

## Линеаризация взаимодействия внутренней и внешней кинематики длиннобазных грузовых вагонов для прохода кривых малого радиуса

В.В. Тюньков✉, Л.В. Мартыненко, Д.И. Павлова, Саранзаяа Атарцэцэг

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉tunkov@bk.ru

### Резюме

В статье рассматривается возможность конструктивной адаптации сборочных узлов кинематической цепочки сопряженных деталей от автосцепки до контакта «колесо – рельс» на основе увеличения степени свободы узла «пятник – подпятник» для прохода составом кривых железнодорожного пути, в том числе малого радиуса и горно-перевальных участков. Принимается во внимание замкнутость системы нагрузок и воздействий поезда с верхним строением пути. Особое внимание уделяется прикладному использованию теории простых и сложных связанных систем с выходом на определенное конструктивное решение для обеспечения нормативного уровня безопасности движения железнодорожного подвижного состава и позитивной реализации его технического и технологического ресурса. Подход к решению задач повышения уровня ситуационной надежности, снижения износа взаимодействующей пары «колесо – рельс» на принципах адаптивного алгоритма, а также минимизации вероятности аварийного схода вагонов на кривых малого радиуса реализуется путем включения в замкнутую систему элемента, обладающего ресурсом адаптивности и безопасного перевода дестабилизирующего воздействия в другую матрицу. Поскольку методы линеаризации имеют ограниченный характер, т. е. эквивалентность исходной нелинейной системы сохраняется лишь для ограниченных временных масштабов системы либо для определенных процессов при движении поезда, то при переходе с одного режима работы на другой следует контролировать и адекватность ее линеаризованной модели. Как пример предложен вариант эксцентрикового сочленения кузова с тележкой грузового вагона. Результат действителен не только для исследованных грузовых вагонов, но и для всего подвижного железнодорожного состава, использующего автосцепное оборудование типа СА-3. В прикладной результативной части предлагается вариант функционального «адаптивного» расширения узла соединения шкворневой балки рамы вагона с тележкой с целью безопасного перевода выявленного дестабилизирующего воздействия в сопредельную матрицу.

### Ключевые слова

длиннобазовые грузовые вагоны, автосцепка, сборочный узел, адаптивный шкворень, внутренняя кинематика вагона, ресурс адаптивности, безопасность движения, внешнее воздействие

### Для цитирования

Линеаризация взаимодействия внутренней и внешней кинематики длиннобазовых грузовых вагонов для прохода кривых малого радиуса / В.В. Тюньков, Л.В. Мартыненко, Д.И. Павлова, Саранзаяа Атарцэцэг // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 72–80. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).72-80.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 19.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 19.12.2022 г.; принята к публикации: 20.12.2022 г.

## Linearization of internal and external kinematics interaction of long-based freight wagons for passing small radius curves

V.V. Tyun'kov✉, L.V. Martynenko, D.I. Pavlova, Saranzayaa Atartsetseg

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉tunkov@bk.ru

### Abstract

The possibility of constructive adaptation of the assembly units of the kinematic chain of conjugated parts from the automatic coupler to the wheel-rail contact is considered on the basis of increasing the degree of freedom of the center-to-center assembly for the train to pass curves of the railway track, including small radius and mountain pass sections. The closedness of the system of loads and the «train - superstructure of the track» influences are taken into account. Particular attention is paid to the applied use of the theory of simple and complex coupled systems with access to a certain design solution to ensure the normative level of traffic safety and positive implementation of the technical and technological resource of railway rolling stock. An approach to solving the problem of increasing the level of situational reliability, wear of an interacting wheel-rail pair based on the principles of an adaptive algorithm, as well as minimizing the probability of an emergency derailment of cars on curves of a small radius is achieved by including an element into a closed system that has an adaptability resource and the safe transfer of a destabilizing influences to another matrix. Since the linearization methods are limited, i.e., the equivalence of the original nonlinear system is

preserved only for limited time scales of the system, or for certain processes during the movement of the train, then when switching from one operating mode to another, the adequacy of its linearized model should also be controlled. As an example, a variant of the eccentric articulation of the body with the bogie of a freight car is proposed. The result is valid not only for the studied freight cars, but also for the entire rolling stock using automatic coupling equipment of the SA-3 type. In the applied effective part, a variant of the functional «adaptive» expansion of the junction of the pivot beam of the car frame with the bogie is proposed in order to safely transfer the identified destabilizing effect to the adjacent matrix.

### Keywords

long-base freight wagons, automatic coupler, assembly unit, adaptive kingpin, wagon internal kinematics, adaptability resource, traffic safety, external impact

### For citation

Tyun'kov V.V., Martynenko L.V., Pavlova D.I., Atartsetseg Saranzayaa. Linearizatsiya vzaimodeistviya vnutrennei i vnesheinei kinematiki dlinnobaznykh gruzovykh vagonov dlya prokhoda krivykh malogo radiusa [Linearization of internal and external kinematics interaction of long-based freight wagons for passing small radius curves]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 72–80. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).72-80.

### Article Info

Received: October 19, 2022; Revised: December 19, 2022; Accepted: December 20, 2022.

### Введение

Модернизация Восточного полигона железной дороги РФ, которая предполагает увеличение провозной способности полигона к 2023 г. со 124,9 до 180 млн т и до 200 млн т ежегодно на период до 2025 г. [1]. Одним из приоритетных перспективных направлений является интенсификация интермодальных перевозок большегрузными контейнерами. Для их перемещения выделяются преимущественно длиннобазовые платформы. Однако они отличаются затрудненным проходом горно-перевальных участков, в том числе кривых малого радиуса, которыми насыщен Восточный полигон.

В связи с этим сохранение достигнутого уровня безопасности перевозок предполагает комплекс мер, включая конструктивное совершенствование элементов, значимых для режима технической эксплуатации подвижного состава. Рассматривая железнодорожный грузовой вагон как взаимосвязанную систему со сложной внутренней кинематикой, сочетающуюся циклически непосредственно в контакте «колесо –

рельс», а также связанную через автосцепку с другими вагонами сформированного поезда, приходим к выводу о необходимости рационализации сборочных узлов и деталей, участвующих в процессах, влияющих на повышенный износ и негативную динамику объекта, особенно при движении в порожнем состоянии и при различных видах торможения [2].

### Исходная позиция

При исследовании факторов, приводящих к сходу вагона с рельса, принимаем замкнутую нелинейную техническую систему, состоящую из ограниченного числа элементов, которая рассчитана на определенный уровень воздействий, в том числе внешних, без выхода за нормированное предельное состояние. Внешние воздействия на вагон, движущийся в составе поезда, концентрируются, с одной стороны, в сочленении автосцепки, а с другой – в контакте «колесо – рельс». Последующая реакция на воздействия зависит от его величины и направления. Для нашего случая

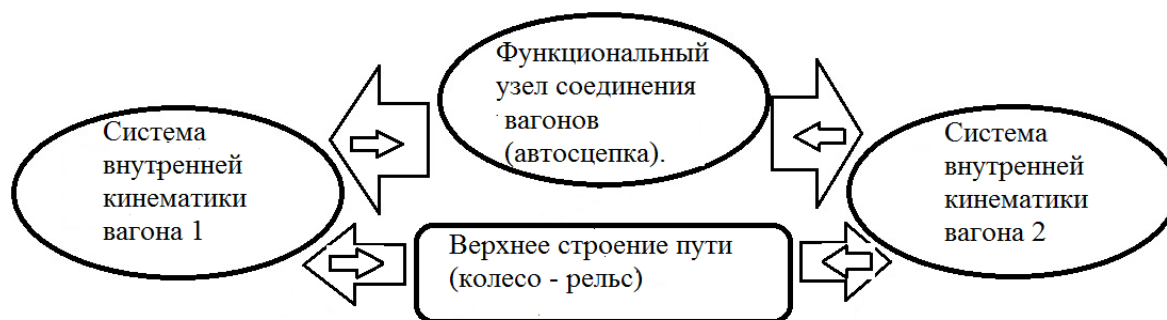


Рис. 1. Схема замкнутой системы внешних механических воздействий на вагон, движущийся в составе поезда  
Fig.1. Scheme of a closed system of external mechanical influences on a car moving as part of a train

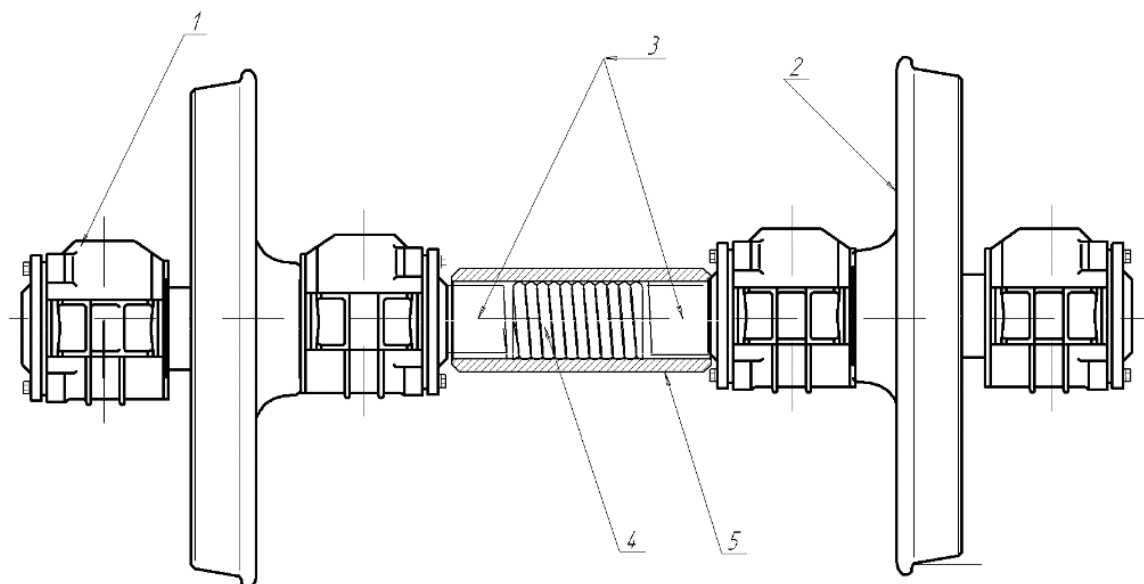
определяющим является направление, имеющее поперечную (боковую) составляющую, которая возникает при проходе кривых и при определенном сочетании параметров узла достигает величины, близкой к критической. Таким образом, имеем замкнутую систему, в которой дисфункция в одном из узлов взаимодействия приводит к разрыву системы, что является фактором, приводящим, например, к сходу вагона с рельса (рис. 1). Этот же фактор приводит к фиксированному изгибу корпуса автосцепки и его последующему восстановительному деповскому ремонту [3].

### Описание предлагаемой тенденции

Многочисленные исследования, подтверждающие актуальность рассматриваемой проблемы, концентрируются на сходе вагона с рельса. При этом устойчивость колеса против схода с рельса проверяется для наиболее опасного случая сочетания большой поперечной силы взаимодействия набегающего колеса с рельсом и малой вертикальной нагрузки на это колесо [4]. Сложная ситуация складывается при движении поезда на горно-перевальных участках в кривых малого радиуса [5], при том, что механическая составляющая процесса, так или иначе, конвертируется повышенным износом и функциональными сбоями, трансформируясь через процесс динамического взаимодействия

[6]. В связи с этим полезна предварительная линеаризация и по-возможности минимизация дестабилизирующих воздействий в межузловых контактах. Поскольку одним из системообразующих сборочных элементов является колесная пара, которая совмещает взаимодействие кузова и рельсов, рассмотрим ее адаптивный вариант, направленный на смягчение воздействий. Оценивая эффективность в рамках технологического алгоритма [7], который предусматривает в качестве ограничений минимизацию изменений в действующих кинематических связях, можно говорить о стабилизации всего процесса в коридоре эффективности, близкому к оптимальному. Отметим также, что, например, четырехбуксовая колесная пара с осевой стабилизацией позволяет повысить передаваемую нагрузку за счет двухбуксовой симметричной схемы передачи ее на каждое колесо, уменьшить износ узлов и деталей ходовой части вагонов при вписывании в кривые, снизить энергозатраты на движение подвижного состава за счет уменьшения виляния (рыскания) тележек и уменьшить боковые силы, возникающие при взаимодействии подвижного состава и пути [8].

По своему генезису предлагаемое к реализации изобретение относится к области вагоностроения и может быть использовано при создании тележек железнодорожного вагона с повышенным ресурсом, а именно к элементам, лежа-



**Рис. 2.** Четырехбуксовая колесная пара с развязывающим сумматором:

1 – буксовый узел; 2 – колесо; 3 – ось правого и левого модуля;

4 – фиксирующая пружина; 5 – предохранительная втулка

**Fig. 2.** Four-axle wheel pair with decoupling adder:

1 – axle box; 2 – wheel; 3 – axis of the right and left modules; 4 – fixing spring; 5 – safety sleeve

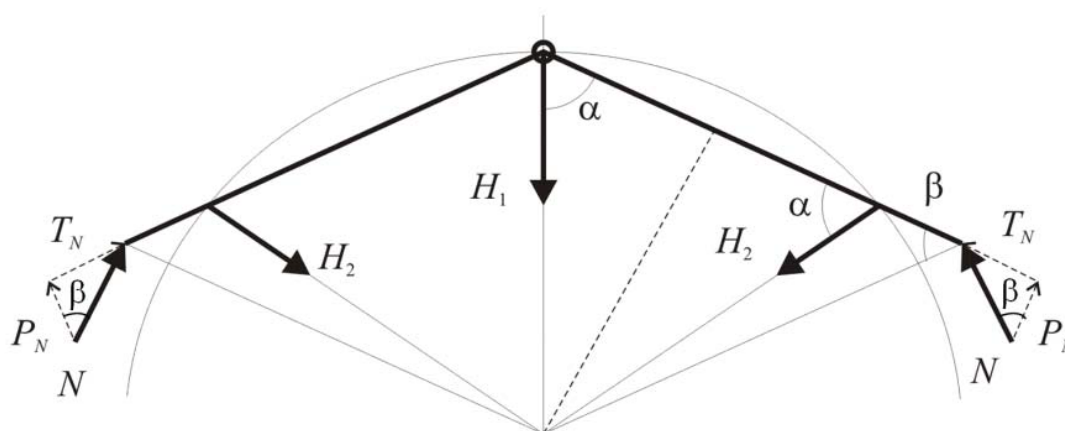
щим в основе конструкции транспортных средств и предназначенным для использования в ходовой части подвижного состава железных дорог. Данное устройство обеспечивает заданные (повышенные) параметры движения за счет рассеивания каналов передачи динамических внешних воздействий и дезинтегрирует проходящий по оси колесной пары канал вредных вибраций узлов и деталей. Устройство обеспечивает минимизацию паразитных связей, проявляющихся при движении колесной пары, которые вызывают износ элементов подвижного состава и верхнего строения пути с общим сокращением ресурса, особенно со скоростями движения выше 160 км/ч [9].

Поставленная цель достигается тем, что в самоподстраивающуюся схему движения и взаимодействия деталей и элементов колесной пары встроен развязывающий сумматор, который, сохраняя полезные связи и воздействия, в то же время смягчает вредные, возникающие в транспортном средстве при проходе сложных профилей, в том числе трехмерных, а также при износах узлов и деталей, близких к предельно допустимым [10] (рис. 2).

Формула функционального узла «четырёхбуксовая колесная пара» с осевой стабилизацией для железнодорожного подвижного состава, содержащая два ведомых колеса с элементными полуосями и центральный развязывающий сумматор, отличающаяся тем, что дифференцированную компенсированную ось, состоящую из двух симметричных композиций «элементарная полуось» + «ведомое колесо», komponуют разжимающей пружиной, закрепленной в стакане только от поперечного смещения и защитно-ограничительного цилиндра,

одеваемого на антифрикционную втулку с фланцем, которая с ходовой посадкой обеспечивает свободное вращательное движение относительно полуосей цилиндра, создающего фиксированный максимально допустимый уход гребня колеса от головки рельса, при этом развязывающий сумматор окончательно формирует колесную пару после установки буксовых узлов и рессорной системы, которая далее сопрягается по одному из возможных вариантов с несущим силовым каркасом транспортного средства [11].

Исследуем другую возможность поглощения бокового перемещения (воздействия) в композиции внутренней кинематики грузового вагона. Из уровня техники известен шкворневой узел полувагона, состоящий из хребтовой и шкворневой балок рамы, надрессорной балки тележки, надпятника, пятника и шкворня, соединяющего раму полувагона и тележку. Шкворень выполнен в виде стержня и пропущен сквозь соосные отверстия хребтовой балки, надпятника, пятника и надрессорной балки, выполненной с подпятником – местом опоры пятника на надрессорной балке [12]. Здесь предлагаются различные модификации, необходимые для закрепления шкворня с целью подтверждения его функции фиксации соединения в вертикальном положении. Отметим, что перемещение в горизонтальной плоскости может быть только за счет нерегулируемых зазоров, износа или изгиба. Известно также, что критическое сочетание действующих на колесную пару сил рассматривается в случае экстренного торможения поезда повышенного веса на малой скорости с головного локомотива при прохождении составом кривого участка пути,



**Рис. 3.** Схема положения сочлененного вагона в кривой при действии сжимающих сил в автосцепках  
**Fig. 3.** Scheme of an articulated car position in a curve under the action of compressive forces in automatic couplers

когда возникающие значительные квазистатические усилия сжатия состава могут привести к выжиманию средней тележки за счет появления больших поперечных сил взаимодействия колес с рельсами (рис. 3).

Здесь, совмещая принципы линеаризации с возможностью конструктивной адаптации в сопряжении кузова вагона с тележкой, используем вариант эксцентриковой реакции шкворня соединения «пятник – подпятник». Согласно схеме (см. рис. 1) рассмотрим один из узлов внутренней кинематики вагона, который оказывает значительное влияние на проход кривых, генерирующий дополнительное боковое воздействие в контакте «колесо – рельс» и стимулирующий процесс схода вагона. Это связано с тем, что при проходе кривой пятник и подпятник, оставаясь на оси пути, участвуют в формировании габарита вагона. Оси вагонов поезда находятся под углом друг другу, который не всегда компенсируется горизонтальным движением автосцепки при условии неразмыкания и в этом случае воздействует на ударную розет-

ку упорной плиты, через шкворневое соединение на тележку и далее на рельс (рис. 4).

Этому процессу и отдельным его частям посвящено большое количество работ как исследователей подвижного состава, так и путейцев. В данной работе сделана попытка частичного решения проблемы на одном из узлов внутренней кинематики грузового вагона.

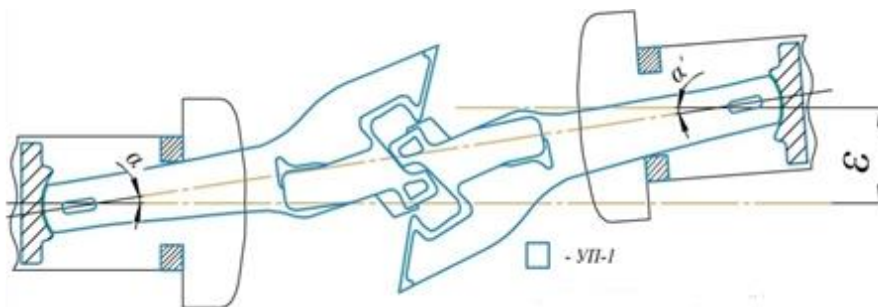
### Прикладной аспект

С увеличением базы вагона и уменьшением радиуса кривой возникают трудности с выполнением габарита и работы автосцепки. Наиболее явно это отражается величиной выноса центра вагона  $h$ , а также выноса концов вагона на величину меньше  $h$  [13]. Исходя из геометрии процесса имеем:

$$h = R \cdot [1 - \cos(\alpha/2)],$$

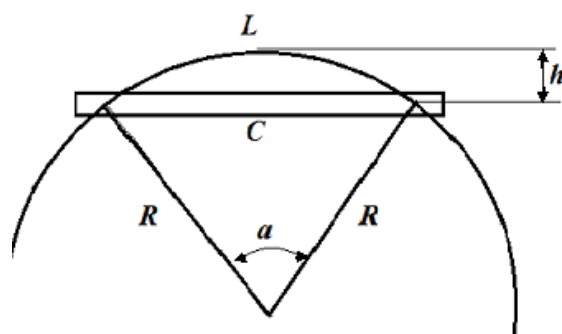
где  $R$  – радиус кривой;  $\alpha$  – угол сегмента.

В процессе эксплуатации поездов создаваемое движение при растяжении и сжатии вагонов ставит продольные оси автосцепок под углом друг к другу, уменьшая величину горизон-



**Рис. 4.** Схема формирования бокового воздействия на выходе из кривой ( $\varepsilon$  – величина смещения осей вагонов)

**Fig. 4.** Scheme of the formation of the lateral impact at the exit from the curve ( $\varepsilon$  – the value of the car axes displacement)



**Рис. 5.** Геометрическое формирование габарита на кривой:

$L$  – длина дуги сегмента;  $c$  – хорда (база вагона);  $R$  – радиус;  $\alpha$  – угол сегмента;  $h$  – высота (вынос центра вагона)

**Fig. 5.** Geometric overall dimension formation on a curve:

$L$  – the segment arc length;  $c$  – chord (car base);  $R$  – the radius;  $\alpha$  – the segment angle;  $h$  – height (removal of the car center)

тального перемещения только за счет зазоров в узлах сопряжения. Критические состояния, проявляющиеся в системе (см. рис. 1) при случайном сочетании негативных флуктуаций, приводят к изгибу корпуса автосцепки и появлению поперечной силы в контакте «колесо – рельс», которая стимулирует сход вагона с рельса [14].

Рассмотрим ограничения для одного вагона, возникающие при проходе кривой (рис. 5) и проведем расчеты при длине базы вагона 10–20 м и радиусах кривой 650, 300 и 200 м (табл.).

Вынос центра вагона колеблется в интервале 2–25 см, что предполагает смещение конца каждого вагона при данных параметрах на ве-

личину до 15 см, изменяясь по формуле в зависимости от базы вагона и радиуса кривой. Тогда возможная конструктивная интерпретация шкворня в соединении «пятник – подпятник», использованная ранее для других случаев [15], приобретает вид (рис. 6).

При проходе кривой тележка грузового вагона под воздействием рельса на гребень колесной пары идет по оси пути, а адаптивный ресурс эксцентрикового шкворня частично или полностью компенсирует смещение осей вагона –  $\varepsilon$  (см. рис. 4), конвертируя боковое воздействие в продольную составляющую. Этот конструктивный прием реализован в изобретении новой рационализации в

Расчетная величина выноса центра вагона на кривой  
The calculated value of the removal of the center of the wagon on the curve

Радиус кривой, м Curve radius, m	База вагона, м Car base, m	Вынос центра, м Removal of the center, m	Угол сегмента, град The segment angle, degrees
650	10	0,02	0,88
	15	0,04	1,32
	20	0,08	1,76
300	10	0,04	1,91
	15	0,09	2,87
	20	0,17	3,82
200	10	0,06	2,87
	15	0,14	4,30
	20	0,25	5,73

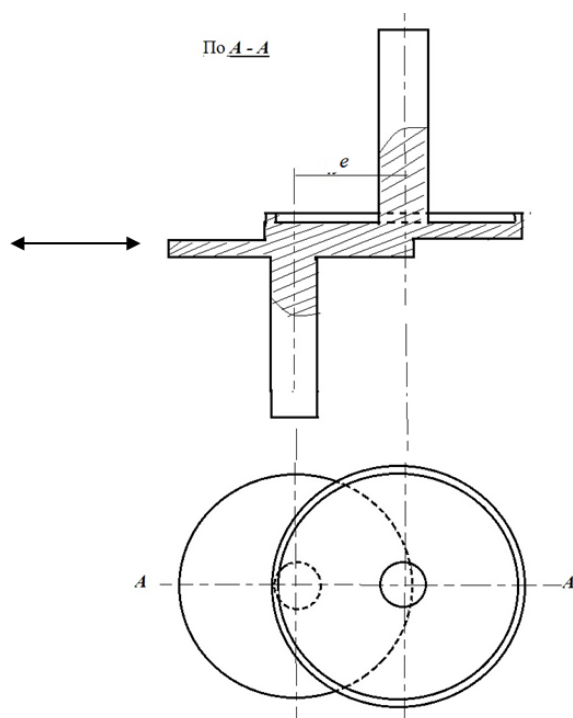


Рис. 6. Эскиз адаптивного шкворня для соединения рамы вагона с тележкой  
Fig. 6. Sketch of an adaptive king pin for connecting the car frame with the bogie



длиннобазной железнодорожной вагон-платформе для перевозки крупнотоннажных контейнеров (рис. 7).

Использованный принцип внутрисистемной адаптивности узлов и деталей при возникновении экстремальных нагрузок и воздействий позволяет стабилизировать систему внутренней и внешней кинематики подвижного железнодорожного состава (см. рис. 1), а также упростить движение на переходе «магистральная инфраструктура – транспортные пути промышленного объекта». Таким образом, в приводимом примере оперативного (без крупных конструктивных изменений) внедрения рассматриваемого принципа с использованием технологического алгоритма решается существенная задача улучшения эксплуатационных характеристик без повышения трудоемкости изготовления, диагностики и ремонтпригодности. Например, для демонстрации принципа работы предлагаемого механизма поставлена задача конструктивного решения для вагона-платформы более экономичного при изготовлении и в условиях эксплуатации [16].

Поставленная задача решается тем, что, согласно предполагаемому изобретению, в вагоне-платформе (преимущественно для контейнеров), содержащем ходовые части с установленной на них рамой, на которой размещены автосцепные устройства, тормозное оборудование с отдельным приводом на каждую тележку и упоры для закрепления контейнеров, выполненной из продольных, поперечных и концевых балок, представленное композиционное предложение включает демонтаж (например, соединение посредством шкворня-адаптера) допол-

нительных промежуточных тележек в средней части несущей рамы вагона с целью увеличения числа колесных пар вагон-платформы, находящихся под нагрузкой [17].

Технический результат заключается в повышении грузоподъемности платформы, ее погонной нагрузки и уменьшении коэффициента тары за счет увеличения числа колесных пар, воспринимающих нагрузку. Суть предлагаемого изобретения заключается в том, что длиннобазовая железнодорожная вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров, включающая раму, тележки, автосцепные устройства и тормозное оборудование с отдельным приводом на каждую тележку, и общим воздухораспределителем с запасным резервуаром дополняется тем, что в средней части платформы устанавливается вместо промежуточной поперечной балки шкворневая балка рамы для сопряжения с тележкой шкворнем-адаптером, который функционально позволяет выполнять в кривых железнодорожного пути смещение средней части рамы относительно тележки на величину не менее ее бокового выноса исходного габарита [18].

В дополнение к этой полезной функции (адаптивности) предлагаемое конструктивное решение шкворня может уменьшить износ узла соединения кузова платформы с тележкой, т. е., сопрягаемую поверхность «пятник – подпятник».

### Заключение

В рамках общей проблемы – безопасного прохода горно-перевальных участков и кривых малого радиуса – рассмотрены и предложены конструктивные варианты включения в матри-

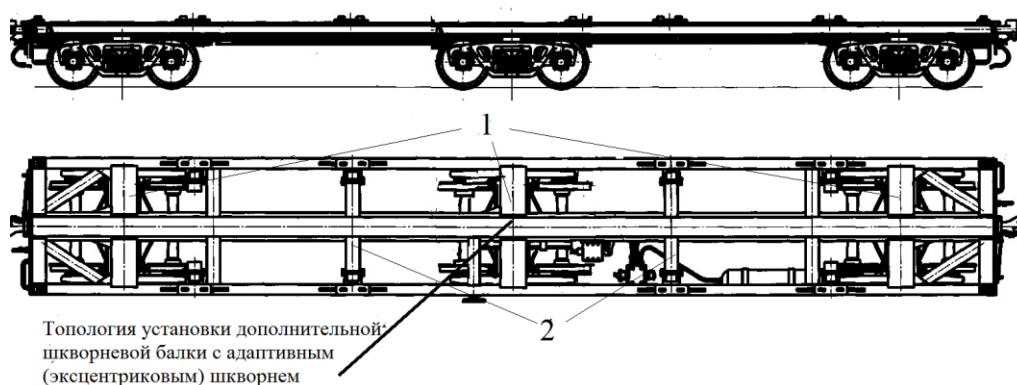


Рис. 7. Реализованная установка адаптивного шкворня:

1 – шкворневая балка; 2 – поперечная

Fig. 7. Implemented installation of the adaptive kingpin:

1 – pivot beam; 2 – transverse

цу внутренней кинематики вагона детали, повышающей адаптацию грузового вагона к внешним дестабилизирующим воздействиям, в том числе через автосцепку сопредельного вагона. Подход к решению задачи повышения уровня ситуационной надежности, износа взаимодействующей пары «колесо – рельс» на принципах адаптивного алгоритма, а также минимизации вероятности аварийного схода вагонов на кривых малого радиуса достигается путем включения в замкнутую систему элемента, обладающего ресурсом адаптивности и безопасному переводу дестабилизирующего воздействия в другую матрицу. Поскольку методы линеаризации имеют ограниченный характер, т. е. эквивалентность исходной нелинейной си-

стемы (см. рис. 1) сохраняется лишь для ограниченных временных масштабов системы либо для определенных процессов при движении поезда, то при переходе с одного режима работы на другой следует контролировать и адекватность ее линеаризованной модели.

Как пример предложен вариант эксцентрикового сочленения кузова с тележкой грузового вагона (см. рис. 6). Результат действителен не только для исследованных грузовых вагонов, но и для всего подвижного железнодорожного состава, использующего автосцепное оборудование типа СА-3. Реализация поставленной задачи допускает инвариантность с учетом действующих базовых технических норм и ограничений.

### Список литературы

1. Восточный полигон получил зеленый свет // РБК : сайт // URL: <https://www.rbc.ru/newspaper/2020/02/10/5e3d83999a794763c6d0d675> (Дата обращения: 01.10.2022).
2. Орлова А.М., Смирнов Н.В., Козлов П.В. Особенности динамического поведения сочлененных вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2010. № 4. С. 32–34.
3. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths // AER-Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. Pp. 130–134.
4. Методические указания по применению статических и кинематических габаритов подвижного состава на железных дорогах-членах организации сотрудничества железных дорог колеи 1435 и 1520 мм / Р 500/4 : утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу от 18.10.2016. Варшава, 2016. 86 с.
5. Смольянинов А.В., Якупов А.Р. Сравнительный анализ методик расчета устойчивости колесной пары от схода с рельсов // Транспорт Урала. 2017. № 1. С. 48–54.
6. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist / M. Bagheri, F. Saccomanno, Sh. Chenouri et al. // Accident; Analysis & Prevention. 2011. Vol. 43 (3). Pp. 613–620.
7. Eom B.-G., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2010. Vol. 11 (2). Pp. 315–320.
8. Gilchrist A.O., Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset // Journal of Mechanical Engineering Science. 1976. Vol. 18 (3). Pp. 131–141.
9. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail / Y.-S. Ham, D.-H. Lee, S.-J. Kwon et al // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2009. Vol. 10 (1). Pp. 35–39.
10. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects / M.S. Kim, G.Y. Kim, H.T. Kim et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30 (8). Pp. 3487–3498.
11. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheel-set // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. Vol. 28 (9). Pp. 3483–3498.
12. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. P.L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis // Accident Analysis & Prevention. 2017. Vol. 98. Pp. 1–9.
13. Синтез конструктивных решений на основе демпфирования в пределах внутренней кинематики грузовых вагонов / В.В. Тюньков, Н.П. Рычков, В.С. Бузунова и др. // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2021. № 3 (11). С. 9–16.
14. Тюньков В.В., Бузунова В.С., Пашков А.Е. Технологический алгоритм в перспективном конструктивном развитии железнодорожных грузовых вагонов колеи 1520 мм // Молодая наука Сибири. 2020. № 4 (10). С. 18–26.
15. Козлов П.В. Влияние базы вагона-платформы сочлененного типа на запас устойчивости от схода колеса с рельса // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. № 4. С. 55–62.
16. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
17. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
18. Маджидов Ф.А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М., 2016. С. 96–98.

### References

1. Vostochnyi poligon poluchil zelenyi svet (Elektronnyi resurs) [The Eastern polygon has received the green light (Electronic resource)]. Available at: <https://www.rbc.ru/newspaper/2020/02/10/5e3d83999a794763c6d0d675> (Accessed October 1, 2022).



2. Orlova A.M., Smirnov N.V., Kozlov P.V. Osobennosti dinamicheskogo povedeniya sochlenennykh vagonov [Features of dynamic behavior of articulated wagons]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2010, no. 4, pp. 32–34.
3. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. Force loading of wagon during interaction of truck and bodywork in curves paths. *AER-Advances in Engineering Research*, 2018, vol. 158, pp. 130–134.
4. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu staticheskikh i kinematicheskikh gabaritov podvizhnogo sostava na zheleznykh dorogakh-chlenakh organizatsii sotrudnichestva zheleznykh dorog kolei 1435 i 1520 mm / R 500/4 : utverzhdeny soveshchaniem Komissii OSZhD po infrastrukture i podvizhnomu sostavu 18-21 oktyabrya 2016 goda [Methodological guidelines for the use of static and kinematic dimensions of rolling stock on railways-members of organization of railway cooperation of gauge 1435 and 1520 mm / R 500/4 : approved by the meeting of the organization of railway cooperation's Commission on Infrastructure and Rolling Stock on October 18–21, 2016]. Warsaw, 2016. 86 p.
5. Smol'yaninov A.V., Yakupov A.R. Sravnitel'nyi analiz metodik rascheta ustoichivosti kolesnoi pary ot skhoda s rel'sov [Comparative analysis of methods for calculating the stability of a wheelbase from derailment]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017, no. 1, pp. 48–54.
6. Bagheri M., Saccomanno F., Chenour, Sh., Fu L. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident; Analysis & Prevention*, 2011, vol. 43 (3), pp. 613–620.
7. Eom B.-G., Lee H.S. Assessment of running safety of railway vehicles using multibody dynamics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, vol. 11 (2), pp. 315–320.
8. Gilchrist A.O., Brickle B.V. A re-examination of the proneness to derailment of a railway wheelset. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1976, vol. 18 (3), pp. 131–141.
9. Ham Y.-S., Lee D.-H., Kwon S.-J., You W.-H., Oh T.-Y. Continuous measurement of interaction forces between wheel and rail. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, vol. 10 (1), pp. 35–39.
10. Kim M.S., Kim G.Y., Kim H.T., Koo J. Theoretical cross-wind speed against rail vehicle derailment considering the cross-running wind of trains and the dynamic wheel-rail effects. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30 (8), pp. 3487–3498.
11. Koo J. A new derailment coefficient considering dynamic and geometrical effects of a single wheel-set. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, vol. 28 (9), pp. 3483–3498.
12. Liu X., Saat M.R., Barkan Ch. P.L. Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, vol. 98, pp. 1–9.
13. Tyun'kov V.V., Rychkov N.P., Buzunova V.S., Romashov A.V. Sintez konstruktivnykh reshenii na osnove dempfirovaniya v predelakh vnutrennei kinematiki gruzovykh vagonov [Synthesis of constructive solutions based on damping within the internal kinematics of freight wagons]. *Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami* [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2021, no. 3 (11), pp. 9–16.
14. Tyun'kov V.V., Buzunova V.S., Pashkov A.E. Tekhnologicheskii algoritm v perspektivnom konstruktivnom razvitii zheleznodorozhnykh gruzovykh vagonov kolei 1520 mm [Technological algorithm in the prospective constructive development of railway freight cars of 1520 mm gauge]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 18–26.
15. Kozlov P.V. Vliyaniye bazy vagona-platformy sochlenennogo tipa na zapas ustoichivosti ot skhoda kolesa s rel'sa [Influence of the base of the articulated platform car on the stability margin from wheel derailment]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletins of the Saint Petersburg Transport University], 2011, no. 4, pp. 55–62.
16. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
17. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010. 211 p.
18. Madzhidov F.A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'yu ego ispol'zovaniya s uchetom izmeneniya parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Estimation of the safety parameter of a freight car and management of the efficiency of its use, taking into account changes in the parameters of the operating environment]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 96–98.

### Информация об авторах

**Тюньков Владислав Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: tunkov@bk.ru.

**Мартыненко Любовь Викторовна**, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: liuba.martinenko @yandex.ru.

**Павлова Дарья Игоревна**, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: dasha\_pavlova\_00@inbox.ru.

**Атарцэцэг Саранзаяа**, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: saraa.1234@yahoo.com.

### Information about the authors

**Vladislav V. Tyun'kov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: tunkov@bk.ru.

**Lyubov' V. Martynenko**, Assistant Professor of the Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: liuba.martinenko @yandex.ru.

**Dar'ya I. Pavlova**, Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: dasha\_pavlova\_00@inbox.ru.

**Saranzayaa Atartsetseg**, Department of Wagons and wagons facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: saraa.1234@yahoo.com.