

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

УДК 631.372.

**Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных
предприятий**

Сидоров М.В.¹, Судейко О.В.², Сидоров В.Н.²

¹Калужский филиал РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

²Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация

Исследование вибронгруженности пассажирских мест автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий по дорогам с переменной высотой дорожного покрытия остается в настоящее время актуальной. Цель исследования – провести имитационное моделирование вибронгруженности пассажиров автобуса с помощью программы Simulink при движении его по грунтовой дороге и по бездорожью.

Для проверки воздействия на пассажиров автобуса разных уровней вибрации заданы 5 диапазонов октановых полос с помощью структурных единиц программы Simulink: блока Analog Filter Design – фильтр Баттерворта. Для преобразования сигнала из аналогового в цифровой используем блок Zero-Order Hold, блок RMS – для вычисления СКО и блок Fsp – действующего уровня виброускорений.

В качестве входных параметров в динамической модели вибронгруженности пассажиров автобуса приняты: $Z_{\text{н}}$ – вертикальная координата, $\varphi_{\text{н}}$ и $\psi_{\text{н}}$ – углы дифферента и крена автобуса. Для определения данных параметров была составлена подпрограмма с использованием m-файла.

При исследовании движения автобуса ПАЗ-4234 было выявлено, что в момент начала движения автобуса возникают самые большие вибрации, далее в действие вступают упругие и демпфирующие элементы, и вибрация снижается до рабочего уровня. С увеличением частоты вибраций на пассажирских местах также увеличивается и их уровень, а с увеличением скорости движения и неровностей опорной поверхности увеличиваются частота и амплитуда колебаний пассажирских мест.

Ключевые слова: ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ, АВТОБУС, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГРАММА SIMULINK, ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, НЕРОВНОСТИ ДОРОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Введение

Исследование вибронгруженности пассажирских мест автобуса для перевозки сельских жителей при движении его по опорной поверхности с переменной высотой дорожных неровностей остается в настоящее время актуальной [1, 2]. Широкое применение в исследовании динамических систем и процессов транспортных средств получило имитационное моделирование с помощью программы Simulink [3-5]. В статье в качестве примера рассмотрено имитационное моделирование прямолинейного движения автобуса ПАЗ-4234 по грунтовой дороге и по бездорожью.

Цель исследования – провести имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест автобуса с помощью программы Simulink при движении его по грунтовой дороге и по бездорожью.

Материалы и методы

Мгновенное положение центра масс автобуса можно определить из решения трех дифференциальных уравнений: уравнения вертикального поступательного движения относительно оси Z и двух уравнений вращательного движения относительно продольной X и поперечной Y осей [5, 6].

Для двухосного автобуса с неразрезным мостом необходимо применить дополнительно два дифференциальных уравнения: для вертикальных и угловых колебаний моста относительно оси X_{most} , проходящей через центр масс моста и параллельной продольной оси X .

Система уравнений будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{ПМ}} \cdot \ddot{z} = P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} - m_{\text{ПМ}} \cdot g \\ J_Y \cdot \ddot{\varphi} = P_{11} \cdot \frac{L_1}{2} + P_{12} \cdot \frac{L_1}{2} - P_{21} \cdot \frac{L_2}{2} - P_{22} \cdot \frac{L_2}{2} \\ J_X \cdot \ddot{\psi} = P_{11} \cdot \frac{B}{2} - P_{12} \cdot \frac{B}{2} + P_{21} \cdot \frac{B}{2} - P_{22} \cdot \frac{B}{2} \\ m_{\text{most } i} \cdot \ddot{z} = F_{k11} + F_{k12} - F_{k21} - F_{k22} - m_{\text{most } i} \cdot g \\ J_{\text{most } i} \cdot \ddot{\psi} = F_{k11} \cdot \frac{B}{2} - F_{k12} \cdot \frac{B}{2} - F_{k21} \cdot \frac{B_1}{2} + F_{k22} \cdot \frac{B_1}{2} \end{array} \right. ,$$

где: $m_{\text{most } i}$ – масса i -го моста; $J_{\text{most } i}$ – момент инерции моста относительно оси X_{most} ; B_1 – рессорная колея; B_k – колесная колея; F_{ji} , $F_{i(j+1)}$ – сила в i -ой подвеске j -го и $(j+1)$ -го борта, соответственно; F_{kji} , $F_{ki(j+1)}$ – сила в i -м колесе j -го и $(j+1)$ -го борта, соответственно.

При расчетах принято допущение, что вертикальная нагрузка от демпфирующего

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
 Имитационное моделирование вибронагруженности пассажирских мест
 автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий

 Электронный научно-производственный журнал
 «АгроЭкоИнфо»
 =====

элемента моста автобуса ПА3-4234 совпадает с линией действия силы от упругого элемента.

Первые три уравнения можно представить в виде следующих блоков в программе Simulink (рис. 1).

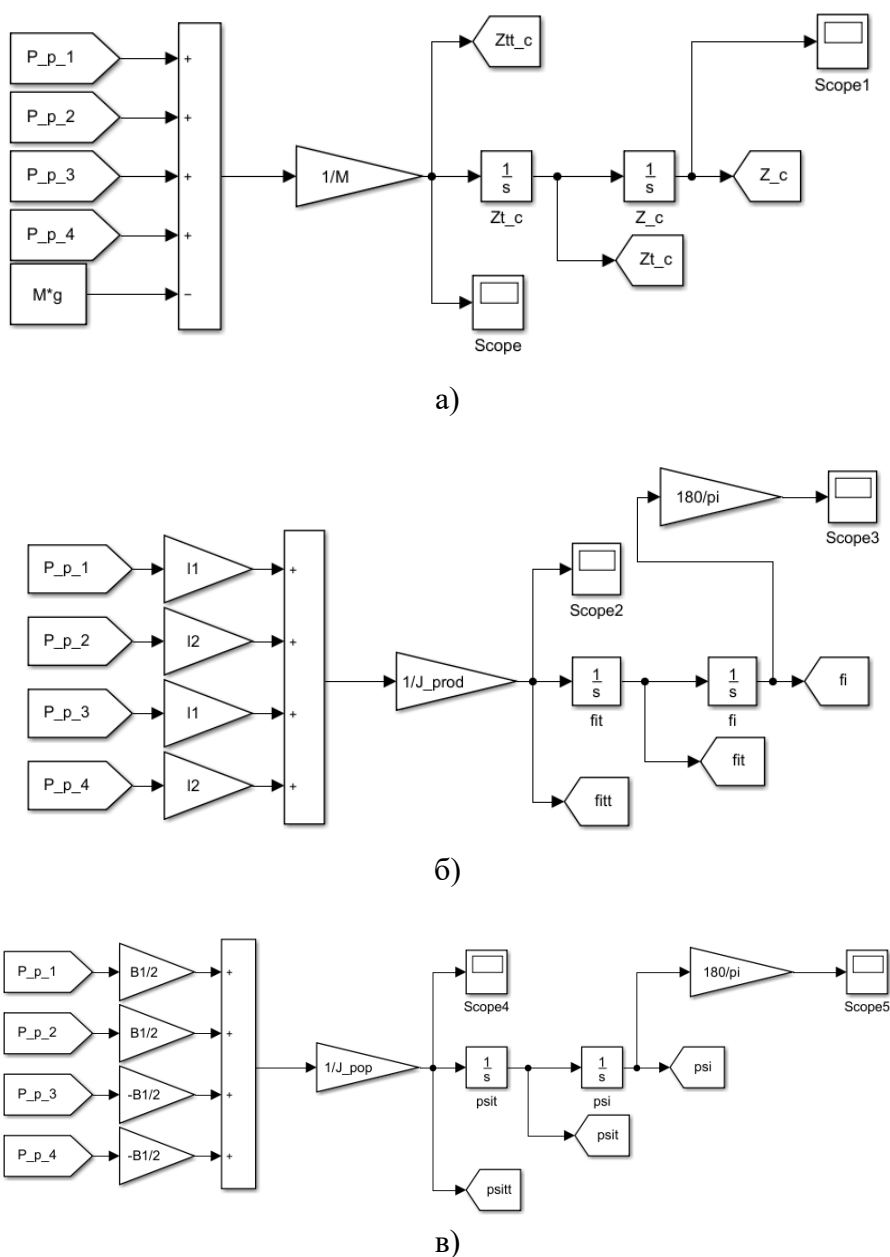


Рис. 1. Блоки в программе Simulink

Примечание: а) вертикальные колебания центра масс автобуса; б) продольно-угловые колебания автобуса; в) поперечно-угловые колебания автобуса

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

Для вычисления суммарной силы в подвеске, учитывающей упругую и демпфирующую характеристики, воспользуемся блоком «Подвеска» (рис. 2).

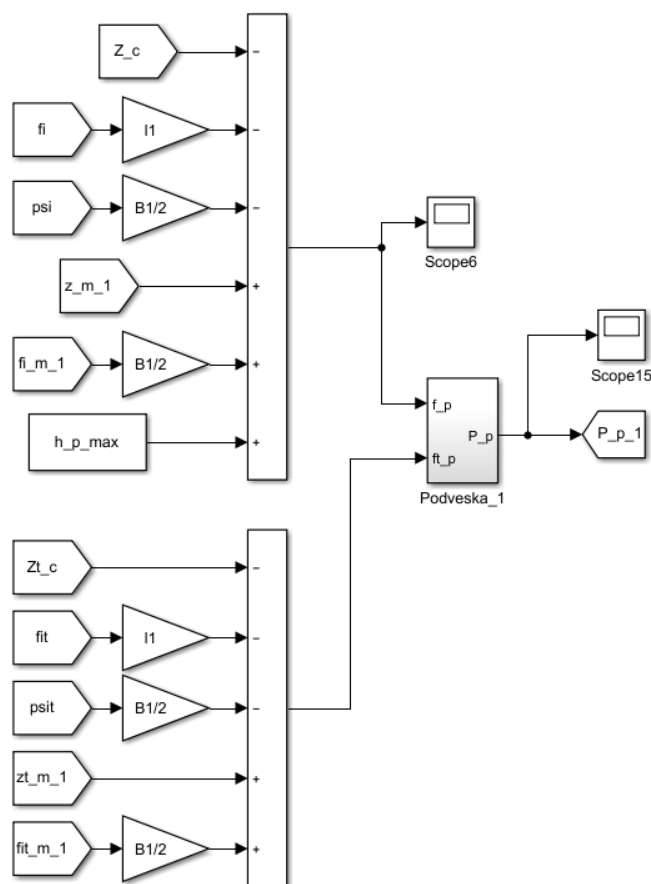


Рис. 2. Блок «Подвеска», учитывающий упругую и демпфирующую характеристики подвески

Кроме сил, действующих на подвеску, на движение автобуса также влияют силы взаимодействия колеса с дорогой.

Уравнение движения колеса имеет вид:

$$m_{ij}\ddot{z}_{ij} = -P_{yij}(h_{ij}) - P_{dij}(\dot{h}_{ij}) + P_{y kij}(h_{ij}) + P_{d kij}(\dot{h}_{ij}) - m_{ij}g$$

где: P_{yij} – сила в i -м упругом элементе j -го борта; P_{dij} – сила в i -м демпфирующем элементе j -го борта; $m_{ij}g$ – вес колеса; $P_{y.kij}$ и $P_{d.kij}$ – упругая и демпфирующая составляющие со стороны шины.

Блок расчета координат центра масс моста представлен на рис. 3.

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

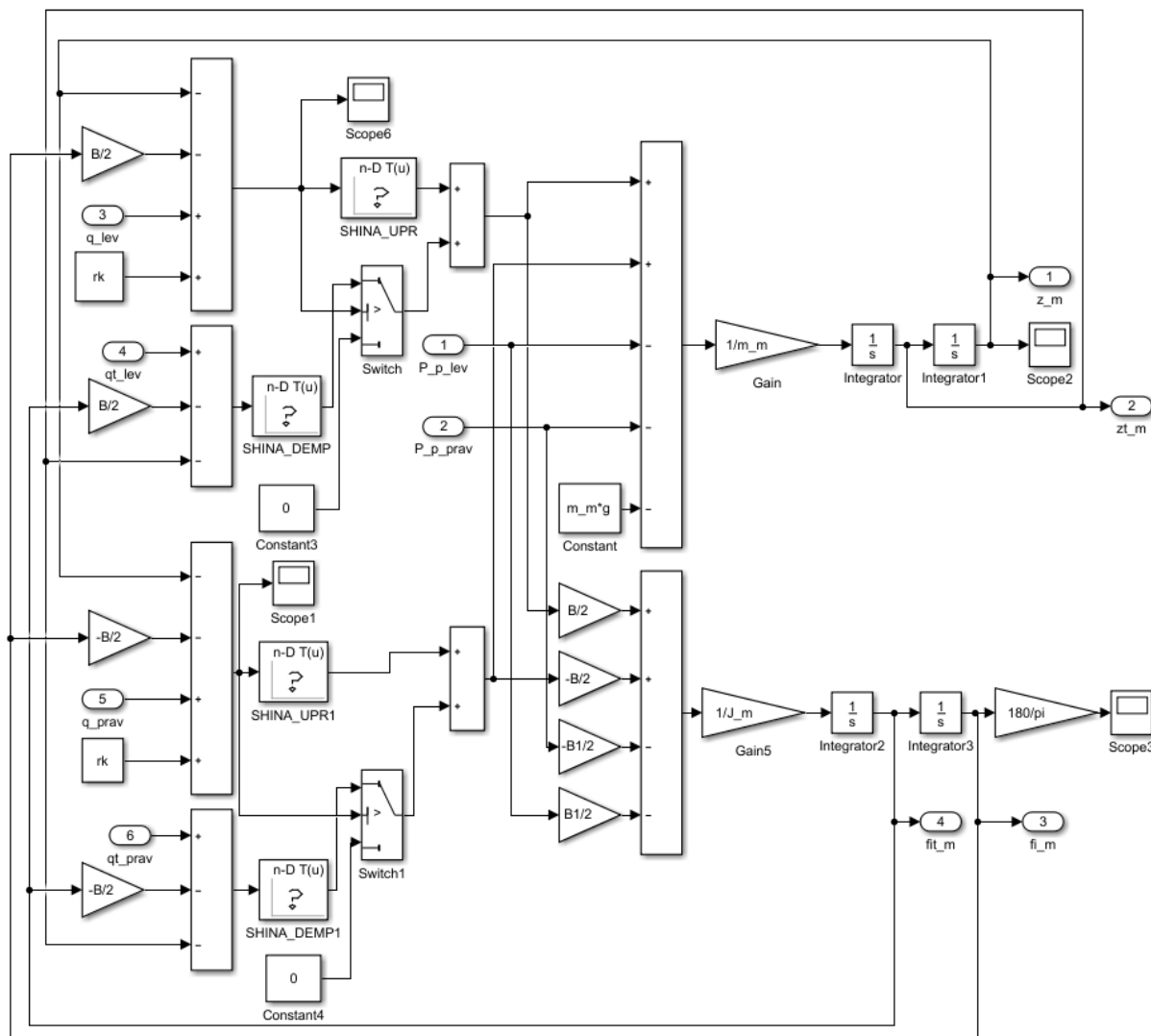


Рис. 3. Блок расчета координат центра масс моста

Для оценки вибронгруженности мест пассажиров автобуса в соответствии с ГОСТ 12.1.012-2004 частотный диапазон колебаний делят на несколько октавных полос. Уровни виброускорений L_{wi} в дБ в i -ой октавной полосе рассчитываем по следующей формуле:

$$L_{wi} = 20 \lg \frac{CKO_{ai}}{10^{-3}}$$

где CKO_{ai} – действующее среднеквадратическое значение (СКО) виброускорений в i -ой октавной полосе частот.

Если время воздействия вибрации составляет менее 8 часов, допустимые уровни в i -й октавной полосе частот корректируют в сторону повышения, используя формулу:

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронегруженности пассажирских мест
автобуса для внутривозвратных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

$$CKO_{normi}^T = CKO_{normi}^{480} \sqrt{\frac{480}{T}},$$

где T – время действия вибрации, мин.

Для проверки воздействия на пассажиров автобуса разных уровней вибрации зададим 5 диапазонов октановых полос с помощью блока Analog Filter Design – фильтр Баттерворта (рис. 4).

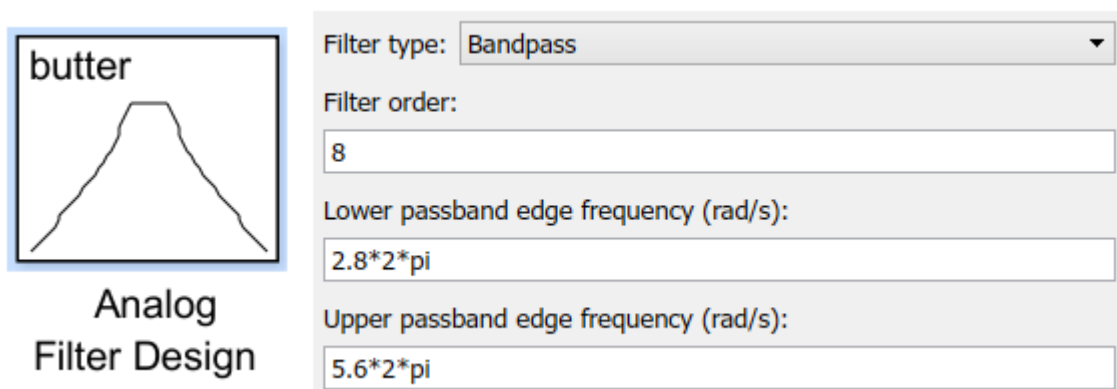


Рис. 4. Блок Analog Filter Design для третьей октановой полосы

Для преобразования сигнала из аналогового в цифровой используем блок Zero-Order Hold, блок RMS – для вычисления СКО и блок Fcp – действующего уровня виброускорений.

Таким образом, блок для вычисления вибрационной нагруженности мест пассажиров автобуса будет выглядеть так, как показано на рис. 5.

Для моделирования процесса движения автобуса необходимо задать исходные данные:

Основные параметры:

$g=9.81$ (ускорение свободного падения, m/c^2);

$v=60/3.6$ (скорость движения, m/c);

$N_k=6$ (число колес автобуса);

$M=25000$ (вес поддресоренных частей);

$m_m=535$ (масса моста);

$r_k=0.425$ (свободный радиус колеса, m);

$h_p_{max}=0.3$ (максимальный ход подвески);

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

$h_{sh_max}=0.06$ (максимальный прогиб шины);

$B=1.85$ (колесная колея);

$B1=0.8*B$ (рессорная колея);

$l1=2.672$ (продольная координата передней оси относительно ц.м. автобуса, м);

$l2=-1.673$ (продольная координата задней оси относительно ц.м. автобуса, м);

$L=l1-l2$ (колесная база, м);

$H_{cm}=0,68-h_{sh_max}/2+h_{p_max}/2$ (высота центра масс, м);

$x_{dr}=l1$ (продольная координата сиденья водителя относительно ц.м. автобуса, м);

$y_{dr}=0.9*B/2$ (поперечная координата сиденья водителя относительно ц.м. автобуса,

м.);

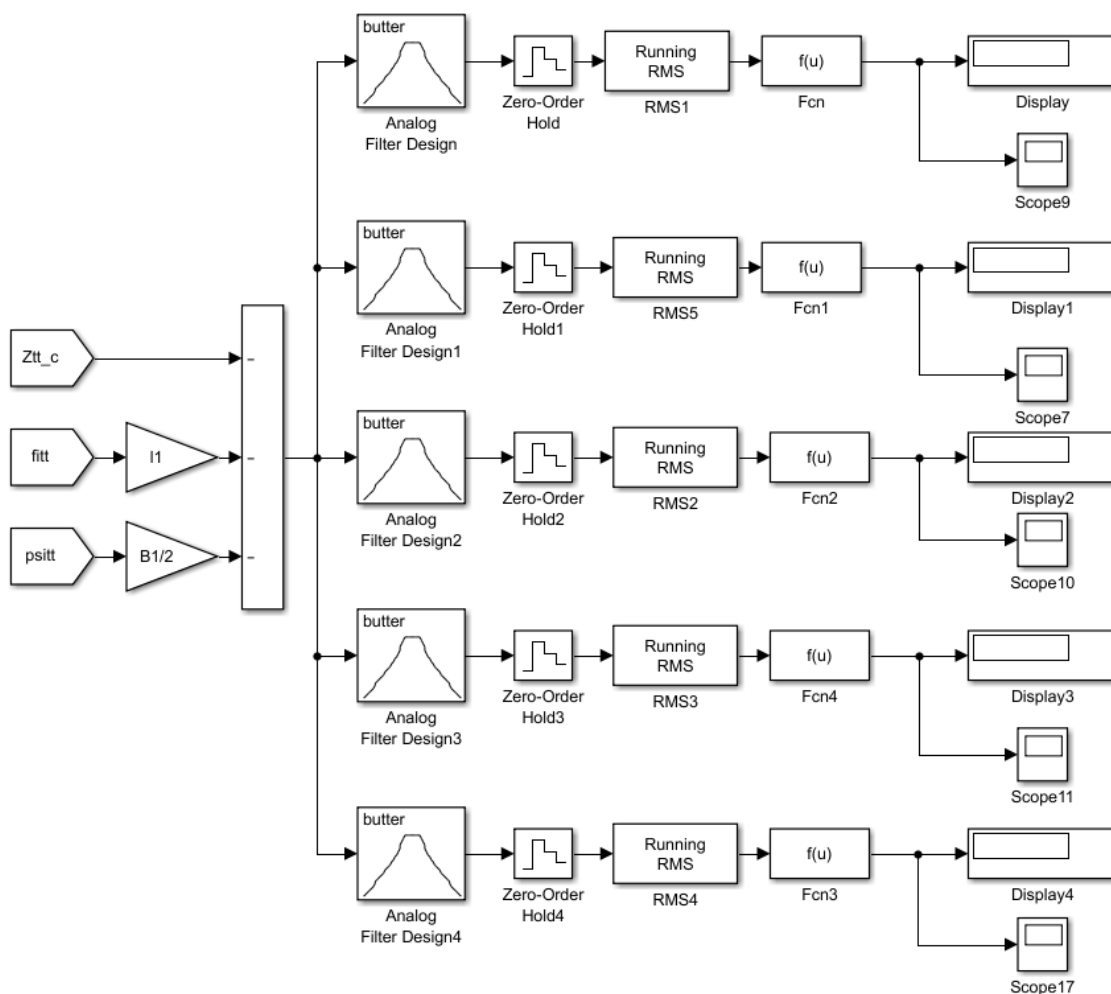


Рис. 5. Блок для вычисления вибронгруженности мест пассажиров автобуса

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронегруженности пассажирских мест
автобуса для внутривозвратных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

Результаты исследований

Результаты моделирования движения автобуса показали, что с увеличением высоты дорожных неровностей уровень колебаний центра тяжести автобуса увеличивается даже при снижении скорости (рис. 6, 7).

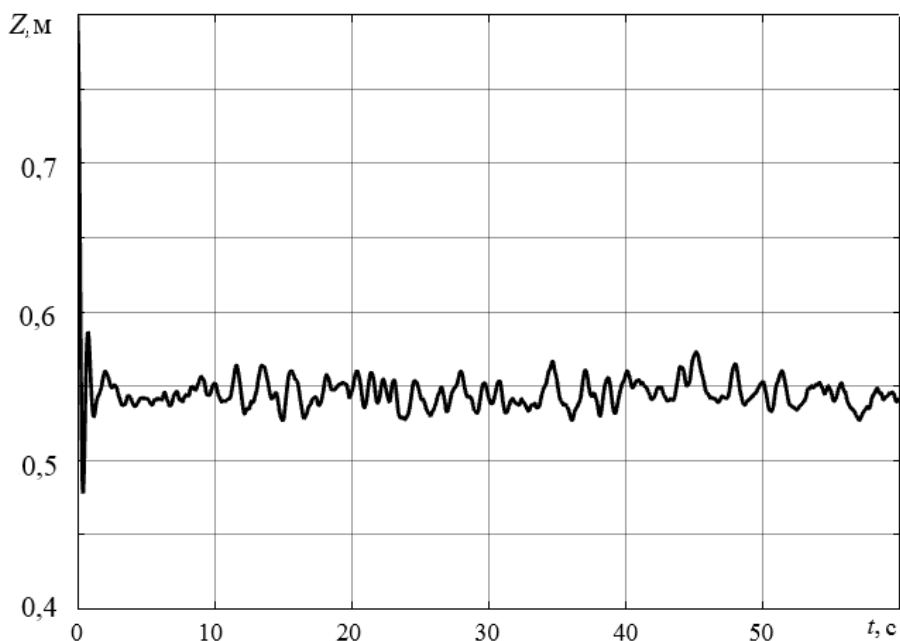


Рис. 6. Изменение положения ЦМ автобуса при езде по грунтовой дороге со скоростью 60 км/ч

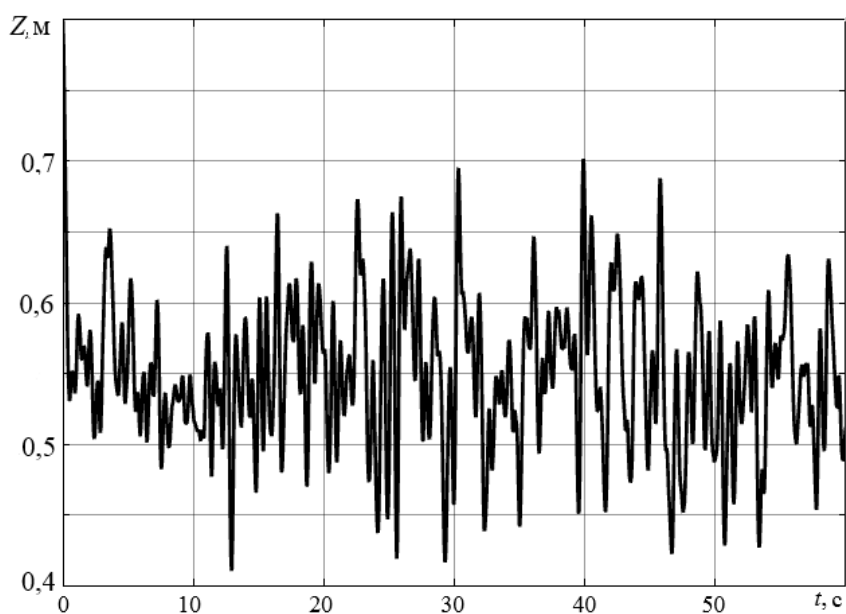


Рис. 7. Изменение положения ЦМ автобуса при езде по бездорожью со скоростью 30 км/ч

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронегруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Результаты моделирования вибраций мест пассажиров при движении по бездорожью в 3 октановой полосе частот представлены на рис. 8.

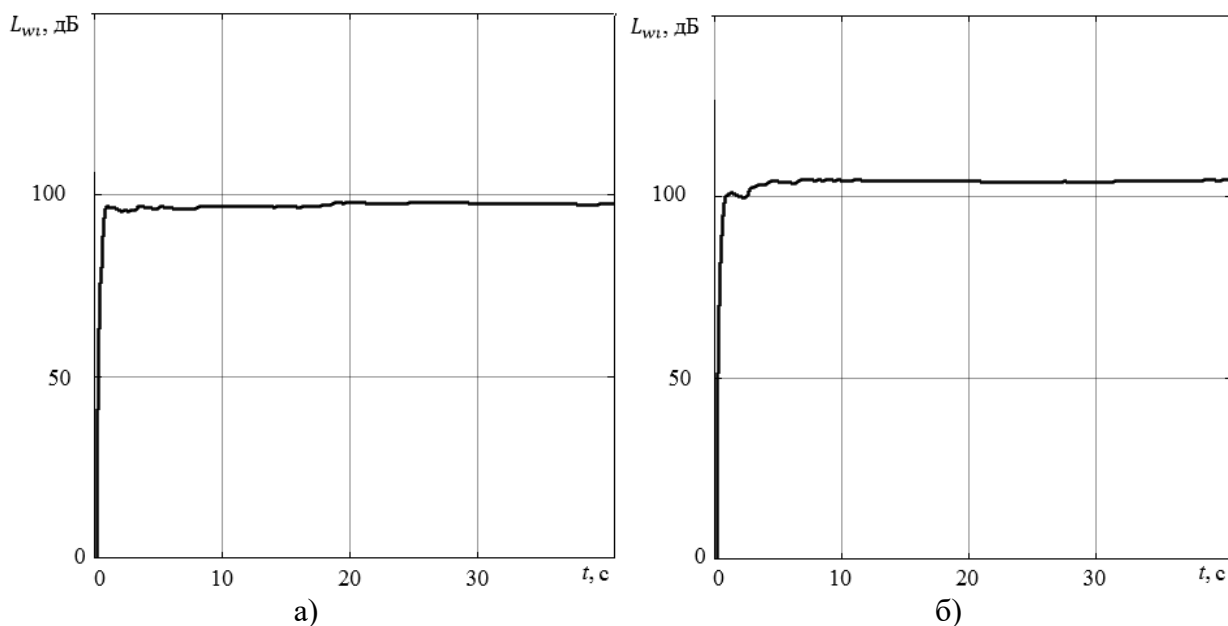


Рис. 8. Уровни вибрации мест пассажиров при движении по бездорожью
Примечание: а) скорость 30 км/ч; б) скорость 60 км/ч

По графикам можно четко отметить значительный рост уровня вибрации в первые секунды начала движения автобуса. Далее в действие вступают упругие и демпфирующие элементы, и уровень вибрации падает до рабочего. Данные об изменении L_{wi} в третьей октановой полосе, в зависимости от опорной поверхности и скорости движения автобуса на 40 секунде расчета, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменения уровня вибрации L_{wi} в зависимости от опорной поверхности и скорости движения на 40 секунде расчета

Вид опорной поверхности/ скорость движения	Уровни вибрации L_{wi} , дБ
Бездорожье / скорость 30 км/ч	97,59
Бездорожье / скорость 60 км/ч;	104,8
Грунтовая дорога / скорость 30 км/ч	75,06
Грунтовая дорога / скорость 60 км/ч	79,51

Уровень вибрации мест пассажиров автобуса на третьей октановой полосе при

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.
Имитационное моделирование вибронегруженности пассажирских мест
автобуса для внутривозвастственных перевозок сельскохозяйственных предприятий
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

движении по бездорожью со скоростью 60 км/ч составил 104,8 дБ, что соответствует требованию ГОСТ 12.1.012 (табл. 2), однако приближается к предельно допустимым значениям.

Таблица 2. Предельно допустимые уровни вертикальной вибрации, действующие на пассажиров непрерывно в течение 8 часов (по ГОСТ 12.1.012)

№ октановой полосы частот	I	II	III	IV	V
Границы октановых полос, Гц	0,7–1,4	1,4–2,8	2,8–5,6	5,6–11,2	11,2–22,4
Предельно допустимые уровни вибрации L_{wi} , дБ	121	118	115	116	121
Предельно допустимые уровни вибрации SKO_{normi}^{480} , м/с ²	1,10	0,79	0,57	0,60	1,13

Выводы

Уровень вибрации на третьей октановой полосе при движении по бездорожью со скоростью 30 км/ч составил 97,59 дБ. Уровень вибрации при движении по бездорожью с увеличением скорости от 30 км/ч до 60 км/ч увеличился на 7% и составил 104,8дБ, приближаясь тем самым к предельно допустимым нормам для человека, согласно требованию ГОСТ 12.1.012.

Список использованных источников

1. Алакин В.М., Сидорова А.В., Сидоров М.В. Моделирование вибронегруженности рабочего места водителя колесного трактора с помощью программы SIMULINK // В сборнике: Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы национальной научно-практической конференции. – 2020. – С 146-149.
2. Сидорова А.В., Степин П.И., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование колебаний центра масс колесной машины с помощью программы Simulink // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4 [электронный ресурс]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2020/6395/> (дата обращения: 23.03.2021).
3. Гурский Н.Н., Фурунжиев Р.И. Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин. – Минск: Изд-во БНТУ, 2008. – 296 с.
4. Пилипенко М.В. Разработка математической модели автономной пневматической подвески сидения водителя транспортного средства с прямым включением виброзащитного

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н.

Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест
автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====
модуля // Техническая механика. – 2008. – №1. – С. 38-49.

5. Жилейкин М.М., Котиев Г.О. Моделирование систем транспортных средств: учебник. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 280 с.

6. Rosheila Binti Darus. Modeling and control of active suspension for a full car model. A project report submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Engineering (Electrical – Mechatronics and Automatic Control). – 2008.

=====
Цитирование:

Сидоров М.В., Судейко О.В., Сидоров В.Н. Имитационное моделирование вибронгруженности пассажирских мест автобуса для внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственных предприятий [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st_216.pdf.