

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОХОДИМОСТИ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЁННЫХ МАШИН СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

Бердников И.М.¹, Великанов В.С.^{1,2}

¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;*

²*Уральский государственный горный университет, Екатеринбург*

Ключевые слова: шарнирно-сочленённая машина, проходимость, маневренность, ограниченное пространство, динамика движения, угол сочленения, сцепление, устойчивость, буксование, инженерная оценка.

Аннотация. В рамках статьи выполнена аналитическая оценка динамики и показателей проходимости шарнирно-сочленённых машин специального назначения при маневрировании в условиях ограниченного пространства. Показано, что реализуемость манёвра определяется не только радиусом траектории, но и совокупностью факторов: уровнем бокового ускорения, запасом сцепления движителей с опорной поверхностью, характером перераспределения нормальных реакций по колёсам и допустимыми габаритными отклонениями от заданного коридора. На основе кинематической модели поворота получены зависимости для радиуса траектории, поперечного ускорения и минимальной ширины коридора движения. Разработаны динамические критерии допустимости манёвра, включая коэффициент использования сцепления и безразмерный коэффициент поперечной нагрузки. Введён индекс маневренной проходимости, позволяющий выполнять инженерную экспресс-оценку режима движения по единому количественному показателю. Проведён численный анализ чувствительности индекса к скорости, радиусу поворота и коэффициенту сцепления. Научная новизна заключается в разработке комплексного индекса маневренной проходимости, связывающего кинематические и динамические ограничения манёвра в едином критерии. Практическая значимость результатов состоит в возможности их применения при выборе конструктивных параметров и режимов эксплуатации машин в теснённых технологических зонах.

ASSESSMENT OF THE DYNAMICS AND CROSS-COUNTRY ABILITY OF ARTICULATED SPECIAL-PURPOSE VEHICLES WHEN MANEUVERING IN A LIMITED SPACE

Berdnikov I.M.¹, Velikanov V.S.^{1,2}

¹*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg;*

²*Ural State Mining University, Yekaterinburg*

Keywords: articulated vehicle, cross-country ability, maneuverability, limited space, motion dynamics, articulation angle, adhesion, stability, slipping, engineering assessment.

Abstract. The article provides an analytical assessment of the dynamics and cross-country performance of articulated special-purpose vehicles when maneuvering in confined spaces. It is shown that the feasibility of a maneuver is determined not only by the radius of the trajectory, but also by a combination of factors: the level of lateral acceleration, the margin of adhesion of the propellers to the bearing surface, the nature of the redistribution of normal reactions along the wheels and the permissible overall deviations from a given corridor. Based on the kinematic rotation model, dependences for the trajectory radius, lateral acceleration, and minimum width of the movement corridor are obtained. Dynamic criteria for maneuverability have been developed, including the coefficient of coupling utilization and the dimensionless coefficient of lateral load. The maneuverability index has been introduced, which makes it possible to perform an engineering express assessment of the driving mode according to a single quantitative indicator. A numerical analysis of the sensitivity of the index to speed, turning radius and coefficient of adhesion has been carried out. The scientific novelty lies in the development of a comprehensive maneuverability index linking kinematic and dynamic maneuver limitations in a single criterion. The practical significance of the results lies in the possibility of their application in the selection of design parameters and operating modes of machines in cramped technological zones.

Введение

Шарнирно-сочленённые машины специального назначения относятся к числу наиболее маневренных наземных транспортно-технологических средств, применяемых в

строительстве, горном деле и промышленной логистике. Их конструктивная схема позволяет выполнять поворот за счёт относительного разворота полурам, что обеспечивает малый радиус траектории и высокую поворотливость в сравнении с жесткорамными машинами [1, 2]. Однако преимущества такой схемы проявляются не во всех режимах одинаково: по мере уменьшения радиуса поворота возрастают требования к сцеплению, устойчивости и точности управления [3, 4].

В стеснённых условиях эксплуатации – на узких проездах, разворотных площадках, внутри технологических коридоров и на площадках с локальными препятствиями – манёвр оказывается ограничен не только геометрией, но и динамическими возможностями машины. При этом недостаточно оценивать только минимальный радиус траектории: необходимо учитывать наружный габаритный контур, боковую динамическую нагрузку, снижение нормальной реакции на отдельные колёса и вероятность перехода движителя в режим буксования [5, 6].

Актуальность рассматриваемой задачи определяется тем, что на практике шарнирно-сочленённые машины должны сохранять способность к точному маневрированию при изменяющихся параметрах опорной поверхности, а также при изменении загрузки и скорости движения. Следовательно, требуется методика, которая соединяет геометрию поворота и динамику движения в едином инженерном критерии.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработать и обосновать формализованный подход к оценке динамики и показателей проходимости шарнирно-сочленённой машины специального назначения в условиях ограниченного пространства.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) вывести зависимость между углом сочленения и радиусом траектории; 2) установить связь между скоростью движения и поперечным ускорением; 3) описать сцепные ограничения, определяющие предельный режим поворота; 4) ввести сводный индекс маневренной проходимости; 5) выполнить аналитический разбор чувствительности манёвра к скорости, радиусу и коэффициенту сцепления; 6) сформулировать практические выводы для проектирования и эксплуатации.

Принятые допущения и понятия

Рассматривается колесная шарнирно-сочленённая машина, состоящая из передней и задней полурам, соединённых шарниром с одной степенью свободы в горизонтальной плоскости. Принятые следующие условные обозначения:

L_1 – расстояние от шарнира до передней оси передней полурамы, м;

L_2 – расстояние от шарнира до задней оси задней полурамы, м;

$L_{\Sigma} = L_1 + L_2$ – приведённая база машины, м;

B – ширина колеи, м;

v – линейная скорость характерной точки, м/с;

R – радиус траектории, м;

δ – угол сочленения, рад;

a_y – поперечное ускорение, м/с²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

φ – коэффициент сцепления движителей с опорной поверхностью;

F_x – продольная сила тяги, Н;

F_y – суммарная боковая сила, Н;

m – масса машины, кг.

Под ограниченным пространством понимается рабочая зона, в которой допустимая траектория машины ограничена препятствиями, технологическим оборудованием, стенами сооружений или иными объектами. Для такого пространства принципиально важно, чтобы машина не только вписывалась в коридор по наружному контуру, но и сохраняла устойчивость при действии боковых сил и неровностей основания [6, 7].

Кинематическая модель поворота

В первом приближении радиус установившегося поворота шарнирно-сочленённой машины определяется кинематическим соотношением:

$$R = L_{\Sigma} / \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

Это базовое кинематическое соотношение показывает, что увеличение угла сочленения приводит к уменьшению радиуса траектории и, следовательно, к росту маневренности [2, 7]. Однако само по себе уменьшение радиуса не гарантирует реализуемость манёвра, поскольку дальнейшее поведение машины определяется динамическими ограничениями.

Если движение происходит с постоянной скоростью v , то поперечное ускорение характерной точки определяется как

$$a_y = v^2 / R. \quad (2)$$

Подставляя выражение (1) в (2), получаем:

$$a_y = v^2 \operatorname{tg} \delta / L_{\Sigma}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при фиксированной скорости рост угла сочленения влечёт увеличение боковой нагрузки, а значит – повышение требований к устойчивости, управляемости и качеству сцепления [3, 4].

Для инженерной оценки проезда через узкий коридор вводится приближённая зависимость:

$$W_{\min} = R + b_{\phi} + \Delta d, \quad (4)$$

где $W_{\min}$ – минимальная ширина коридора, м; b_{ϕ} – эффективная половина габаритной ширины, м; Δd – запас на динамические отклонения, м.

Такая запись позволяет перейти от чисто кинематической трактовки манёвра к реальной оценке его пространственной реализуемости.

Динамика и сцепление

Главным ограничителем манёвра является запас сцепления движителей с опорной поверхностью. Предельная результирующая сила, которую может воспринять контакт колес с основанием, определяется выражением:

$$F_{\max} = \varphi G, \quad (5)$$

где G – суммарная нормальная реакция, Н.

Если требуемые для движения продольные и боковые силы приближаются к этому пределу, возникает буксование, снос или потеря устойчивости направления движения [4, 5].

Для количественной оценки применяется коэффициент использования сцепления:

$$\eta_{\varphi} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\varphi G}. \quad (6)$$

Условием устойчивой реализации манёвра является неравенство ($\eta_{\varphi} \leq 1$). При приближении η_{φ} к единице запас сцепления исчезает, и движение переходит в предельный режим, в котором даже небольшое внешнее возмущение может нарушить траекторию [5, 6].

Если считать, что боковая сила может быть приближённо выражена как

$$F_y = mv^2 / R, \quad (7)$$

а нормальная нагрузка $G = mg$, то условие допустимости маневра (устойчивости) приобретает вид

$$\frac{v^2}{Rg} \leq \varphi, \quad (8)$$

или в безразмерной форме:

$$k_a = \frac{a_y}{g} = \frac{v^2}{Rg} \leq \varphi, \quad (9)$$

где k_a – коэффициент поперечной нагрузки.

Данное неравенство наглядно показывает, что предельная скорость в повороте определяется не только геометрией пути, но и качеством поверхности.

Индекс маневренной проходимости

Для сводной инженерной оценки предлагается индекс маневренной проходимости:

$$I_p = \frac{\varphi G}{mv^2 / R} = \frac{\varphi Rg}{v^2}, \quad (10)$$

при $I_p > 1$ – запас допустим.

По смыслу этот показатель отражает отношение доступного сцепного ресурса к потребности в поперечном удержании машины на траектории. Если $I_p > 1$, манёвр допустим с запасом; если $I_p \approx 1$, режим находится на границе допустимого; если $I_p < 1$, возрастает риск пробуксовки или вынужденного снижения скорости.

Преимущество показателя I_p состоит в его компактности и физической интерпретируемости. Увеличение радиуса при фиксированном коэффициенте сцепления увеличивает I_p , а увеличение скорости уменьшает его квадратично. Поэтому манёвры в ограниченном пространстве должны выполняться, как правило, на пониженной скорости, особенно если опорная поверхность имеет пониженные сцепные свойства [3, 8].

Чувствительность индекса к скорости определяется производной:

$$\frac{dI_p}{dv} = -\frac{2\varphi Rg}{v^3}. \quad (11)$$

Отрицательный знак показывает, что допустимость манёвра монотонно снижается по мере увеличения скорости. При этом модуль производной возрастает при уменьшении v , что подчёркивает важность плавного начала поворота и отсутствия резких команд рулевого управления.

Численный анализ

Для иллюстрации рассмотрим условный расчётный случай.

При $L_\Sigma = 5,6$ м, $\delta = 20^\circ$, $v = 2,5$ м/с, $\varphi = 0,45$ радиус составит:

$$R = \frac{5,6}{\operatorname{tg} 20^\circ} \approx 15,38 \text{ м}; \quad (12)$$

$$k_a = \frac{2,5^2}{15,38 \cdot 9,81} \approx 0,0417; \quad (13)$$

$$I_p = \frac{0,45 \cdot 15,38 \cdot 9,81}{2,5^2} \approx 10,8. \quad (14)$$

При $\delta = 35^\circ$:

$$R \approx 8,00 \text{ м}; I_p \approx 5,64. \quad (15)$$

Режим остаётся реализуемым, однако запас допустимости заметно сокращается, а чувствительность к качеству поверхности возрастает [4, 6].

При $v = 4,0$ м/с и $R \approx 8,00$ м:

$$k_a \approx 0,204; I_p \approx 2,20. \quad (16)$$

Это уже существенно более жёсткий режим, который требует повышенного внимания к сцеплению и устойчивости. Таким образом, именно скорость оказывает наиболее сильное влияние на предельный режим. Таблица 1 сводит в единую форму параметры, наиболее значимые для инженерной оценки манёвра. Она позволяет связывать геометрическую кривизну траектории, кинематику движения и сцепные ограничения в одном расчётном блоке.

Приведённые соотношения позволяют глубже интерпретировать динамику маневрирования. Во-первых, уменьшение радиуса поворота повышает геометрическую маневренность, но одновременно увеличивает требования к сцеплению и устойчивости. Во-вторых, при стеснённом движении именно скорость является тем параметром, который быстрее всего переводит режим из допустимого в предельный, поскольку поперечное ускорение растёт пропорционально квадрату скорости [3, 4].

Табл. 1. Основные параметры оценки маневренности и проходимости шарнирно-сочленённой машины

Показатель	Обозначение	Смысл	Влияние
Радиус траектории	R	Кривизна движения	Определяет ширину коридора
Угол сочленения	δ	Взаимный поворот полурам	Снижает радиус и повышает боковую нагрузку
Коэффициент сцепления	φ	Запас контакта	Ограничивает тягу и боковое удержание
Индекс маневренной проходимости	I_p	Сводная оценка режима	Позволяет сравнивать варианты

Во-вторых, для шарнирно-сочленённой машины важно учитывать перераспределение нормальных реакций по колесам. При повороте нагрузка на отдельные колёса может снижаться, и тогда локальный запас сцепления оказывается меньше среднего значения по машине. Это особенно опасно на слабонесущих и неоднородных грунтах, где фактическое сцепление зависит от локального состояния опорной поверхности [5, 6].

В-третьих, ограниченное пространство требует учитывать не только центральную траекторию, но и динамический коридор движения. Динамический коридор включает запас по смещению корпуса, колебания подвески, возможное запаздывание рулевого воздействия и неидеальность реакции машины на изменение команды. Поэтому практическая оценка должна быть запасной, а не предельной: если коридор минимально допустим по расчёту, в реальной эксплуатации он может оказаться недостаточным [7, 8].

В-четвёртых, предложенный индекс I_p удобен как критерий предварительного отбора режимов. Однако он не заменяет полный динамический расчёт, если манёвр выполняется на предельной поверхности или при высоких скоростях. В таких случаях необходимы более детальные модели, учитывающие боковой увод, неравномерность распределения нагрузки и характеристики рулевого привода.

Выводы

С практической точки зрения результаты исследования показывают, что рациональный режим маневрирования шарнирно-сочленённой машины в ограниченном пространстве должен обеспечивать одновременно три условия: прохождение по геометрии, сохранение сцепления и отсутствие чрезмерного бокового ускорения. Эти требования не являются независимыми: уменьшение радиуса улучшает одну часть задачи, но ухудшает другую, поэтому выбор режима всегда является компромиссным.

Для проектировщика это означает необходимость заранее задавать допустимый диапазон углов сочленения и скоростей, соответствующий типу опорной поверхности и характеру рабочей зоны. Для рабочего это означает необходимость снижения скорости при входе в узкий проезд, плавного изменения курса и контроля загрузки машины, особенно при движении по слабонесущему основанию.

В дальнейшем развитие подхода может быть связано с включением в расчёт показателей бокового увода, вертикальных колебаний корпуса, а также влияния нестационарного контакта колёс с грунтом. Это позволит перейти от упрощённой инженерной оценки к более точному моделированию реальных режимов.

В результате исследования установлено следующее:

1. Маневрирование шарнирно-сочленённых машин специального назначения в ограниченном пространстве следует оценивать по совокупности геометрических и динамических критериев, а не только по минимальному радиусу поворота.

2. Угол сочленения δ , скорость v , коэффициент сцепления φ и приведённая база L_Σ являются основными параметрами, определяющими допустимость манёвра и запас устойчивости.

3. Введение коэффициента использования сцепления η_{ϕ} и индекса маневренной проходимости $I_p = \frac{\phi R g}{v^2}$ позволяет выполнять инженерную экспресс-оценку и сравнивать режимы движения по запасу допустимости.

4. Аналитический расчёт показывает, что увеличение скорости резко снижает запас реализуемости манёвра, поскольку поперечное ускорение возрастает пропорционально квадрату скорости.

5. Для эксплуатации в стеснённых технологических зонах рациональным является режим с пониженной скоростью, контролируемым углом сочленения и обязательной проверкой габаритного коридора по наружному контуру машины.

Список литературы

1. Репин С.В., Масленников Н.А., Орлов Д.С., Лутов Д.С. Исследование процессов обеспечения плавности хода транспортно-технологических машин на базе шасси грузовых автомобилей в сложных дорожных условиях // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №23. – С. 76-84. – doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-76-84.
- 2-9. См. References.
10. Бердников И.М., Великанов В.С., Чернухин С.А. Методология моделирования и верификации динамических процессов шарнирно-сочлененных машин специального назначения // Строительные и дорожные машины. – 2025. – Т. 69, №10. – С. 87101.

References

1. Repin S.V., Maslennikov N.A., Orlov D.S., Lutov D.S. Study of processes of ensuring smooth running of transport and technological machines based on truck chassis in difficult road conditions // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023, no. 23, pp. 76-84. doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-76-84.
2. Sofronov Y.P., Stoyanova Y.P., Koprlev N.E., Todorov G.D. Kinematic study of the articulated trucks operating layout of turn for articulated vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 618, p. 012044. DOI: 10.1088/1757-899X/618/1/012044.
3. Markdahl J. Automatic traction control for articulated off-road vehicles // arXiv. 2021. – DOI: 10.48550/arXiv.2104.11289.
4. Michalek M.M. Agile maneuvering with intelligent articulated vehicles: a control perspective // IFAC-PapersOnLine. 2019, vol. 52, iss. 8, pp. 458-473. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.08.103.
5. Huang T., Chen X., Hu H., Song S., Shao G., Zhu Q. Terrain-adaptive motion planner for articulated construction vehicles in unstructured environments // Automation in Construction. 2024, vol. 168, part B, p. 105864. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105864.
6. Fomin K., Meike U., Dobromirov V. Development concept of a domestically-produced articulated dump truck for the development of the Arctic territories of Russia // Transportation Research Procedia. 2021, vol. 57, pp. 184-191. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.041.
7. Gao Z., Xu C., Zhou K., Zuo Y., Xiong X., Li J. Evaluation of Articulated Equipment Driving Behaviors in Narrow Spaces // Results in Engineering. 2026, vol. 30, p. 109947. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.109947.
8. Shahirpour A., Reuscher T. Design and Experimental Evaluation of Model Predictive Control for Autonomous Articulated Dump Trucks // Mining, Metallurgy & Exploration. 2025, vol. 42, pp. 1975-1987. DOI: 10.1007/s42461-025-01265-6.
9. Chen X., Yang C., Hu H., Gao Y., Zhu Q., Shao G. A Hybrid DWA-MPC Framework for Coordinated Path Planning and Collision Avoidance in Articulated Steering Vehicles // Machines. 2024, vol. 12, iss. 12, p. 939. DOI: 10.3390/machines12120939.
10. Berdnikov I.M., Velikanov V.S., Chernukhin S.A. Methodology for Modeling and Verifying Dynamic Processes of Special-Purpose Articulated Vehicles // Construction and Road Machines. 2025, vol. 69, no. 10, pp. 87-101.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бердников Илья Михайлович – аспирант	Berdnikov Ilya Mikhailovich – postgraduate student
Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы» УрФУ; профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий УГГУ	Velikanov Vladimir Semenovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of lifting and transport machines and robots of UrFU; professor of the Department of automation and computer technologies of USMU
ilia1998-04@mail.ru	

Получена 08.04.2026