

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-101-108

УДК 629.114.2

Э. И. ЯСЮКОВИЧ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО САМОУПРАВЛЯЕМОГО КУРСОВОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Аннотация

Разработана имитационная математическая модель управляемого курсового движения нейросетевого беспилотного карьерного автосамосвала.

Ключевые слова:

нейросети, радар, лидар, автономные автомобили, искусственный интеллект, автотранспортные средства, курсовое движение, вертикальная динамика, имитационное моделирование, беспилотный управляемый карьерный автосамосвал.

Для цитирования:

Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование нейросетевого самоуправляемого курсового движения беспилотных карьерных автосамосвалов / Э. И. Ясюкович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3 (92). – С. 101–108.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется беспилотным, называемым автономными, автосамосвалам, которые выполняют управляемое курсовое движение без водителя. Использование таких автосамосвалов приводит к большим изменениям в автомобильной промышленности, т. к. компьютер, установленный на автономном автомобиле, принимает большое количество сигналов от собственных и внешних датчиков, которые используются для управления их курсовым движением.

В современном беспилотном автомобилестроении используются нейросети, играющие важную роль в разработке интеллектуальных систем управления курсовым движением колесных машин, предоставляющие им возможность повысить безопасность и комфорт. Нейросети анализируют в режиме реального времени данные, принимаемые от установленных на дорогах датчиков, таких как камеры видеонаблюдения, радары и

лидары, которые могут распознавать пешеходов, обнаруживать другие транспортные средства, прогнозировать их поведение и принимать решения в режиме реального времени [1].

Радары используются для получения информации о скорости сближения и о расстоянии до объекта перед автомобилем, а лидары представляют собой приборы, определяющие расстояние до объектов с использованием лазера.

Использование работающих по принципу имитации человеческого мозга нейросетей в процессах курсового движения самоуправляемых беспилотных автомобилей позволяет им самостоятельно анализировать информацию, поступающую от различных датчиков, и значительно повысить эффективность и безопасность их движения [2].

Главной особенностью нейросетей является обработка поступающей к ним информации в реальном времени, когда автомобиль быстро реагирует на изменения дорожной ситуации, например,

такой как неожиданное появление препятствий или изменение дорожного покрытия. Данный анализ повышает надежность и снижает вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий.

Исследование процессов нейросетевого движения автомобилей большой грузоподъемности целесообразно начинать с имитационного моделирования, которое позволяет оценить влияние их основных массогеометрических параметров и упруго-диссипативных характеристик подвески и шин на эффективность движения.

Нейросетевое движение автомобилей происходит по трассам с камерами видеонаблюдения, которые формируют сигналы для управления движением и обеспечивают их управляемое курсовое движение с использованием самообучаемых нейронных сетей.

В настоящей работе представлены разработанные математическая модель и программное обеспечение для моделирования процессов управляемого курсового движения и разгона автосамосвалов

большой грузоподъемности.

Основная часть

Современные автосамосвалы большой грузоподъемности обладают мобильностью, безопасностью и маневренностью управляемого курсового движения. На указанные свойства оказывают влияние массогеометрические параметры и диссипативные характеристики подвески и шин [2].

Мобильность – это самоуправляемость беспилотного автомобиля с автопилотом, автомобиля с системой автоматического управления, который может безопасно перемещаться без участия водителя.

В работе для исследования мобильности беспилотного управляемого курсового движения автосамосвала БелАЗ 75131 грузоподъемностью 130 т, общий вид которого представлен на рис. 1, разработаны имитационная математическая модель и программное обеспечение.



Рис. 1. Общий вид автосамосвала БелАЗ 75131

Имитационная математическая модель беспилотного управляемого курсового движения автосамосвала содержит

дифференциальные уравнения его курсового движения и вертикальной динамики. Для вывода указанных уравнений

использовались разработанные расчетные схемы, приведенные на рис. 2 и 3.

В приведенных на рис. 2 и 3 расчетных схемах содержатся шесть используемых в математической модели независимых обобщенных координат: x_c , y_c , z_c – продольные, поперечные и

вертикальные перемещения центра масс автосамосвала; φ , ψ , Φ – угловые координаты перемещения автосамосвала вокруг вертикальной, продольной и поперечной осей, проходящих через его центр масс.

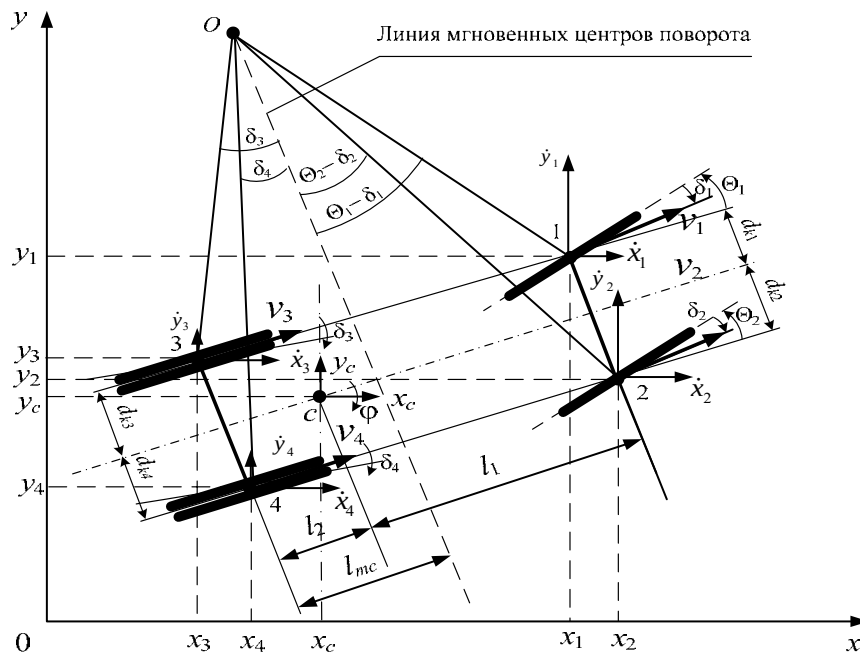


Рис. 2. Расчетная схема управляемого курсового движения автосамосвала БелАЗ 75131

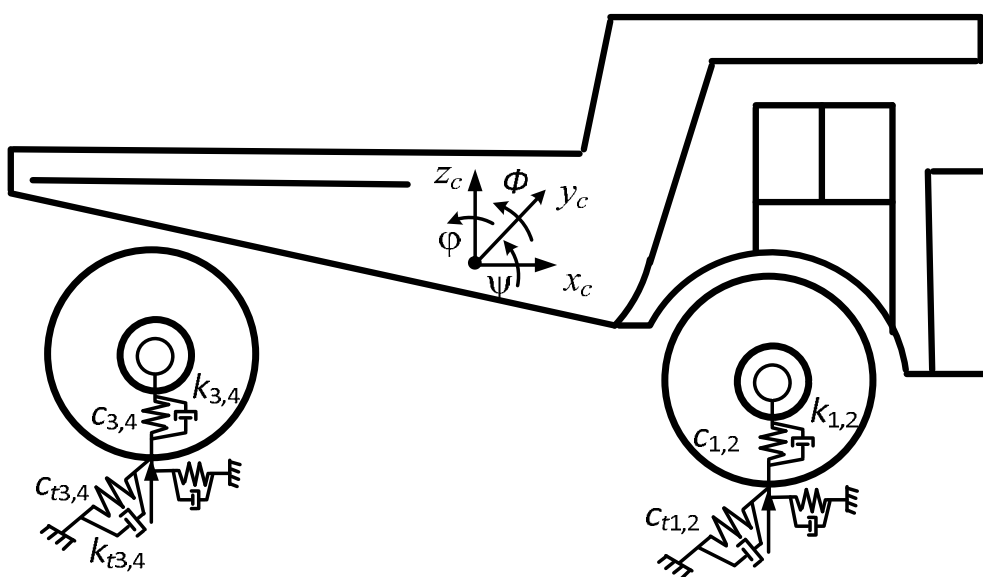


Рис. 3. Расчетная схема продольных, поперечных, угловых колебаний и вертикальной динамики автосамосвала

Математическая модель содержит также четыре дифференциальных уравнения первого порядка для вычисления углов увода шин: $\delta_1 \dots \delta_4$ – переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала.

В расчетной схеме управляемого курсового движения автосамосвала используются следующие геометрические параметры: l_1, l_2, l_{mc} – расстояния от центра масс автосамосвала до его передней, задней осей и до линии мгновенных центров поворота; $d_{k1} \dots d_{k4}$ – половины передней левой, передней правой, задней левой и задней правой осей автосамосвала; $x_1 \dots x_4$ – координаты проекций на ось OX центров переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала; $y_1 \dots y_4$ – координаты проекций на ось OY центров переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала; $\dot{x}_1 \dots \dot{x}_4$ – продольные скорости центров переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала; $\dot{y}_1 \dots \dot{y}_4$ – скорости поперечных перемещений центров переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала; φ – курсовой угол остова автосамосвала; $v_1 \dots v_4$ – продольные скорости центров переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес автосамосвала; Θ_1, Θ_2 – углы поворота левого и правого передних управляемых колес автосамосвала.

Для независимых обобщенных координат была разработана имитационная математическая модель управляемого курсового движения автосамосвала по опорной поверхности, содержащая шесть обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

В процессе курсового движения автосамосвала по дорогам с микропрофилем его остова совершает угловые, продольно-поперечные и вертикальные

колебания, в результате чего изменяются сцепления шин колес с опорной поверхностью, поэтому вертикальные реакции опорной поверхности на шины колес не являются постоянными. В связи с этим для повышения точности имитационного моделирования динамические уравнения курсового движения автосамосвала разработаны с учетом упруго-диссипативных характеристик шин, а имитационная математическая модель, кроме уравнений курсового движения, дополнена динамическими уравнениями вертикальной динамики.

Кроме этого, разработанная имитационная математическая модель содержит четыре дифференциальных уравнения первого порядка кинематических связей шин колес с опорной поверхностью, которые используются для определения изменяющихся при криволинейном движении углов их увода $\delta_1 \dots \delta_4$, необходимых для моделирования управляемого криволинейного курсового движения. Эти уравнения используются также для имитации процессов обгона транспортных средств, движущихся с меньшей скоростью в том же направлении.

Для управления мобильным беспилотным курсовым движением автосамосвала по траектории, формируемой на основе данных, получаемых из установленных видеокамер, в математическую модель и в программное обеспечение добавлен блок обгона, который в момент времени начала маневра задает рулевому колесу ускорение угла его поворота, действующее до достижения им заданных скорости и угла поворота. После завершения обгона углу поворота рулевого колеса задаются значения, возвращающие автосамосвал в исходную полосу движения.

Вывод дифференциальных уравнений вертикальных, продольных и поперечно-угловых колебаний автосамосвала выполнялся с использованием разработанной расчетной схемы, представленной на рис. 3.

На рис. 3 представлены следующие упруго-диссипативные характеристики шин автосамосвала: $C_1...C_4$ – коэффициенты вертикальной жесткости шин; $k_1...k_4$ – коэффициенты вертикального демпфирования шин; $C_{t1}...C_{t4}$ – коэффициенты боковой жесткости шин; $k_{t1}...k_{t4}$ – коэффициенты бокового демпфирования шин.

Таким образом, приведенные на рис. 2 и 3 расчетные схемы использовались для вывода дифференциальных уравнений управляемого курсового движения и вертикальной динамики автосамосвала.

Моделирование управляемого курсового движения автосамосвала выполнялось с учетом углов Θ_1 и Θ_2 поворота передних левого и правого управляемых колес автосамосвала вокруг их вертикальных осей (см. рис. 2).

Уравнения кинематических связей колес автосамосвала с опорной поверх-

ностью при движении без проскальзывания шин его колес получены для случая, когда нормали к вертикальной плоскости каждого колеса пересекаются в точке O на линии мгновенных центров поворота (см. рис. 2).

Эффективность управляемого курсового движения автосамосвала зависит от положения линии мгновенных центров поворота колес и определяется соотношением углов их поворота, а также углов увода шин.

Таким образом, разработанная с учетом продольно-поперечных, вертикальных и угловых колебаний остова автосамосвала и перечисленных условий имитационная математическая модель курсового движения содержит шесть обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (1) и четыре дифференциальных уравнения первого порядка (2) кинематических связей шин его колес с опорной поверхностью.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_c &= \left\{ -\sum_{i=1}^2 [Y_i \sin(\varphi + \Theta_i \mp \delta_i) + (P_{ki} - P_{ti}) \cos(\varphi + \Theta_i \mp \delta_i)] + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=3}^4 [Y_i \sin(\varphi \mp \delta_i) + (P_{ki} - P_{ti}) \cos(\varphi \mp \delta_i)] \right\} / m; \\ \ddot{y}_c &= \left\{ \sum_{i=1}^2 [Y_i \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + (P_{ki} - P_{ti}) \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i)] + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=3}^4 [Y_i \cos(\varphi \mp \delta_i) + (P_{ki} - P_{ti}) \sin(\varphi \mp \delta_i)] \right\} / m; \\ \ddot{\varphi} &= \sum_{i=1}^2 \{ Y_i [l_1 \cos(\Theta_i - \delta_i) \mp d_i \sin(\Theta_i - \delta_i)] + (P_{ki} + P_{ti}) \times \\ &\quad \times [l_1 \sin(\Theta_i - \delta_i) \pm d_i \cos(\Theta_i - \delta_i)] \} - \sum_{i=3}^4 \{ Y_i [l_2 \cos \delta_i \pm d_i \sin \delta_i] - \\ &\quad - (P_{ki} + P_{ti}) [l_2 \sin \delta_i \mp d_i \cos \delta_i] \} / J_z; \\ \ddot{z}_c &= \sum_{i=1}^4 P_{ni} / m; \\ \ddot{\psi} &= \sum_{i=1}^4 (\mp P_i d_{ki} - m v_c^2 h_c / r_{tr}) / J_x; \\ \ddot{\Phi} &= \sum_{i=1}^2 (P_{i1} l_i + P_{i2} l_2) / J_y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned}
& \dot{\delta}_i \{ \dot{x}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \dot{y}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \ddot{\varphi} [l_1 \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp \\
& \quad \pm d_{ki} \cos(\Theta_i - \delta_i)] \} = \ddot{x}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i) - \ddot{y}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) - \\
& \quad - \ddot{\varphi} [l_1 \cos(\Theta_i - \delta_i) \pm d_{ki} \sin(\Theta_i - \delta_i)] - \dot{\varphi}^2 [l_1 \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp \\
& \quad \mp d_{ki} \cos(\Theta_i - \delta_i)] + (\dot{\varphi} + \dot{\Theta}_i) [\dot{x}_c \cos(\varphi + \Theta_i - \delta_i) + \\
& \quad + \dot{y}_c \sin(\varphi + \Theta_i - \delta_i)] + \ddot{\varphi} [l_1 \sin(\Theta_i - \delta_i) \mp d_{ki} \cos(\Theta_i - \delta_i)], \quad i = 1, 2; \\
& \dot{\delta}_i \{ \dot{x}_c \cos(\varphi - \delta_i) + \dot{y}_c \sin(\varphi - \delta_i) - \ddot{\varphi} [l_2 \sin \delta_i \mp d_{ki} \cos \delta_i] \} = \\
& \quad = \ddot{x}_c \sin(\varphi - \delta_i) - \ddot{y}_c \cos(\varphi - \delta_i) + \ddot{\varphi} [l_2 \cos \delta_i \mp d_{ki} \sin \delta_i] + \\
& \quad + \dot{\varphi}^2 [l_2 \sin \delta_i \pm d_{ki} \cos \delta_i] + \dot{\varphi} [\dot{x}_c \cos(\varphi - \delta_i) + \dot{y}_c \sin(\varphi - \delta_i) - \\
& \quad - \ddot{\varphi} [l_2 \sin \delta_i \pm d_{ki} \cos \delta_i]], \quad i = 3, 4.
\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В системе уравнений (1) первое, второе и третье дифференциальные уравнения второго порядка – это уравнения курсового движения; четвертое – уравнение вертикального перемещения центра масс автосамосвала; пятое и шестое – уравнения поперечно- и продольно-угловых колебаний подрессоренной массы автосамосвала. Первое уравнение системы (2) используется для вычисления скоростей углов увода шин передних управляемых колес автосамосвала, а второе уравнение – скоростей углов увода шин задних колес автосамосвала.

В процессе курсового движения автосамосвала на его шины действуют боковые реакции опорной поверхности, которые вычисляются по формуле, указанной в [1].

Приведенная система дифференциальных уравнений (1) содержит переменные v_c , h_c , r_{tr} – продольная скорость автосамосвала, высота центра масс и радиус его криволинейной траектории движения; P_{ki} , P_{ti} – продольные реакции опорной поверхности на шины и силы тяги задних ведущих колес автосамосвала; k_{ui} – коэффициенты увода шин колес; P_{ni} , P_i , P_{i1} , P_{i2} – вертикальные упругие силы, действующие в i -й подвеске автосамосвала.

Коэффициенты увода шин при криволинейном движении колесных

машин не являются постоянными, зависят от многих характеристик дорожной поверхности, а также от нормальных и тангенциальных реакций дороги [3, 4].

Система дифференциальных уравнений (1), (2) курсового движения автосамосвала по криволинейной траектории разработана для случая отсутствия бокового проскальзывания шин его колес. Поэтому нормали к проекциям на дорогу средних линий вертикальных поверхностей шин пересекаются в одной точке O (см. рис. 2).

Моделирование процессов беспилотного управляемого курсового движения автосамосвала по задаваемой траектории выполнялось с помощью разработанных алгоритма и программного обеспечения интегрирования системы дифференциальных уравнений (1), (2), предусматривающих расчет процессов курсового движения в реальных условиях мобильности беспилотного движения.

Получаемые результаты имитационного моделирования сохраняются в файле, который в дальнейшем используется для формирования графических зависимостей и расчета необходимых показателей процессов управляемого курсового движения.

На рис. 4 представлены результаты имитационного моделирования управ-

ляемого курсового движения автосамосвала при совершении им маневра «смена полосы движения» и дальнейшего прямолинейного движения на

интервале времени от 0 до 100 с по дороге с микропрофилем с постоянной скоростью 6 м/с.

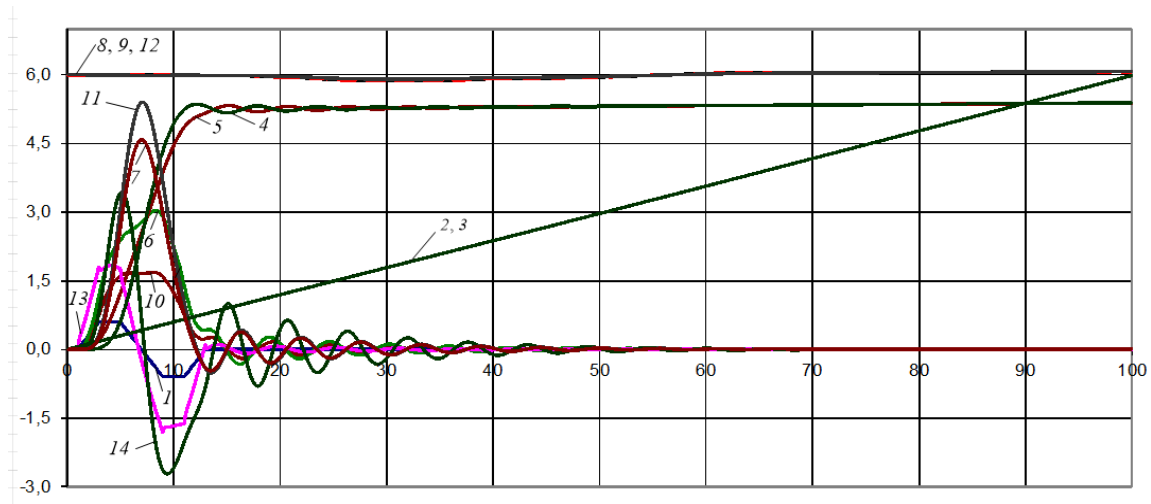


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования курсового движения автосамосвала с постоянной скоростью при совершении маневра «смена полосы движения» на интервале времени от 0 до 100 с

Представленные на рис. 4 графики зависимостей отображают изменения во времени следующих параметров движения автосамосвала: 1 – угол поворота левого управляемого колеса автосамосвала, который задается водителем (масштаб 1); 2, 3 – координаты перемещения центров масс автосамосвала по продольной оси (2 – масштаб 0,01); 4, 5 – координаты перемещения центров масс автосамосвала по поперечной оси (по ширине) дороги (масштаб 0,5); 6, 7 – курсовые углы, отображающие угловые координаты перемещения остова автосамосвала вокруг его центральной вертикальной оси (масштаб 0,02); 8, 9 – скорости перемещения центров масс автосамосвала по продольной оси (масштаб 0,002); 10, 11 – скорости перемещения центра масс автосамосвала по поперечной оси (масштаб 0,5); 12 – скорость движения автосамосвала; 13, 14 – углы увода шин передних левых колес автосамосвала (масштаб 0,0025).

Траектория движения автосамосвала задается углами поворота его передних управляемых колес: переднего

левого колеса – водителем, а переднего правого – автоматически системой рулевой трапеции передних управляемых колес.

Поскольку движение автосамосвала происходит с постоянной скоростью, графические зависимости перемещения центров масс автосамосвала по продольной оси отображаются прямыми линиями 2 и 3 – от точки (0 с, 0 м) до точки (100 с, 600 м).

Таким образом, приведенные на рис. 4 результаты подтверждают работоспособность разработанных математической модели и программного обеспечения имитационного моделирования беспилотного управляемого курсового движения автосамосвала по дорогам со случайным микропрофилем.

Кроме того, можно отметить, что разработанные математическая модель, алгоритм и программное обеспечение имитационного моделирования курсового движения могут успешно использоваться для оценки мобильности беспилотного управляемого курсового движения.

Выводы

1. Разработанное на основе полученной математической модели программное обеспечение курсового движения автосамосвала позволяет имитировать его управляемое курсовое движение по опорным поверхностям с микро- и макропрофилем.

2. Получаемые результаты моделирования позволяют подтвердить работоспособность разработанного программного обеспечения и использовать его для исследования влияния массогеометрических параметров и упруго-диссипативных характеристик подвески и шин на курсовую устойчивость при движении автосамосвала по различным категориям дорог.

3. Полученная динамическая имитационная математическая модель мо-

жет успешно использоваться для моделирования беспилотного управляемого курсового движения автосамосвала с учетом вертикальной динамики при движении по различным категориям дорог, а также для оценки мобильности его беспилотного управляемого курсового движения по реальным траекториям.

4. Результаты имитационного моделирования нейросетевого самоуправляемого курсового движения, получаемые с использованием разработанного программного обеспечения, позволяют выполнять оценку маневренности и влияния массогеометрических параметров, а также упруго-диссипативных характеристик подвески и шин на мобильность, курсовую устойчивость и управляемость беспилотных карьерных автосамосвалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галушкин, А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – М. : РиС, 2015. – 496 с.
2. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : Физматгиз, 1961. – 824 с.: ил.
3. Ясюкович, Э. И. Имитационное моделирование управляемого курсового движения трехосных колесных машин / Э. И. Ясюкович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1. – С. 68–76.
4. Динамика колесных машин : монография / И. С. Сазонов, П. А. Амельченко, В. А. Ким [и др.]. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2006. – 462 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 30 марта 2026 года

Контакты:

ed50m@mail.ru (Ясюкович Эдвард Игнатьевич).

E. I. YASYUKOVICH

SIMULATION MODELING OF NEURAL NETWORK-BASED SELF-CONTROLLED DIRECTIONAL MOVEMENT OF UNMANNED QUARRY DUMP TRUCKS

Abstract

A mathematical simulation model for the controlled directional movement of a neural network-based unmanned quarry dump truck has been developed.

Keywords:

neural networks, radar, lidar, unmanned vehicles, artificial intelligence, vehicles, directional movement, vertical dynamics, simulation modelling, unmanned controlled quarry dump truck.

For citation:

Yasyukovich, E. I. Simulation modeling of neural network-based self-controlled directional movement of unmanned quarry dump trucks / E. I. Yasyukovich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 101–108.