д.А. Макарова, Ю.М. Фурлетов

Московский Политехнический Университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Представленная работа посвящена разработке и валидации комплексной методики оценки точности траекторного управления беспилотного трактора в условиях виртуальных испытаний. Актуальность исследования обусловлена повышением требований к точности выполнения сельскохозяйственных операций, где даже сантиметровые отклонения могут приводить к существенным агротехническим и экономическим потерям. Существующие подходы, часто ограничивающиеся оценкой среднеквадратического отклонения, не обеспечивают полного анализа динамических характеристик системы управления.

Научная новизна работы заключается в: 1) формализации алгоритма определения боковых отклонений на основе построения перпендикуляра к азимуту касательной эталонной траектории, обеспечивающего корректные измерения на криволинейных участках; 2) разработке набора из восьми взаимодополняющих статистических показателей, позволяющих проводить многокритериальный анализ ошибки, включая ее распределение, максимальные значения, систематическое смещение и интегральное накопление вдоль пути; 3) адаптации методики для применения в среде цифрового двойника на базе Simcenter Prescan и Matlab Simulink.

Методика была апробирована на виртуальной модели беспилотного трактора. Результаты испытаний подтвердили высокую точность системы на прямолинейных участках (СКО до 1.4 см при 15 км/ч) и выявили закономерное

ухудшение точности на поворотах (СКО до 3.0 см) с ростом скорости движения. Анализ показал отсутствие значительного систематического смещения, указав на динамическую природу основных ошибок. На основе полученных данных определены оптимальные скоростные режимы для различных агротехнологических операций.

Разработанная методика демонстрирует эффективность как инструмент детальной диагностики и валидации систем траекторного управления на этапе виртуальных испытаний, способствуя оптимизации алгоритмов и снижению затрат на натурные испытания. Подход является универсальным и может быть применен для оценки автономных мобильных роботов и транспортных средств различного назначения.

Ключевые слова: беспилотный трактор, траекторное управление, виртуальные испытания, цифровой двойник, Simcenter Prescan, боковое отклонение, распределенное тестирование, RTK-GNSS.

ВВЕДЕНИЕ

Переход к автономным сельскохозяйственным системам предъявляет повышенные требования к точности выполнения технологических операций. Для таких процессов, как посев, внесение удобрений или междурядная обработка, отклонение от заданной траектории всего в несколько сантиметров может привести к значительным агротехническим и экономическим потерям – образованию огрехов, повреждению культур, перерасходу материалов [1, 2]. В связи с этим, объективная и всесторонняя оценка точности траекторного управления становится критически важной задачей на этапах разработки, отладки и валидации систем управления беспилотных машин.

Традиционно точность следования по траектории характеризуется таким показателем, как среднеквадратическое отклонение (СКО). Однако, как показывают исследования, данный показатель, будучи полезным для общей оценки, не всегда отражает полную картину [3]. Две системы управления могут

иметь идентичное СКО, но при этом демонстрировать принципиально разное поведение: одна – с редкими, но значительными выбросами ошибки, другая – с постоянными малыми отклонениями. Для инженера-разработчика критически важно понимать не только «сколько» система ошибается в среднем, но и «как» она это делает: характер распределения ошибки, ее максимальные значения, наличие систематического смещения и то, как ошибка накапливается по мере прохождения маршрута [4].

Особую актуальность эта проблема приобретает в контексте виртуальных испытаний, которые становятся неотъемлемой частью жизненного цикла разработки сложных киберфизических систем [5, 6]. Цифровые двойники позволяют проводить тысячи тестовых прогонов в контролируемых и воспроизводимых условиях. Но ценность этих испытаний напрямую зависит от качества и глубины методик анализа получаемых данных.

Существующие подходы к оценке точности, описанные в литературе, часто фокусируются на отдельных аспектах, таких как статическая ошибка позиционирования или отклик на ступенчатое воздействие [9]. В то же время, комплексные методики, позволяющие оценить динамическую точность следования по протяженным нелинейным траекториям, характерным для сельскохозяйственных работ, представлены недостаточно.

Целью данного исследования является разработка и апробация комплексной методики оценки точности траекторного управления беспилотным трактором, обеспечивающей многокритериальный анализ ошибки следования по траектории в условиях виртуальных испытаний.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен и формализован алгоритм определения боковых отклонений, основанный на построении перпендикуляра к азимуту касательной эталонного трека для каждой его точки, что обеспечивает высокую корректность измерений на криволинейных участках.

2. Разработан комплекс из восьми взаимодополняющих статистических показателей, позволяющих проводить детальный анализ точности не только в статике, но и в динамике, учитывая накопление ошибки вдоль пути.

3. Методика адаптирована для применения в виртуальных испытательных средах и валидирована на цифровом двойнике беспилотного трактора, демонстрируя свою эффективность для диагностики системных проблем алгоритмов управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процедура проведения виртуальных испытаний

Объектом исследования выступала система управления беспилотного трактора. Испытания проводились на виртуальном стенде, представляющем собой интеграцию программного комплекса Simcenter Prescan и Matlab Simulink. Данная платформа обеспечивала моделирование динамики трактора, его навигационной системы (GNSS/RTK, IMU) и окружающей среды с высокой степенью достоверности (рис.1).

Виртуальный полигон представлял собой модель сельскохозяйственного поля с грунтовым покрытием. Для испытаний был сгенерирован эталонный маршрут, включающий прямолинейные участки и повороты с радиусами от 5 до 20 метров, что соответствует типичным маневрам агрегата в полевых условиях. Эталонный трек был представлен в виде массива точек в системе координат UTM (Universal Transverse Mercator) с шагом 0.5 метра. Каждая точка содержала координаты (X_{utm} , Y_{utm}) и азимут касательной к траектории ($heading_i$).

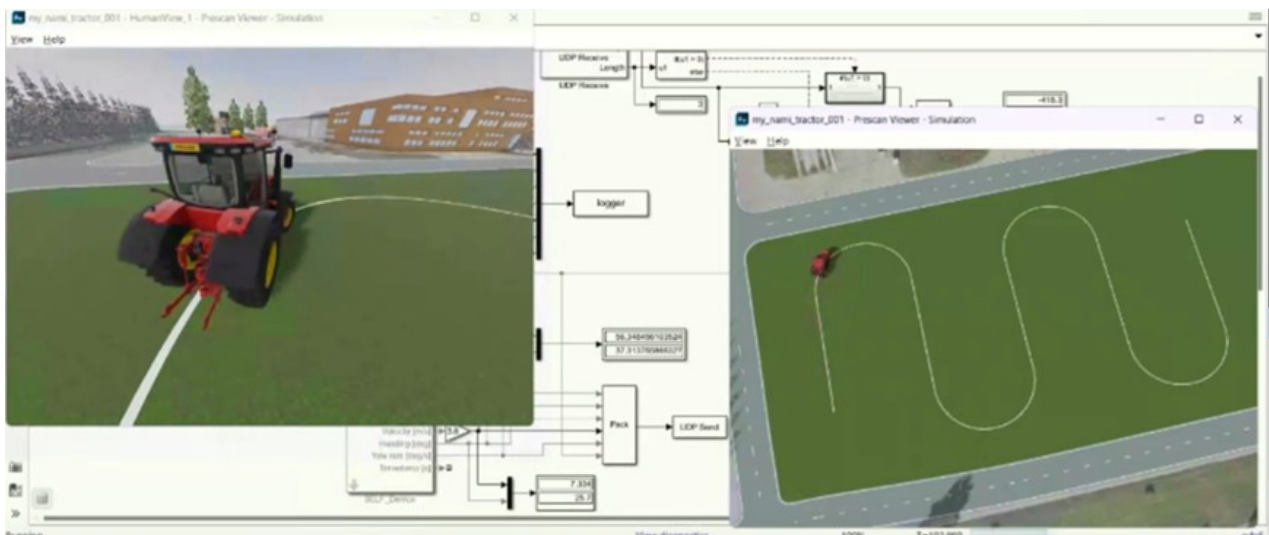


Рисунок 1. Визуализация испытаний беспилотного трактора в виртуальной среде

Испытания включали серию виртуальных прогонов, в ходе которых цифровой двойник трактора двигался по эталонному маршруту в автономном режиме. Скорость движения задавалась в диапазоне 4-20 км/ч. На каждом прогоне с частотой 10 Гц регистрировались фактические координаты трактора. Последующая обработка данных осуществлялась автоматизированным скриптом на Python, реализующим описанный далее алгоритм и расчет восьми оценочных показателей для всего маршрута и отдельно для типовых участков (прямой, повороты).

Методика определения боковых отклонений

Ключевым элементом метрологической оценки является алгоритм попарного сравнения эталонного (базового) и фактического (сравниваемого) треков. В качестве системы координат была выбрана равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Меркатора (UTM), что позволяет работать с плоскими координатами (X_{utm} , Y_{utm}) и минимизировать искажения на территориях, характерных для сельскохозяйственных полей.

Методика основана на определении нормального (бокового) расстояния от каждой точки эталонного трека до линии фактического пути. Эталонный трек представляет собой дискретный набор точек, каждая из которых, помимо

координат (X_{utm} , Y_{utm}), содержит параметр «heading» – азимут касательной к кривой в данной точке, то есть угол, отмеряемый по часовой стрелке между направлением на север и касательной, направленной по ходу движения. Сравнимый трек, полученный в результате виртуального прогона, представляет собой дискретный набор точек, содержащий только координаты (X_{utm} , Y_{utm}).

Алгоритм вычисления бокового отклонения для i -й точки эталонного трека реализуется в следующей последовательности (рисунок 2):

1. Построение перпендикуляра: для точки эталонного трека с известным азимутом строится перпендикуляр к направлению касательной.
2. Поиск пересечения: определяется отрезок на сравниваемом треке между точками, с которым пересекается построенный перпендикуляр.
3. Вычисление координат пересечения: рассчитываются точные координаты точки пересечения.
4. Расчет отклонения: боковое отклонение dS_i определяется как евклидово расстояние между точкой на эталонном треке и точкой пересечения. Знак отклонения определяется относительно направления вектора нормали.

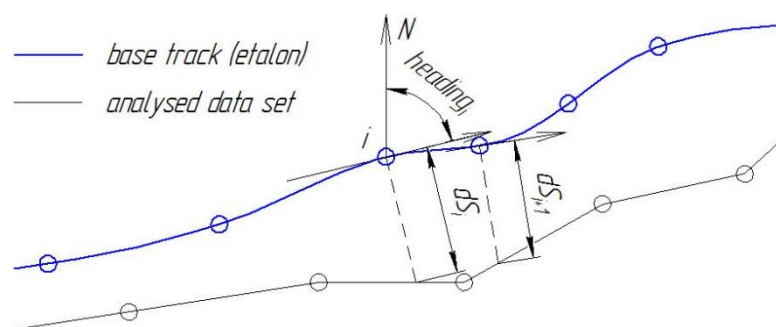


Рисунок 2. Принципиальная схема определения боковых отклонений dS_i для i -й точки эталонного трека.

На алгоритмическом уровне после нахождения точки пересечения перпендикуляра, опущенного из точки базового трека, с отрезком, соединяющим соседние точки сравниваемого трека, осуществляется переход к следующей по ходу движения точке базового трека. Последовательность этих операций для всего трека иллюстрируется на рисунке 3.

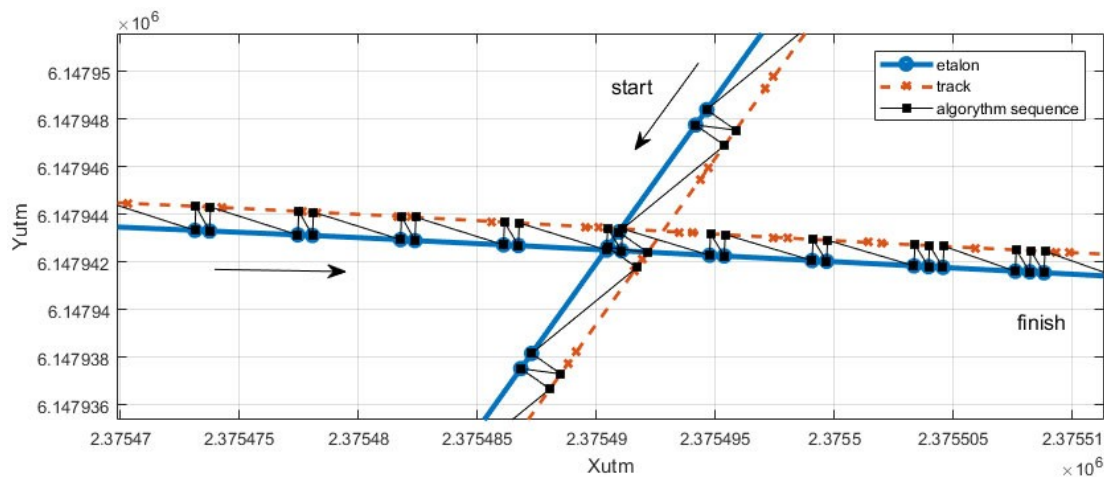


Рисунок 3. Последовательность определения боковых отклонений: черными линиями показаны переходы от одной точки эталонного трека к следующей в процессе расчета

Данный подход, в отличие от простого поиска ближайшей точки, является метрологически более корректным, так как вычисляет именно нормальную составляющую ошибки, учитывая направление движения.

Численные показатели сходимости – результатом работы алгоритма является массив значений боковых отклонений dS , каждое из которых ассоциировано с конкретной точкой базового (эталонного) трека.

Также важными частями алгоритма являются:

- изначальное определение границ области сравнения внутри эталонного и анализируемого треков, реализованное в виде автоматического сопоставления данных;

- автоматический расчет оценочных показателей для максимально возможной области сравнения, определенной выше;

- ручное выделение области пройденного пути для расчета оценочных показателей внутри интересующего участка.

Система оценочных показателей

Для перехода от массива первичных отклонений dS_i к комплексной количественной оценке точности системы управления был разработан и формализован набор из восьми взаимодополняющих статистических показателей. Данный набор позволяет оценить не только общий уровень точности, но и характер распределения ошибки, наличие систематического смещения и интегральное качество прохождения всего маршрута.

1. Максимальное отклонение, $\max(|dS_i|)$, м: показывает наихудший случай работы системы, характеризуя предельную ошибку, которую может допустить система управления.

2. Минимальное отклонение, $\min(|dS_i|)$, м: фиксирует наилучшее достигнутое значение точности.

3. Среднее арифметическое значение, м:

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N A_i;$$

Данный показатель является ключевым для выявления систематического смещения системы управления. Значение μ , близкое к нулю, указывает на отсутствие постоянного смещения траектории влево или вправо относительно эталона.

4. Среднее арифметическое абсолютных значений, м:

$$\mu_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |A_i|;$$

Отражает средний размер отклонения по модулю, без учета знака. Это более строгая оценка средней ошибки по сравнению с μ , так как взаимокompенсирующие отклонения разного знака не складываются.

5. Среднее линейное отклонение (среднее абсолютное отклонение от среднего), м:

$$mld = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|;$$

Характеризует средний разброс отклонений относительно их среднего значения. Показатель *mld* чувствителен к изменчивости ошибки и дополняет информацию, даваемую дисперсией.

6. Среднеквадратическое отклонение (СКО), м:

$$std = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (A_i - \mu)^2}$$

Классический и наиболее распространенный показатель точности. СКО учитывает вес больших отклонений, придавая им большее значение, чем малым, что делает его чувствительным к выбросам.

7. Дисперсия, м²:

$$var = std^2;$$

Квадрат СКО. Дисперсия характеризует рассеивание, «мощность» ошибки. Резкий рост дисперсии на определенных участках маршрута указывает на нестабильность работы системы управления.

8. Интеграл боковой ошибки по пройденному пути:

$$err = \frac{1}{S_2 - S_1} \cdot \int_{S=S_1}^{S=S_2} |A| dS;$$

где *A* – боковое отклонение, *S* – пройденный путь. Этот показатель является интегральной характеристикой качества работы системы на всем анализируемом участке пути. Он учитывает не только величину отклонений, но и их протяженность, что особенно важно для оценки общего ущерба от неточности при выполнении агротехнологической операции (например, площади огреха или перекрытия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение разработанной методики к данным виртуальных испытаний позволило получить детальную количественную оценку точности траекторного управления беспилотным трактором и выявить характерные закономерности в работе системы на различных типах участков маршрута и при разных скоростных режимах.

При работе в режиме GNSS RTK Fixed среднеквадратическое отклонение (СКО) от заданной траектории на прямолинейных участках не превышало 7 см, что соответствует характеристикам применяемого навигационного оборудования. На участках с кривизной (радиус поворота ≥ 5 м) максимальное отклонение достигало 12-15 см, что обусловлено динамикой транспортного средства и инерционностью системы рулевого управления.

На рисунке 4 представлена зависимость боковых отклонений от пройденного пути (фрагмент) при скорости движения 15 км/ч для прямого участка и для участка с поворотами (4 поворота на протяженность участка). На прямолинейном участке траектории СКО составило 1.4 см, что свидетельствует о минимальных колебаниях относительно идеальной траектории. Максимальное зафиксированное отклонение не превысило 4.1 см, при этом среднее значение отклонения составило 1.5 см.

На участке маршрута, включающем четыре поворота различной конфигурации, наблюдалось закономерное увеличение ошибок позиционирования. СКО возросло до 3.0 см, что более чем в два раза превышает аналогичный показатель на прямолинейном участке. Максимальное отклонение достигло 8.5 см в зонах наиболее сложных маневров, однако осталось в пределах проектных допусков. Среднее отклонение составило 2.6 см, что подтверждает способность системы эффективно компенсировать ошибки после выполнения поворотов.



а)



б)

Рисунок 4. Зависимость боковых отклонений от пройденного пути для анализируемого участка. а) прямой участок, б) участок с поворотами

Расчетные значения оценочных показателей для этих участков, полученные в соответствии с разработанной методикой, сведены в Таблицу 1.

Таблица 1. Результаты оценки точности траекторного управления на различных участках маршрута (скорость 15 км/ч)

Оценочный показатель	Прямой участок	Участок с поворотами	Относительное ухудшение, %
Максимальное отклонение, $\max(dS_i)$, см	4,1	8,5	+107%
Минимальное отклонение, $m \in (dS_i)$, см	-3,8	-7,9	+108%

Среднее арифметическое, μ , см	0,15	0,26	+73%
Среднее абсолютное, μ_a , см	2,1	4,3	+105%
Среднее линейное отклонение, mld , см	1,7	3,5	+106%
Среднеквадратическое отклонение, std , см	1,4	3,0	+114%
Дисперсия, var , см ²	2,0	9,0	+350%
Интеграл ошибки, err , см	1,9	4,1	+116%

Для анализа влияния скоростного режима на точность траекторного управления были проведены дополнительные испытания в диапазоне рабочих скоростей от 4 до 20 км/ч. Результаты оценки ключевых показателей точности в зависимости от скорости представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Влияние скорости движения беспилотного трактора на точность траекторного управления

Скорость, км/ч	Прямой участок, СКО, см	Участок с поворотами, СКО, см	Интеграл ошибки (повороты), см
4	0,8	1,8	2,4
8	1,1	2,4	3,2
15	1,4	3,0	4,1
20	2,7	5,8	7,9

Таким образом, на прямых участках наблюдается монотонное увеличение СКО с ростом скорости от 0,8 см при 4 км/ч до 2,7 см при 20 км/ч. Ухудшение точности на 237% при увеличении скорости в 5 раз связано с ростом инерционности системы и уменьшением времени для корректирующих воздействий.

На криволинейных участках зависимость точности от скорости выражена более значительно - СКО возрастает с 1,8 см до 5,8 см (ухудшение на 222%). Особенно заметно ухудшение точности в зонах входа в поворот, где динамические ошибки суммируются с кинематическими.

Интеграл ошибки на поворотах демонстрирует наиболее выраженную зависимость от скорости - увеличение с 2,4 см до 7,9 см (рост на 229%). Это свидетельствует о том, что с ростом скорости не только увеличивается амплитуда отклонений, но и расширяются зоны неточного управления.

Анализ данных Таблицы 1 подтверждает качественные наблюдения и демонстрирует существенную разницу в точности управления между прямыми и криволинейными участками. Все показатели для участка с поворотами значительно ухудшились по сравнению с прямолинейным участком.

Наиболее показательными являются следующие результаты при скорости 15 км/ч:

- СКО возрастает с 1,4 см до 3,0 см (на 114%).
- Максимальное отклонение достигает 8,5 см в зонах наиболее сложных маневров.
- Дисперсия увеличивается с 2,0 до 9,0 см² (на 350%).
- Интегральная ошибка возрастает с 1,9 см до 4,1 см (на 116%).

При этом отсутствие значительного роста систематической ошибки (μ остается близким к нулю на обоих участках) указывает на то, что основная проблема заключается в динамических характеристиках системы, а не в ее калибровке.

Оптимальные режимы работы

На основе полученных данных можно определить оптимальные скоростные режимы для различных агротехнических операций:

- Для высокоточных операций (посев, междурядная обработка) рекомендована скорость 8-15 км/ч
- Для транспортных операций допустима скорость 15-20 км/ч
- Критическим порогом является скорость 15 км/ч, при превышении которой точность выходит за пределы требований для точных работ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанная система управления обеспечивает высокую точность на

прямолинейных участках при скоростях до 15 км/ч, соответствующую требованиям к выполнению точных агротехнических операций. Однако на криволинейных участках и при повышенных скоростях наблюдается закономерное ухудшение точности, обусловленное динамическими ограничениями системы. Выявленные зависимости демонстрируют эффективность предложенной методики для диагностики системных проблем алгоритмов управления и определяют направления для дальнейшей оптимизации системы, в частности, необходимости адаптации алгоритмов управления к скоростному режиму и улучшения компенсации динамических эффектов на маневрах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования была успешно разработана и апробирована комплексная метрологическая методика оценки точности траекторного управления беспилотным трактором. Методика основана на алгоритме определения нормальных отклонений к эталонной траектории и включает набор из восьми взаимодополняющих статистических показателей, обеспечивающих многокритериальный анализ ошибки.

Применение методики к данным виртуальных испытаний системы управления беспилотным трактором позволило:

1. Количественно подтвердить высокую точность системы на прямолинейных участках.
2. Выявить и количественно оценить закономерное снижение точности на криволинейных участках.
3. Установить, что система не имеет значительного систематического смещения.
4. Получить интегральные оценки качества прохождения всего маршрута.

Методика показала свою эффективность как мощный инструмент диагностики, позволяющий не только оценить общий уровень точности, но и выявить узкие места алгоритмов управления, связанные с их динамическими характеристиками. Это открывает возможности для целенаправленной оптимизации системы управления на этапе виртуальных испытаний, что способствует сокращению времени и стоимости последующих натуральных испытаний.

Разработанный подход является универсальным и может быть рекомендован для применения при валидации систем траекторного управления различных автономных мобильных роботов и транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bekiaris-Liberis N., et al. Autonomous Agricultural Vehicles: Concepts, Principles, and Applications // *Annual Reviews in Control*. 2020. Vol. 49. P. 71–85.
2. Li L., et al. A Review of Virtual Simulation and Testing for Autonomous Vehicles // *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2021. Vol. 6(3). P. 415–431.
3. Silva D., et al. Digital Twin in Agriculture: A Systematic Review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198. P. 107–117.
4. Schluse M., et al. Experimentable Digital Twins for Model-Based Systems Engineering // *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12(1). P. 114–125.
5. Prescan Documentation // Siemens Digital Industries Software. 2023.
6. Riedl M., et al. Distributed Testing of Autonomous Systems: Challenges and Solutions // *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Autonomous Systems*. P. 45–52

7. Zhao L., et al. A New Method for Evaluating Path Tracking Accuracy for Autonomous Vehicles // Journal of Advanced Transportation. 2022. Vol. 2022. P. 1–12.
8. ISO 12188-1:2022. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Autonomous systems — Part 1: Safety requirements.
9. Chen H., et al. Latency Analysis of Remote Vehicle Control Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021. Vol. 70(5). P. 4125–4136.
10. Smith J., et al. High-Fidelity Simulation of Off-Road Vehicle Dynamics for Autonomous Farming Applications // Journal of Terramechanics. 2023. Vol. 95. P. 15-28.
11. Johnson K., et al. A Framework for Distributed Testing of Autonomous Systems via Secure VPN Tunnels // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 112345-112358.

