

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

---

УДК 519.86  
ББК 22.193

**В. В. ТЮНЬКОВ**

*доктор технических наук, профессор,  
Иркутский государственный университет путей сообщения*

**А. В. КРУГЛОВ**

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

**Е. Г. САННИКОВА**

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

## КОНСТРУКТИВНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ КАК ОРДИНАРНОГО АДАПТЕРА В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ (ПРИКЛАДНОЙ АСПЕКТ)

Расширенное развитие сферы применения численных методов в практике решения инновационных проблем ситуационной надежности сложных технических систем предполагает усиление обратной связи между подсистемами при использовании как типовых индикаторов, так и конструктивных решений в целом. В статье приведены результаты промежуточного этапа анализа фактора конструктивной интерпретации целевой функции сборочных единиц многоуровневой системы для минимизации риска искажений встречных силовых (напряжения, деформации и др.) потоков в условиях граничной неопределенности. Прикладной акцент в анализе был сделан на возможное проявление резервов ресурса элементов, определяемого в процессе эксплуатации объектов по данным оценок и накопления базы данных по измеренным параметрам.

*Ключевые слова:* композиционная устойчивость; расчет на надежность; элементы систем; ситуационные взаимодействия; встречные силовые потоки; демпфирование деструкции.

**V. V. TYUNKOV**

*Doctor habil. (Engineering), Professor  
Irkutsk State University of Railway Engineering*

**A. V. KRUGLOV**

*Irkutsk State University of Railway Engineering*

**E. G. SANNIKOVA**

*Irkutsk State University of Railway Engineering*

## CONSTRUCTIVE INTERPRETATION OF CRITERION FUNCTION AS AN ORDINARY ADAPTER IN A DIFFICULT SYSTEM (APPLIED ASPECT)

Advanced development of the numerical methods application in innovative situational problems solving practice, which are typical for complex technical systems, entails reinforcement of feedback between subsystems that use standard indicators along with constructive approaches. The article presents the results of the intermediate stage of the analysis of the factor of constructive interpretation of criterion function of assembly units of multilevel system for minimization of risks of counter force flows' (pressure, deformation etc.) distortions in conditions of boundary uncertainty. The applied emphasis was made on possible display of reserves of potential of the elements determined in objects operation process in accordance with data of estimations and accumulation of a database on measured parameters.

*Keywords:* composite stability; account on reliability; elements of systems; situational interactions; counter force flows; damping of destruction.

В настоящее время в российской практике, как и за рубежом, широкое распространение получили вероятностные методы конструктивных решений различных объектов и реализованные на их основе расчетно-аналитические комплексы типа ANSYS, NASTRAN, SPSS и др. Поскольку результат прикладного исследования при теоретическом решении интегрированной проблемы уже в концептуальной модели реального процесса предполагает несколько критических вариантов с некоторой возможностью оптимизации при одном апробированном критерии, то это не позволяет (в силу ряда причин) достичь желаемой математической строгости, а их применение на практике требует сравнительно больших затрат как усилий экспертов, так и компьютерного времени на выполнение расчетов. Известны также примеры реализации отдельных элементов детерминистского подхода к сложным системам, но и они, к сожалению, часто ограничиваются лишь формальным исследованием чувствительности.

Если модель по критическим параметрам согласована с сопредельными силовыми структурами, то она успешна, стабильна и для большинства случаев апробирования эффективна, в том числе в режиме реального времени. Здесь успех — это когда внутренний потенциал сложной системы и ее пространственный силовой каркас согласованы с окружением, и она попадает в те события, которые ей нужны. Если же время или структура модели не согласованы, то она находится в постоянной корректировке, перестает правильно воспринимать в режиме реального времени информацию, генерирует результаты, близкие к ошибочным.

Адаптивный подход к реализации предустановленной функции и ее отдельных вариантов предполагает параметрическое обеспечение сборочного узла (подсистемы) эффективной материальной оболочкой с тем же критерием оптимальности (целевой функцией).

Источниками здесь являются:

- неопределенности из-за ограниченной точности численных методов решения математических уравнений, описывающих поведение расчетной модели в целом, предполагаются известными, либо рассчитываются локально для каждого шага интегрирования по времени;

- неопределенности исходных данных для составления расчетной модели (геометрические характеристики, свойства материалов, режимные параметры) задаются как функции времени, либо постоянны.

Важной и дополнительной характеристикой всех этих групп является, в общем случае, их связь со временем, в котором разворачиваются деструктивные процессы, т. е. неопределенность момента времени реализации некоторого значения или зависимости неопределенности какого-либо параметра (в общем случае — всех) от времени (неявно выраженная через зависимость от меняющихся режимов — фазовых областей; например, большая или меньшая точность используемых замыкающих соотношений при разных напряжениях, деформациях, амплитудах колебаний и пр.; большая или меньшая точность знания свойств материалов в разных диапазонах их состояния и т. д.).

Отметим некоторые особенности влияния комплекса «граничные условия». Очевидно, что текущие неопределенности основных параметров из точки взаимодействия двух или более генераторов фактически могут определяться только неопределенностями параметров из преобладающего объекта воздействия, т. е. не зависят явно от значений неопределенностей любого другого в предыдущие моменты времени. Следует, однако, оговорить случаи, когда неопределенность некоего параметра из других подсистем (объектов) накладывается (вводится) как возможные пределы его изменения в нулевой момент времени переходного режима (неопределенность начальных условий).

Следует также иметь в виду наличие «бифуркаций», т. е. ветвления процессов при достижении моделируемой системой (с учетом неопределенностей) некоторого уровня параметра срабатывания условий фазового перехода к новому режиму передачи вибрационных и деформационных воздействий как на сборочные узлы объекта исследования, так и на отдельные детали, работающие в режиме, близком к критическому. Реализованный коэффициент безопасности в системе обеспечения ситуационной надежности определяется по инструментально измеренным величинам параметров и соотносится с нормированным уровнем.

В случае, когда система долговременного контроля вводится через некоторое время после начала эксплуатации объекта (рис. 1), то переход от  $R_n$  к  $R_\phi$  осуществляется поэтапно, когда использование ситуационного резерва ( $R_{изм} \rightarrow R_\phi$ ) —  $R_n$  начинается с момента  $t_{кф_1}$  с последующей корректировкой в периоды  $t_{кф_2}, \dots, t_{кф_n}$  со скважностью контроля  $M$ . Частным случаем математической интерпретации этого последующего процесса может служить кумулятивная модель отказа, которая учитывает монотонное изменение (ухудшение) параметров системы, происходящее в процессе ее эксплуатации, в результате взаимодействия с окружающей средой, а также из-за внутренних процессов, приводящих к деструкции ее элементов.

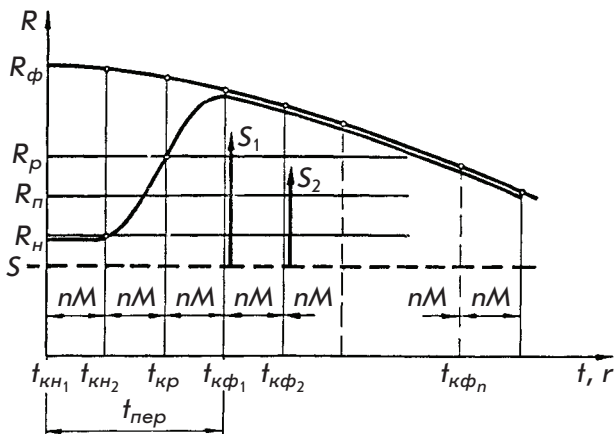


Рис. 1. График перехода от  $R_n$  к  $R_\phi$  в системе долговременного контроля:

$t_{пер}$  — переходный период включения;  
 $t_{кн_1}$  — начало включения

Допустимой областью для системы будет являться выпуклое тело в  $n$ -мерном евклидовом пространстве при ограничении по времени  $t_{кф_n} - t_{кф_{n+1}}$ ;  $t_{кф_{n+1}} = t_{кр} = nM$ , где  $M = \text{const}$ ;  $n$  — любое целое число.

Согласно линейной модели накопления усталостных повреждений условие разрушения  $\sum n(S_j)/N(S_j) = 1$ , где  $n(S_j)$  — число циклов нагружения в условиях эксплуатации с характерным параметром нагрузки  $S_j$  (например, воздействиями типа экстремальных динамических);  $N(S_j)$  — предельное число повреждающих циклов или факторов, принятых в расчетах при проектировании конструкции.

Принятое условие соответствует использованию меры повреждения — равной нулю

для неповрежденного элемента и единице для разрушенного.

Основное свойство кумулятивной модели определяется условием  $[R(t_{кф_{n+1}})]^{-1} \geq [R(t_{кф_n})]^{-1}$ , согласно которому вектор качества системы квазимоноotonно приближается к границе допустимой области так, что вероятность его выхода из допустимой области на любом отрезке  $t_{кф_n} - t_{кф_{n+1}}$  совпадает с вероятностью его выхода из этой области в момент  $t_{кф_{n+1}}$ .

Данная схема может быть использована и для прогнозирования состояния элементов системы при последовательных экстремальных воздействиях с периодом между ними  $\Delta t < t_{кф_n} - t_{кф_{n+1}}$  с целью учета величины реального резерва неразрушимости или оптимизационных расчетах общей системы обеспечения надежности.

Преломляя предлагаемый подход, например для совершенствования конструктивного решения грузового вагона железнодорожного транспорта, определяем, что основной функционально напряженной сборочной единицей его является экипажная часть. Системный анализ аварийности последних лет, в том числе с использованием диаграмм Парето, выделяет наряду с автотормозной системой передаточную функцию взаимодействия груза с верхним строением пути через посредство той или иной модификации грузовых тележек.

На основе серии диаграмм Исикавы устанавливаем исходные условия перекомпозиции и частичной реконструкции объекта с сохранением нормированной безопасности и определяем целевую функцию инновационной конструкции тележки грузового вагона, где на первом этапе реальный критерий выбора варианта — уменьшение износа узлов и деталей ходовой части вагонов, в том числе при вписывании в кривые.

Задача решается тем, что применяется тележка грузового вагона, содержащая раму из боковин, надрессорную балку, рессорный комплект, колесные пары. Отличается такая тележка от общепринятых тем, что колесная пара, работающая с внешней жесткостью, разделена на две полуоси и каждая часть колесной пары снабжена по обе стороны колеса буксами, причем обе части колесной пары сочленены в центральной части сумматором, на буксах размещены боковины, в нижней части поперек боковинам располо-

жена подressорная балка, на которой размещается рессорный комплект<sup>1</sup>.

С усложнением профиля пути и скоростного режима проявляется интенсивное изнашивание гребней и как частный случай — повышенная вероятность схода с рельс при расширенной колее, в том числе бесстыковых путей. При движении вагона на кривых участках железнодорожного пути возникают сложные колебания, которые приводят к усиленному износу колес и рельсов: колеса, которые проходят по внешнему рельсу катятся с большей угловой скоростью, чем колесо, которое проходит по внутреннему рельсу. В связи с этим, чтобы сравнить эту разницу, колесо, которое катится по внутреннему рельсу, проскальзывает по рельсу, что приводит к усиленному износу рельса и колеса, а также появлению дополнительных колебаний, которые создают для вагона дополнительные поперечные воздействия.

В предложенной конструкции тележки<sup>2</sup> колеса вращаются отдельно и, поэтому колесо при проходе по внутреннему рельсу катится, а не проскальзывает, что уменьшает вероятность дополнительных колебаний. Вместе с тем при прохождении кривых проявляются силы, которые могут привести к схождению колеса с рельса. Для предупреждения этого и смягчения (устранения) отрицательных силовых связей в ось колесной пары встроен сумматор, который при этом сохраняет полезные связи и воздействия, возникающие в транспортном средстве при проходе сложных профилей, в том числе трехмерных, а также при износах узлов и деталей, близких к предельно-допустимым.

Рабочий ресурс любого транспортного средства оптимизируется при условии сопоставимости его эксплуатационных параметров уровню ситуационных нагрузок и воздействий [2; 3]. В структуре «АСУ В» ОАО «РЖД» при учете безопасности движения в поездной и маневровой работе, например изломы боковых рам и надрессорных балок тележек вагонов, классифицируются особые случаи брака, независимо от того привели ли они к сходам вагонов или нет [1].

Традиционно начинается с оценки взаимодействия пары «колесо — рельс», которое отражается, прежде всего, на необрессоренной массе тележки, проявляясь в интенсивном несимметричном износе колесной пары. Далее уровень силового воздействия на узлы тары и груз определяется совершенством пружинно-фрикционного амортизатора. Существует оценка, что пружинно-фрикционный амортизатор — результат применения весьма упрощенной теории контактирования деталей без учета их упругого взаимодействия.

Рессорное подвешивание является одним из важнейших элементов ходовых частей, от которого зависит плавность хода при движении вагона, в особенности при прохождении стыковых соединений и продольных неровностей рельсов, крестовин и т. д. В этих случаях происходит колебание подвижного состава и возникают динамические силы, действующие на элементы конструкции вагона, пассажиров и перевозимый груз. Традиционно рессорное подвешивание состоит из упругих элементов, гасителей колебаний и возвращающих устройств. Комплекс этих устройств должен обеспечивать снижение ускорений колебательного движения и уменьшение воздействия динамических сил на элементы вагона, создавая плавный ход подвижного состава в процессе длительной эксплуатации. При этом параметры рессорного подвешивания должны соответствовать нормативным значениям и не должны существенно изменяться с течением времени.

В данной ситуации как альтернативный вариант можно предложить конструкцию из деталей эллиптической рессоры Галахова, которая состоит из двух пятирядных половин, соединенных вместе наконечниками специальной формы, укрепляемых к концам коренных листов болтами или заклепками, выполняющих функцию пружинно-фрикционного амортизатора, реализуемую в виде двухконтурной системы, обладающей диссипативными свойствами. Представленная конструкция рессорного комплекта тележки грузового вагона (рис. 2) состоит из верхнего и нижнего скрепленных пакетов листов 5, соединенных между собой хомутом и шкворнем 3, проходящим через среднюю часть пакета листов 5 с подпятником 4 в пятник 2, расположенный на балке рамы вагона.

<sup>1</sup> Патент РФ № 2440907 от 27.01.2012. Тележка грузового вагона.

<sup>2</sup> Там же.

Концы пакетов листов 5 снабжены оконцевателями 10. Верхний пакет листов 5 вогнутой частью располагаются вниз. Нижний пакет листов 5 вогнутой частью располагается вверх. Нижний пакет листов 5 опирается через трибопару 11 на подрессорную балку 12 и может скользить по ней. Верхний пакет листов 5 через скользуны 7 воспринимает нагрузку от кузова вагона.

Устройство работает следующим образом. При движении вагона по неровностям железнодорожного пути возникают вертикальные колебания. Воспринимает сначала эти колебания колесо тележки, далее колебания воздействуют на буксу, боковины 6, подрессорную балку 12, нижний комплект листов 5, верхний комплект листов 5 и заканчивается передачей на кузов вагона через скользуны 7. Оппозитно (в обратном порядке) идут колебания от кузова вагона с частичным взаимодействием со встречной волной, что способствует виброгашению и диссипации энергии в листовом рессорном комплекте. В данном конструктивном решении статические и динамические воздействия от кузовной части через скользуны 7 передаются на верхний пакет листов 5 рессорного комплекта, который амортизируя и частично поглощая амплитудно-частотную составляющую, передает воздействие далее через жесткий контакт средней части пакета листов, дополнительно стянутый хомутом, на нижний пакет листов 5, в котором также осуществляется

эффект амортизации с диссипацией энергии. Концы нижнего пакета листов 5 посредством оконцевателя 10 соединены с трибопарой 11, где также предполагается диссипативный процесс и стандартная передача ориентированного воздействия через боковины 6 и буксовые узлы на колесо и далее контакт колесо — рельс. Таким образом достигается смещение частот для ухода от возможных резонансных проявлений системы.

Обратное воздействие от верхнего строения пути проходит по этой же цепочке со стохастическим взаимодействием встречных потоков энергии с их частичным взаимопоглощением, зависящим от настройки параметров системы. При этом, параметры настройки определяются упругими и диссипативными свойствами отдельных деталей и конструкции в целом, что обеспечивает регламентированные технические параметры движения. Предлагаемая композиция позволяет проводить оптимизацию режима смещением узлов амплитудно-частотного силового взаимодействия элементов конструкции.

Необходимый момент трения, возникающий в скользунах при повороте тележки относительно кузова в плане, определяется по формуле:

$$M_{mp} = \frac{m_{6p} V^2}{2} \left( 1 + \frac{2m_m}{m_{6p}} \right) \frac{nS}{d_k} \psi_{\max},$$

где  $m_{6p}$  — масса вагона брутто;  $V$  — скорость движения вагона;  $m_m$  — масса одной тележ-

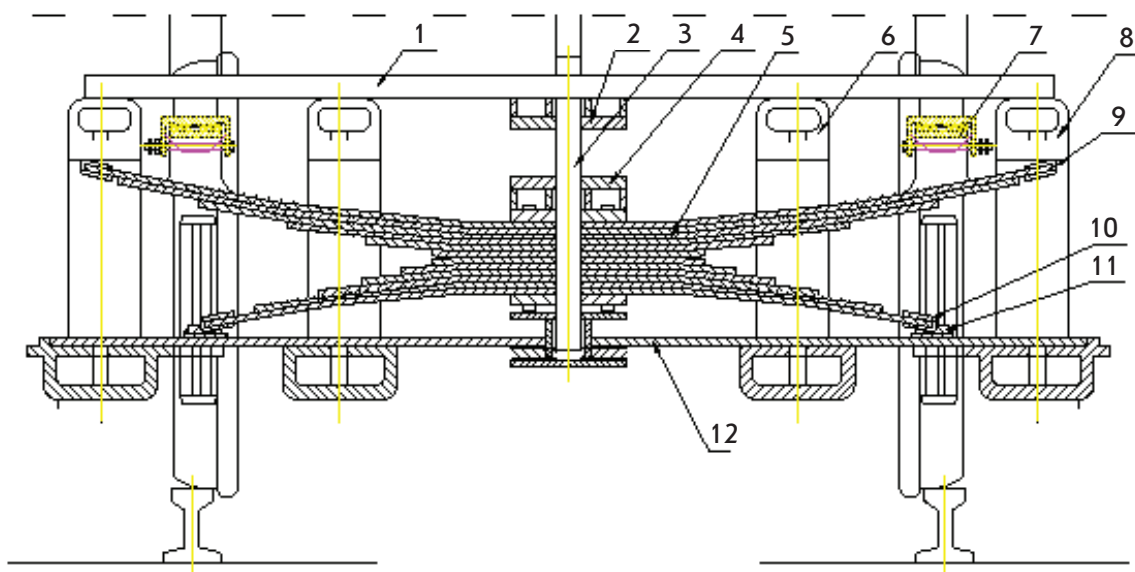


Рис. 2. Конструкция рессорного комплекта тележки грузового вагона

ки;  $n$  — расчетная коничность поверхности катания колеса (для колес по ГОСТ 9036-88  $n = 0,05$ );  $2S$  — расстояние между кругами катания колесной пары;  $d_k$  — диаметр колеса по кругу катания;  $\psi_{\max}$  — угол поворота тележки за счет зазоров в рельсовой колее;  $\psi_{\max} = \delta / 2l_m$ , здесь  $\delta = 20$  мм — расчетное значение поперечного зазора колесной пары в рельсовой колее на прямом участке пути;  $2l_m$  — база тележки.

Основными параметрами рессорного подвешивания являются статический прогиб подвешивания (гибкость), конструкционный запас прогиба и коэффициенты относительного сопротивления (относительного трения) демпферов.

Жесткость отдельных упругих элементов подвешивания определяется по следующим формулам:

— вертикальная жесткость листовой незамкнутой рессоры

$$C_b = \frac{Ebh^3}{6l^3}(3m + 2n);$$

— вертикальная жесткость эллиптической рессоры (типа Галахова)

$$C_b = \frac{Ebh^3}{12l^3}i(3m + 2n),$$

где  $b$  — ширина листа;  $h$  — толщина листа;  $m$  — число коренных и подкоренных листов (для эллиптических рессор  $n$  и  $m$  берутся для одной половины ряда рессор);  $n$  — число листов ступенчатой части;  $2l$  — рабочая длина рессоры;  $E$  — модуль упругости при растяжении;  $i$  — число рядов в эллиптической рессоре.

Следует также учесть, что результаты расчетов должны соответствовать нормам

проектирования несамходных грузовых и пассажирских вагонов производства России и других стран, предназначенных для эксплуатации на общих основаниях на сети железных дорог РФ и СНГ колеи 1520 мм.

Для полноты отражения декларированной интегрированности любой системы в облаке нагрузок и воздействий поддержим тренд целевой функции, направленный на адаптивность внутреннего потенциала сложной системы и ее пространственного силового каркаса на согласование с окружением, чтобы она попадала в те события, которые ей нужны. Если же время или структура модели не согласованы, то она находится в постоянной корректировке, неэффективно расходует ресурс как свой, так и сопредельной системы. Например, для подвижного состава одной из прямо контактирующих систем является верхнее строение пути, которое может быть представлено логически подобной моделью, частично получившей конструктивное решение в патенте<sup>1</sup>.

Таким образом, совместная работа сложных сопредельных систем, объединенных одной целевой функцией, делает возможным на стадии конструктивного воплощения осуществлять оптимальную перекомпозицию элементов с целью поддержания позитивных реакций и технологических свойств (диссипация экстремальных воздействий на стыках, минимизация гистерезиса в узлах и деталях, повышение экологичности и т. д.).

<sup>1</sup> Патент РФ 2475580 от 20.02.2013. Балластная призма для скоростных грузонапряженных участков бесстыкового железнодорожного пути.

### Список использованной литературы

1. Пашков Н. Н. Адаптивный алгоритм структурной оптимизации базы данных АСУ / Н. Н. Пашков, В. В. Тюньков, А. В. Кулешов // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем : сб. науч. тр. — Иркутск : ИргУПС, 2006. — Вып. 4. — С. 26–38.
2. Тюньков В. В. Полиуровневая система ситуационной надежности конструкций сооружений при экстремальных динамических воздействиях / В. В. Тюньков. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2008. — 180 с.
3. Тюньков В. В. Последовательное формирование потенциала неразрушимости узлов и деталей подвижного состава / В. В. Тюньков // Подвижной состав XXI века : тр. междунар. науч.-практ. конф. — Хабаровск : ДВГУПС, 2008. — С. 36–39.

### References

1. Pashkov N. N., Tyunkov V. V., Kuleshov A. V. Adaptive algorithm of structural optimization of the database information system. *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem* [Information technologies and problems of complex systems mathematical modeling]. Irkutsk, Irkutsk State University of Railway Engineering Publ., 2006. Iss. 4, pp. 26–38 (in Russian).

2. Tyunkov V. V. *Poliurovnevaya sistema situatsionnoy nadezhnosti konstruksiy sooruzheniy pri ekstremalnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Polylevel system of situational reliability of structures under extreme dynamic impacts]. Irkutsk, Baikal State University of Economics and Law Publ., 2008. 180 p.

3. Tyunkov V. V. *Consequential formation of the potential of indestructibility of units and parts of the rolling stock. Podvizhnoy sostav XXI veka* [A rolling stock of the 21st century]. Khabarovsk, Far East University of Railway Engineering Publ., 2008. Pp. 36–39 (in Russian).

#### Информация об авторах

Тюньков Владислав Владимирович — доктор технических наук, профессор, кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, e-mail: tunkov@bk.ru.

Круглов Андрей Валерьевич — аспирант, кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, e-mail: tvorog84@rambler.ru.

Санникова Елена Георгиевна — аспирант, кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, e-mail: sannikova@irgups.ru.

#### Authors

Tyunkov Vladislav Vladimirovich — Doctor habil. (Engineering), Professor, Carriage and Wagon Department, Irkutsk State University of Railway Engineering, 15 Chernishevskogo St., 664075, Irkutsk, Russia, e-mail: tunkov@bk.ru.

Kruglov Andrei Valerjevish — PhD student, Carriage and Wagon Department, Irkutsk State University of Railway Engineering, 15 Chernishevskogo St., 664075, Irkutsk, Russia, e-mail: tvorog84@rambler.ru.

Sannikova Elena Georgievna — PhD student, Carriage and Wagon Department, Irkutsk State University of Railway Engineering, 15 Chernishevskogo St., 664075, Irkutsk, Russia, e-mail: sannikova@irgups.ru.