

*ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА*

В городской транспортной системе важное место занимают трамвайные вагоны. Этот вид транспорта является наиболее перспективным во многих странах мира (Россия, Германия, Чехия и др.). Он имеет минимальные эксплуатационные затраты, низкий уровень шума, хорошие ходовые качества.

Динамика трамвайного вагона оказывает большое влияние как на комфортабельность перевозки пассажиров, так и на работоспособность основных частей подвижного состава. Моделирование движения трамвайного вагона в системе «вагон – путь» дало возможность прогнозировать динамическую нагруженность и определить рациональные параметры рессорного подвешивания из условия обеспечения качественной динамики вагона.

Движение вагона описывалось системой обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с нелинейными правыми частями. Расчетная схема приведена на рисунке 1. Система уравнений движения имела вид [1]

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{\dot{q}\} + [C] \cdot \{q\} = \{F\}$$

где  $[M]$ ,  $[K]$  и  $[C]$  являются квадратными матрицами масс, демпфирования и жесткости системы;  $\{\ddot{q}\}$ ,  $\{\dot{q}\}$ ,  $\{q\}$  - обобщенные вектора ускорений, скоростей и перемещений, соответствующие каждой степени свободы;  $\{F\}$  – вектор обобщенных сил.

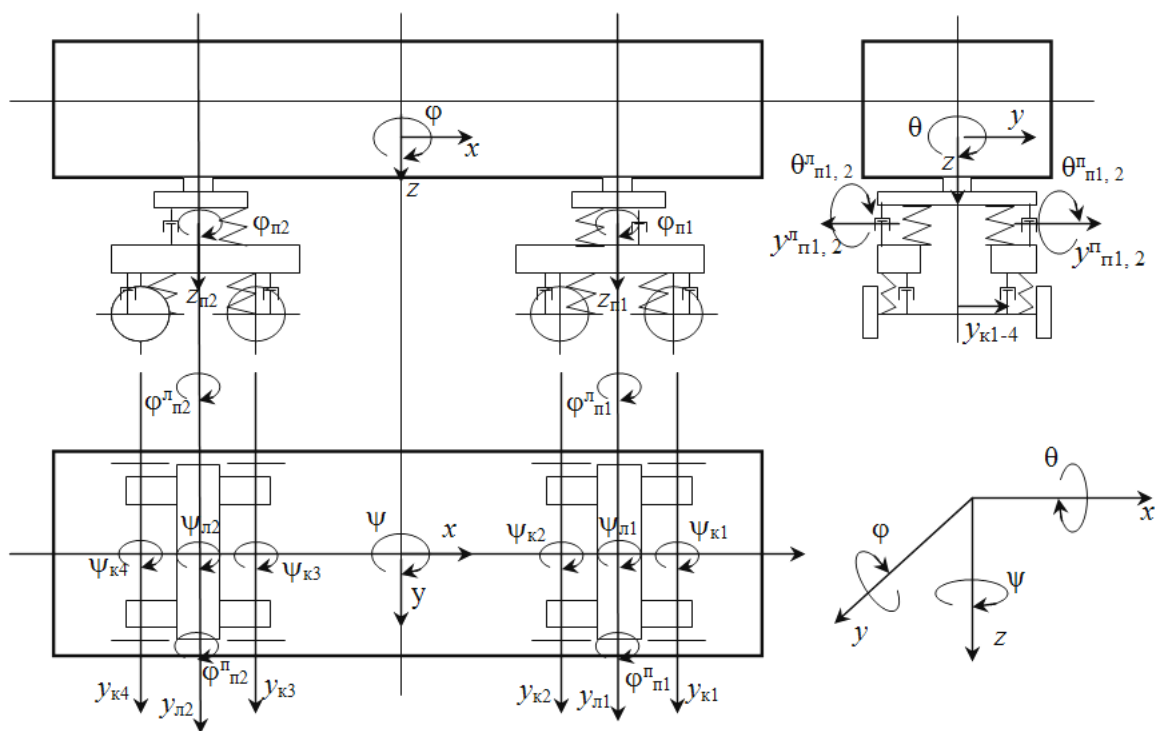


Рис. 1. Расчетная схема трамвайного вагона

Модель трамвайного вагона была реализована в виде трех подсистем (рисунок 2).

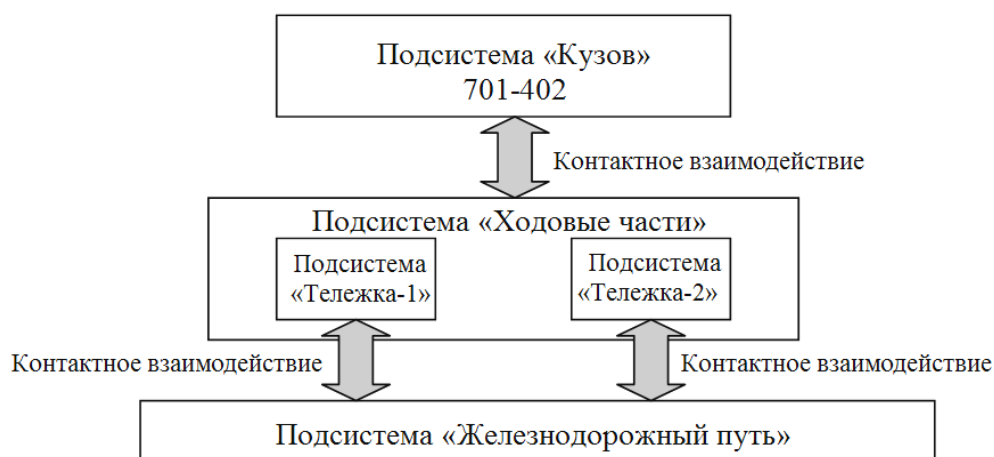


Рис. 2. Общая схема математической модели трамвайного вагона

Каждая подсистема включает одно или несколько недеформируемых тел, связанных между собой набором силовых или кинематических связей.

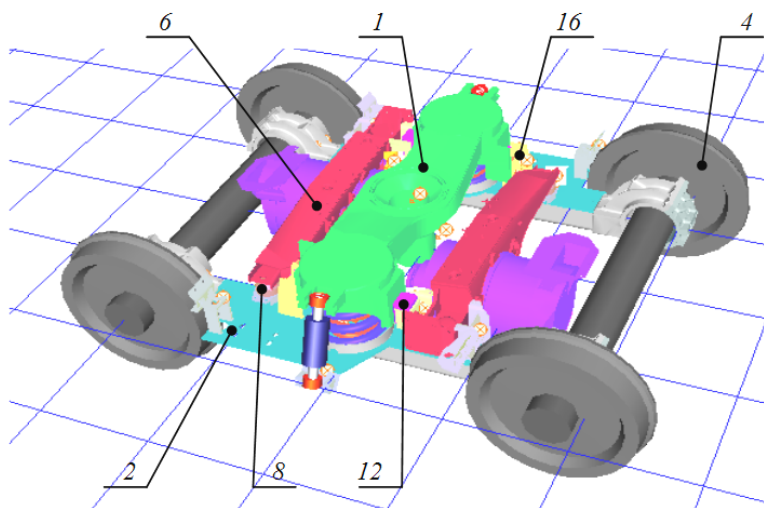
Подсистема «Кузов» представляется в виде твердого тела, для которого введены моменты инерции, масса, положение центра масс.

Подсистема «Ходовые части», в которую входят две тележки, состоит из множества тел, соединенных между собой упругими и диссипативными элементами.

Для описания модели тележки трамвайного вагона используется модуль ввода данных комплекса UM, преимуществами которого являются графическая визуализация всех элементов конструкции в процессе сборки (тел, силовых элементов, шарниров), возможность описания объекта как в режиме ввода информации в стандартные таблицы, так и с помощью специализированного языка описания модели [2].

При описании модели было задано количество тел, входящих в модель, наличие упругих диссипативных связей и количество шарниров. При этом понятие «шарнир» используется в обобщенном смысле. Под шарниром понимается как обычная кинематическая пара (высшая, низшая) любого класса, так и фиктивный шарнир, используемый для задания координат тела. Тела и шарниры нумеровались порядковыми числами (1, 2, ...).

Разработанная модель тележки трамвайного вагона состоит из 17 тел (рисунок 3).



1 – надрессорная балка; 2, 3 – продольные балки; 4, 5 – колесные пары; 6, 7 – моторные балки с тяговыми двигателями; 8–11 – резиновые демпферы моторной балки; 12–15 – продольные резиновые элементы;

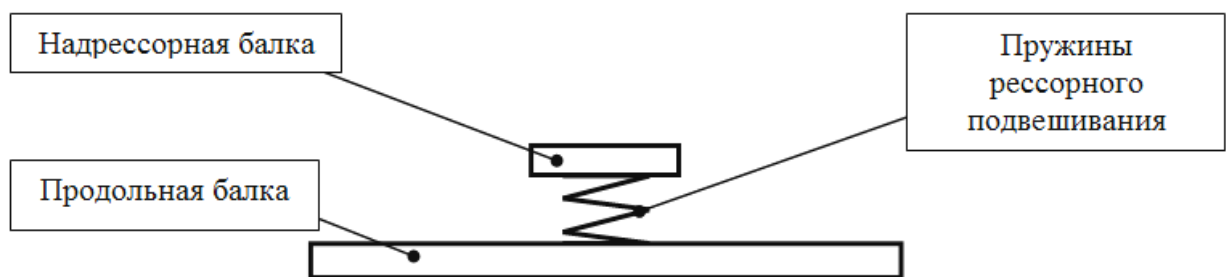
16, 17 – поперечные резиновые элементы

Рис. 3. Нумерация тел тележки трамвайного вагона

Описание шарниров служит основой введения координат, определяющих положение каждого тела модели относительно инерциальной системы координат (СК). Обязательное условие полного описания модели – ее связанность, то есть, во-первых, каждое тело обязательно соединяется по меньшей мере одним шарниром с каким-либо другим телом (среди которых может быть и базовая СК), во-вторых, от каждого тела через цепочку шарниров можно переместиться к базовой СК [3].

Взаимодействие между телами в модели тележки трамвайного вагона осуществляется с помощью сил, упругих и диссипативных связей. В математической модели трамвайного вагона были реализованы силовые характеристики следующих элементов:

- пружин центрального рессорного подвешивания, по средствам введения линейного элемента «пружина» и задания продольной и поперечной жесткости (рисунок 4);
- резиновых амортизаторов с использованием разработанной модели (рисунок 5) [3].
- гидравлических гасителей путем введения специального биполярного элемента, и задания силы выражением:  $F = \beta \cdot V$ , где  $\beta$  – параметр сопротивления,  $V$  – скорость перемещения поршня гидравлического гасителя колебаний (рисунок 6);



*Рис. 4.* Соединение надрессорной балки с продольной балкой тележки с помощью пружин

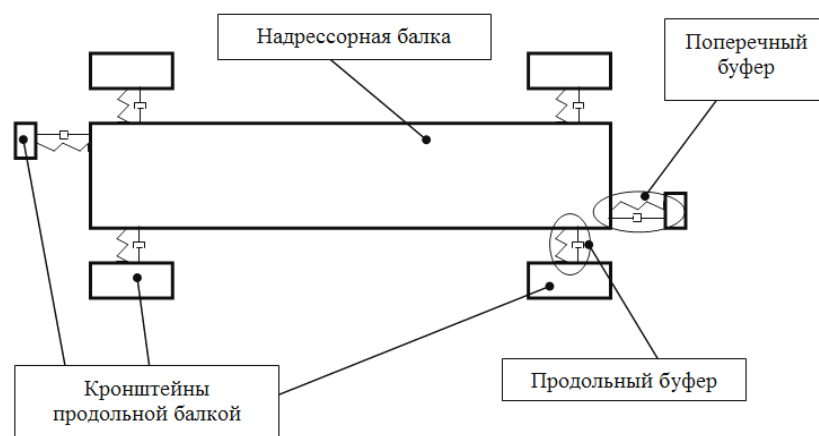


Рис. 5. Схема соединения надрессорной и продольных балок тележки по средствам резиновых амортизаторов

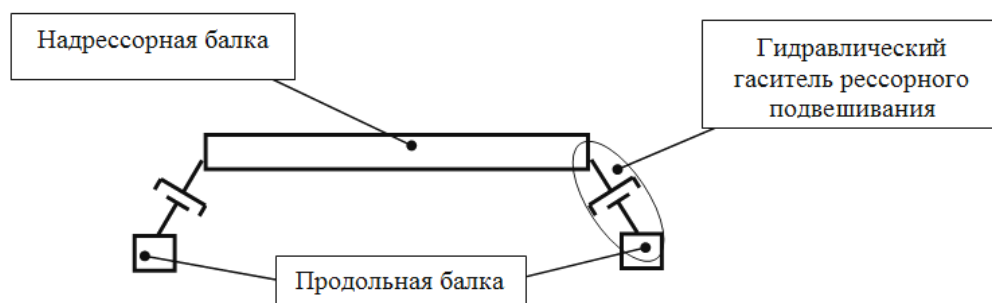


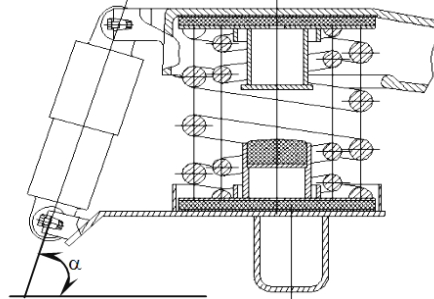
Рис. 6. Схема соединения надрессорной и продольных балок тележки по средствам резиновых амортизаторов

Подсистема «Железнодорожный путь» включает в себя моделирование различных профилей рельсов, колес и дает возможность введения неровностей пути в вертикальном и поперечном направлениях (рисунок 7).



Рис. 7. Схема подсистемы «Железнодорожный путь»

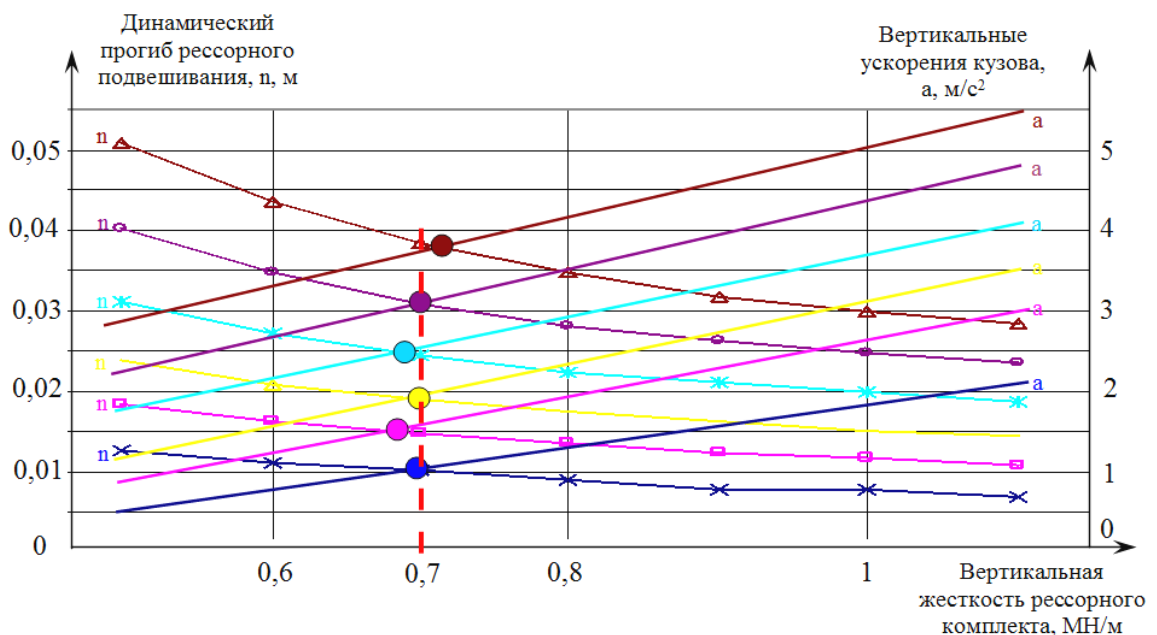
Разработанная модель позволяет определять рациональные параметры рессорного подвешивания (рисунок 8) трамвайного вагона (вертикальную жесткость пружин, угол наклона и параметр сопротивления гидравлического гасителя колебаний) при прохождении его по неровностям рельсового пути.



$\alpha$  – угол наклона гидравлического гасителя к горизонтали

Рис. 8. Схема центрального рессорного подвешивания тележки

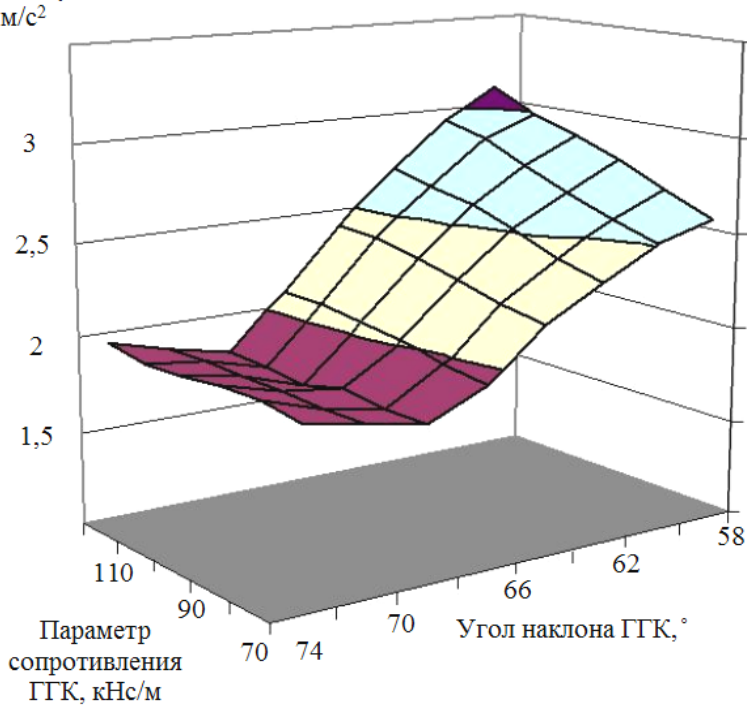
Критерием оценки параметров рессорного подвешивания служили наименьшие значения ускорений кузова трамвайного вагона по осям координат (рисунок 9, 10).



-  $v=8\text{ м/с}$ ; -  $v=10\text{ м/с}$ ; -  $v=12\text{ м/с}$ ; -  $v=14\text{ м/с}$ ; -  $v=16\text{ м/с}$ ; -  $v=18\text{ м/с}$

Рис. 9. График зависимостей динамического прогиба рессорного подвешивания и вертикальных ускорений кузова от вертикальной жесткости рессорного комплекта и скорости движения при максимальной нагрузке

Поперечные  
ускорения кузова,  
 $\text{м/с}^2$



Вертикальные  
ускорения кузова,  
 $\text{м/с}^2$

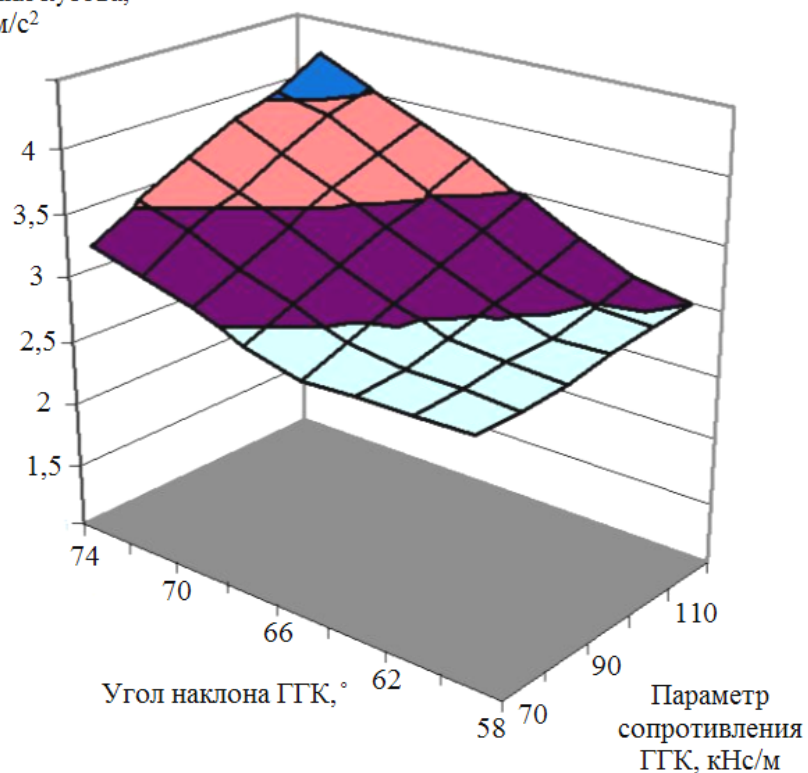


Рис. 10. Графики зависимости вертикальных и поперечных ускорений кузова от угла наклона и параметра сопротивления ГТК при максимальной загрузке ( $m = 11,8 \text{ т}$ ) и конструктивной скорости движения  $V = 18 \text{ м/с}$

По результатам анализа динамической нагруженности трамвайного вагона (рисунок 9,10) были определены рациональные параметры рессорного подвешивания: вертикальная жесткость, величина угла наклона гидравлического гасителя колебаний и его параметр сопротивления.

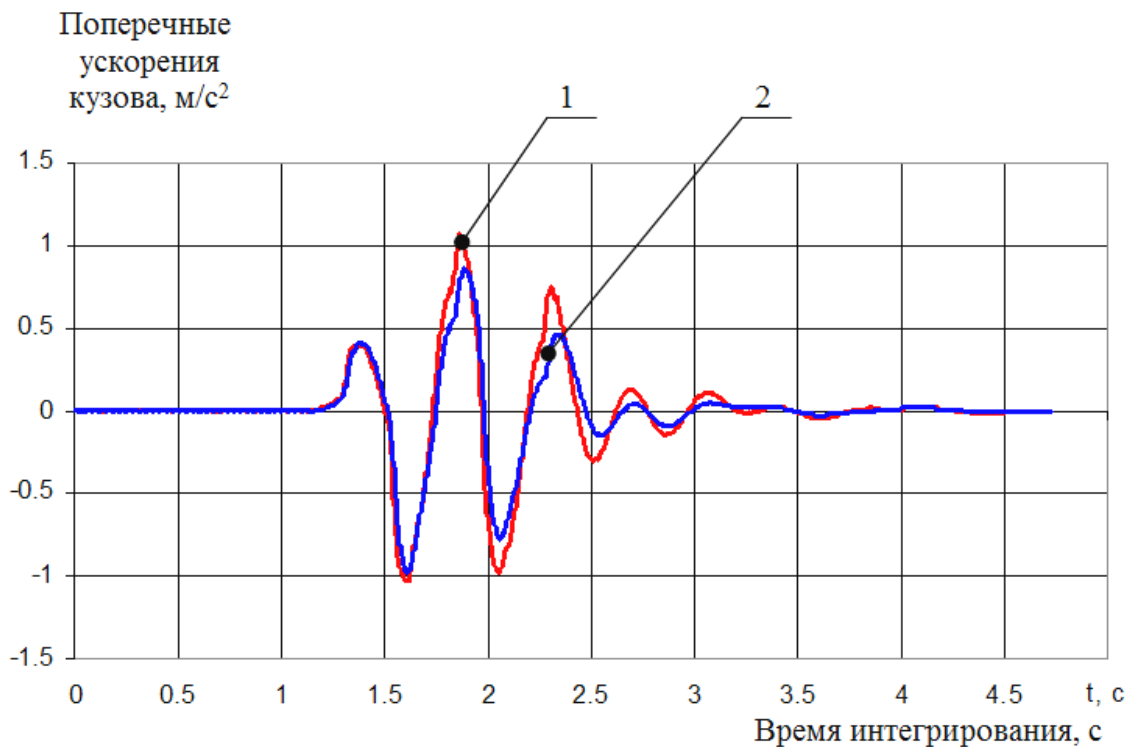
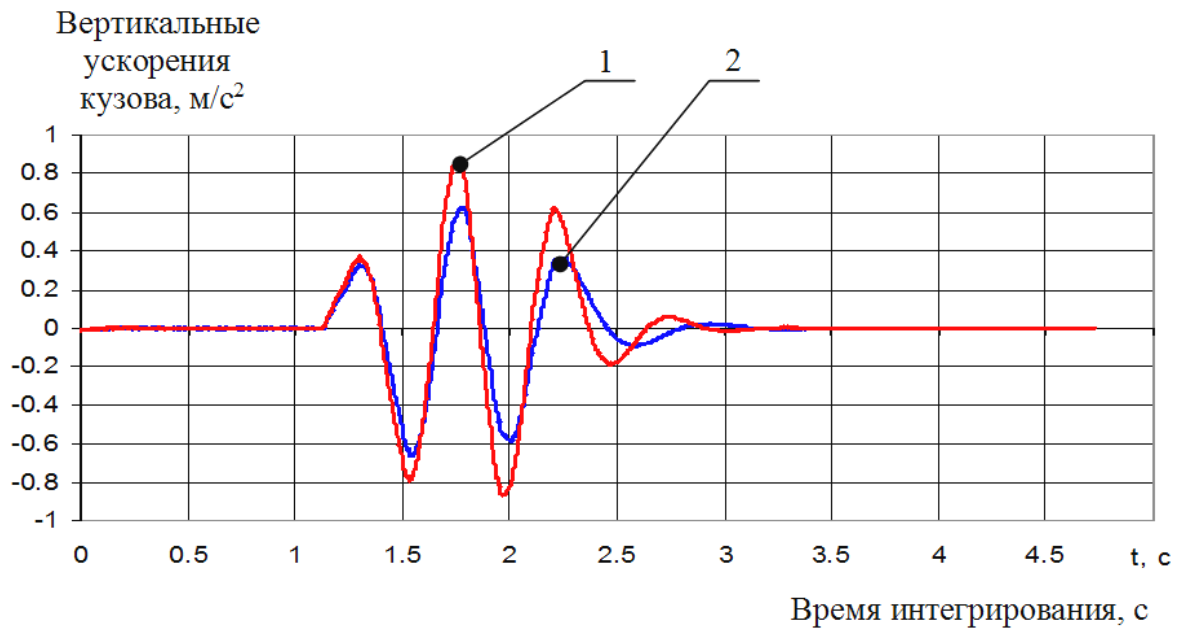


Рис. 11. Графики вертикальных и поперечных ускорений кузова трамвая при заводских (1) и вновь определенных (2) параметрах рессорного подвешивания



Анализируя динамику трамвайного вагона при различных параметрах рессорного подвешивания, можно сделать вывод, что вагон с вновь определенными параметрами (рисунок 11 (2)), имеет наименьшую динамическую нагруженность.

Разработанная математическая модель трамвайного вагона может быть использована для анализа динамической нагруженности и определения рациональных параметров ходовых частей как на стадии проектирования новых трамвайных вагонов, так и при модернизации уже существующих, эксплуатируемых во многих городах России.

### *Литература*

- 1. Погорелов Д.Ю., Толстошеев А.К., Ковалев Р.В. и др. Динамический анализ и синтез механизмов с использованием программы UM //Брянск: Изд-во БГТУ, 1997.-46 с.*
- 2. Погорелов Д.Ю., Павлюков А.Э., Юдакова Т.А. Разработка математической модели железнодорожного экипажа в программной среде автоматизированного синтеза уравнений движения. – Информационные технологии в моделировании и управлении// Труды II Международной научно-практической конференции, 20-22 июня 2000 года. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000г., с.298-300.*
- 3. Красниченко А.А. Методика определения упруго-диссипативных характеристик резиновых амортизаторов рельсового подвижного состава. Науч.-прак. конференция. Молодые ученые - транспорту – 2007: Сб. научн. Тр., посв. 170 – летию российских железных дорог. - Екатеринбург: УрГУПС. – 2007. – С. 44-51.*