

---

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КРЕСЛА ОПЕРАТОРА ТРАКТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SimInTech**

---

**Олег Иванович Поливаев  
Дмитрий Николаевич Афоничев  
Сергей Николаевич Пиляев  
Алексей Владиславович Лощенко  
Александр Юрьевич Черемисинов**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Количество технологических процессов и операций в сельском хозяйстве велико, и практически все они выполняются машинно-тракторными агрегатами (МТА). При этом происходит взаимодействие опорной поверхности с движителями, что вызывает возникновение колебаний в системе «почва – движитель – трансмиссия – кресло оператора». Сложный спектральный состав колебаний, находящихся в диапазоне от 0,05 до 30 Гц, негативно воздействует на оператора МТА. В зависимости от выполняемых работ и профиля пути колебания кресла оператора могут происходить в трёх плоскостях. С целью снижения влияния колебаний на операторов МТА в разработанной математической модели рассматриваются только вертикальные колебания кресла оператора. При этом приняты некоторые допущения, позволяющие рассматривать колебания только в вертикальной плоскости, проходящей через центр масс трактора. Используя классические методы механики, получаем уравнения динамического режима работы МТА. Поскольку система дифференциальных уравнений является нелинейной, а колебания переменных, входящих в неё, не являются малыми величинами, то получение амплитудно-частотной характеристики через передаточную функцию весьма затруднено. Для решения системы уравнений была разработана модель в российской системе модельно-ориентированного проектирования систем автоматического управления SimInTech. Построенная имитационная модель является универсальной и позволяет определять характер вертикальных ускорений при различных параметрах транспортного средства и видах возмущающих воздействий: случайного процесса микропрофиля пути, единичных препятствий, заданного гармонического изменения пути или тягового усилия. Кроме того, открытая архитектура программного комплекса SimInTech позволяет добавлять в данную модель и исследовать устройства демпфирования кресла оператора различной физической природы (механические, пневматические, гидравлические) и их системы автоматического управления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трактор, кресло оператора, вертикальные колебания, модель, программный комплекс SimInTech, частотный анализ.

## **SIMULATION MODEL FOR VERTICAL VIBRATIONS OF TRACTOR DRIVER SEAT IN THE SimInTech SOFTWARE PACKAGE**

**Oleg I. Polivaev  
Dmitriy N. Afonichev  
Sergey N. Pilyaev  
Alexey V. Loshchenko  
Alexander Yu. Cheremisinov**

Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great

The number of technological processes and operations in agriculture is large and almost all of them are performed by machine-tractor units (MTU). During MTU motion the bearing surface interacts with the track assembly, which causes vibrations in the soil – thruster – transmission – driver seat system. The complex spectral composition of vibrations in the range from 0.05 to 30 Hz affects negatively the MTU driver. Depending on the

work performed and the profile of the path, the vibrations of the driver seat can occur in three planes. In order to reduce the effect of vibrations on the MTU drivers, the developed mathematical model considers only the vertical vibrations of the driver seat. At the same time, some assumptions are made that allow considering vibrations only in the vertical plane passing through the center of mass of the tractor. Using classical methods of mechanics, the equations of the dynamic mode of operation of the MTU were obtained. Since the system of differential equations is nonlinear, and the fluctuations of the variables included in it are not small quantities, it is very difficult to obtain the amplitude-frequency response through the transfer function. To solve the system of equations the authors developed a model in the Russian system of model-oriented design of automatic control system SimInTech. The proposed simulation model is universal and allows determining the pattern of vertical accelerations for various parameters of the vehicle and types of disturbing influences, i.e. random process of the path micro-profile, single obstacles, given harmonic change in the path or driving force. In addition, the open architecture of the SimInTech software package allows adding to this model and exploring the damping devices of the driver seat of various physical nature (mechanical, pneumatic, hydraulic), as well as their automatic control systems.

KEYWORDS: tractor, driver seat, vertical oscillations, model, SimInTech software package, frequency analysis.

**Р**ост технической оснащённости сельского хозяйства за последние годы позволил значительно повысить уровень механизации работ в полеводстве и животноводстве, сократить сроки выполнения работ, которые в большинстве случаев приблизились к экономически обоснованным.

В настоящее время полностью механизированы все работы по подготовке почвы к посеву (на пахоте, культивации и бороновании), на посеве зерновых и большинства других культур, на междурядной обработке, уборке зерновых культур, внесении удобрений. В ближайшие годы будут полностью механизированы работы по возделыванию овощей, в садах и виноградниках.

Количество технологических процессов и операций в сельском хозяйстве велико, и практически все они выполняются машинно-тракторными агрегатами (МТА). При этом происходит взаимодействие опорной поверхности с движителями, что вызывает возникновение колебаний в системе «почва – движитель – трансмиссия – кресло оператора».

В процессе движения мобильного энергетического средства (МЭС) из-за неровностей опорной поверхности под колёсными движителями возникают вертикальные колебания остова трактора и кресла оператора. Эти колебания приводят к неблагоприятным для человека вибрациям [1, 2, 5]. Частотный спектр вертикальных ускорений кресла оператора находится в пределах от 0,5 до 30 Гц, а амплитуда колебаний, как правило, значительно превосходит допустимую по санитарно-физиологическим нормам [6, 8]. Для решения данной проблемы необходимо проектирование новых и усовершенствование существующих виброзащитных систем колёсных тракторов за счёт повышения качества систем демпфирования вертикальных колебаний.

На сегодняшний день эффективным способом исследования и проектирования сложных динамических систем, к которым относятся колебания, возникающие в результате взаимодействия движителей с опорной поверхностью, является построение компьютерной модели, позволяющей с помощью виртуального эксперимента подбирать необходимые параметры всей системы [3, 7]. Для решения данных задач используют информационные системы визуального «физического» моделирования. Термин «физическое» здесь означает то, что на экране строится схема исходной технической системы, где математические модели каждого компонента скрыты за условным графическим обозначением, а последовательность их соединения отражает передачу информации или физических сигналов [12, 13].

Среди множества систем компьютерного моделирования последнее время широкое распространение получила российская разработка SimInTech. Программный комплекс SimInTech предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных динамических объектах. Данный программный комплекс обладает готовыми библиотеками различных физических процессов: пневматики, гидравлики, механики, электрики и т. д.

Рассмотрим построение компьютерной модели МЭС с помощью SimInTech. Мобильное энергетическое средство на базе колёсного трактора с прицепом представляет собой довольно сложную колебательную систему. В зависимости от выполняемых работ и профиля пути колебания кресла оператора могут происходить во всех трёх плоскостях.

Математическое описание подобной сложной динамической системы весьма затруднено, поэтому несколько упростим задачу. Поскольку основным объектом данных исследований являются ускорения вертикальных колебаний кресла оператора, то будем рассматривать только их. Для решения этой и подобных задач примем следующие допущения [1, 4, 9, 10, 11].

1. Колебания трактора происходят только в вертикальной плоскости при его движении с постоянной скоростью равномерно.

2. Дорожные условия одинаковы под обоими бортами трактора и обоими мостами, то есть дорожный профиль одинаков по всей ширине колеи и не деформируется при прохождении переднего моста. Колёса обоих мостов находятся в постоянном контакте с дорожным полотном и строго копируют его профиль без отрыва от опорной поверхности.

3. Все действующие в рассматриваемой динамической системе внутренние и внешние силы направлены строго вертикально.

4. Все упругие, демпфирующие и массовые элементы динамической системы способны совершать только вертикальные движения.

5. Двигатель, трансмиссия, колёса, остова трактора и кабина оператора принимаются в качестве однородного жёсткого (не деформируемого) элемента, симметричного относительно продольной оси, проходящей через центр масс трактора. Угловые перемещения этого элемента осуществляются относительно центра масс трактора только в вертикальной плоскости.

6. Кресло оператора и сам оператор также принимаются в виде однородного физического тела.

7. Возмущающими воздействиями на рассматриваемую динамическую систему являются неравномерность микропрофиля пути под передними и задними колёсами и неравномерная вертикальная составляющая крюковой нагрузки.

Принятые допущения о симметричности позволяют рассматривать движение только половины трактора в вертикальной плоскости, проходящей через центр масс трактора. На рисунке 1 представлена физическая модель динамической системы трактора, построенная согласно принятым допущениям.

Здесь масса двигателя, трансмиссии, остова и кабины представлены в виде элемента массой  $m_o$ , который совершает вертикальные перемещения центра масс (точка O) по координате  $Z_o$  и угловые перемещения  $\alpha_o$  вокруг точки O относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс (точка O).

Воздействия от колёс передней и задней осей передаются в виде сил реакции  $F_1$  и  $F_2$  в точки A и B на остова трактора массой  $m_o$  и моментом инерции  $J_o$ .

Динамические свойства колеса, передачи и подвески учитываются в виде суммарных коэффициентов соответственно жёсткости и вязкого трения переднего моста  $c_1, k_1$  и  $c_2, k_2$ .

Система поддрессирования кресла водителя также задаётся в виде демпфирующего и пружинного элементов  $c_c$  и  $k_c$ .

Используя классические методы механики [1], получим уравнения динамического режима нашей системы в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 m_c \frac{d^2 z_c}{dt^2} &= -F_c; \\
 m_o \frac{d^2 z_o}{dt^2} &= -F_1 - F_2 + F_c + P_{kn}(t); \\
 J_o \frac{d^2 \alpha_0}{dt^2} &= -F_1 l_1 + F_2 l_2 - F_c l_c + l_k P_{kn}(t); \\
 F_1 &= c_1 [Z_o - q_1(x) + l_1 \operatorname{tg} \alpha_0] + k_1 \frac{d}{dt} [Z_o - q_1(x) + l_1 \operatorname{tg} \alpha_0]; \\
 F_2 &= c_2 [Z_o - q_1(x-L) + l_2 \operatorname{tg} \alpha_0] + k_2 \frac{d}{dt} [Z_o - q_1(x-L) + l_2 \operatorname{tg} \alpha_0]; \\
 F_c &= c_c (Z_c - Z_o - l_c \sin \alpha_0) + k_c \frac{d}{dt} (Z_c - Z_o - l_c \sin \alpha_0),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $Z_c, Z_o$  – вертикальные перемещения кресла водителя и остова трактора;  
 $m_o$  – половина массы двигателя, трансмиссии, кабины и остова трактора;  
 $m_c$  – масса кресла и оператора;  
 $c_1, k_1$  – жёсткость и коэффициент демпфирования левого переднего колеса;  
 $c_2, k_2$  – жёсткость и коэффициент демпфирования левого заднего колеса;  
 $c_c, k_c$  – жёсткость и коэффициент демпфирования системы подрессоривания кресла оператора;  
 $\alpha_0$  – угол отклонения остова трактора от горизонтали в точке центра масс;  
 $L$  – колёсная база трактора;  
 $l_1, l_2, l_c$  – расстояния от точки центра масс трактора соответственно до передней и задней оси и расстояние от центра масс до точки крепления кресла;  
 $q_1(x), q_1(x-L)$  – микропрофиль пути под колёсами соответственно передней и задней осей;  
 $\beta$  – угол наклона вектора усилия на крюке;  
 $P_{kn}(t)$  – нормальная составляющая усилия на крюке.

Как следует из системы уравнений (1), в процессе движения трактор подвержен одновременно нескольким внешним воздействиям, которые создаются от неоднородности физико-механических свойств и неровностей дороги и переменных тяговых колебаний, создаваемых со стороны агрегатируемой машины.

На рисунке 1 представлено окно проекта SimInTech со схемой построенной имитационной модели.

Модель включает в себя подмодель решения уравнений системы (1) «Модель трактора» и три подмодели генерации возмущающих воздействий в виде ступенчатой функции, синусоиды и случайного процесса микропрофиля пути с заданной корреляционной функцией.

Исходные данные модели транспортного средства задаются в субмодели «Модель трактора».

Связь между подмоделями и внутри каждого блока осуществляется с помощью очень удобного механизма программы SimInTech, называемого «Сигнал».

В качестве сигналов можно использовать как константы (параметры модели), так и рассчитываемые данные и даже реальные физические сигналы.

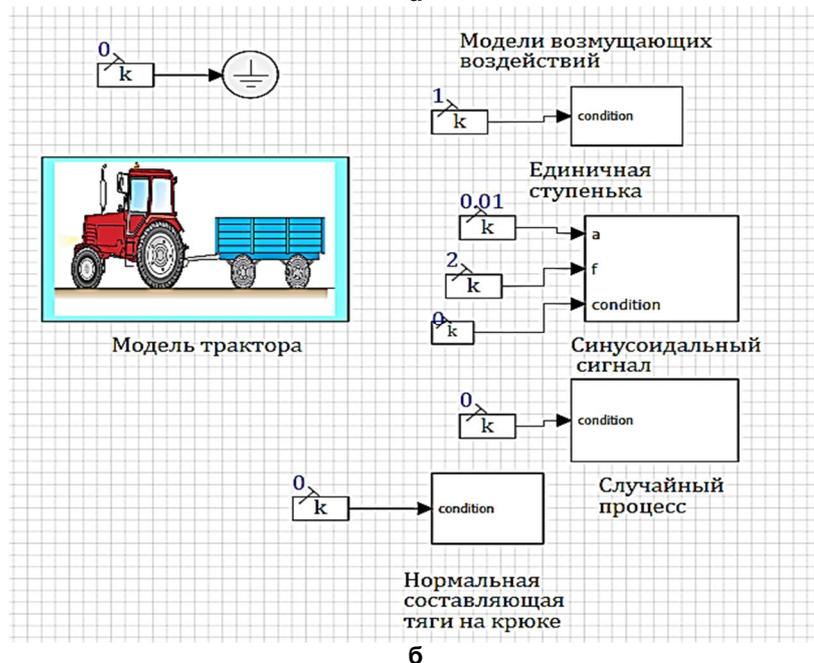
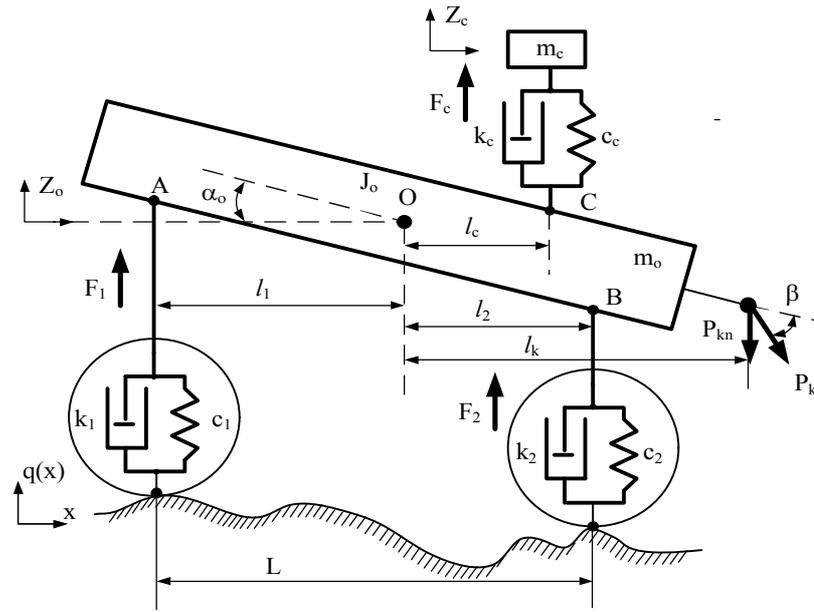


Рис. 1. Физическая (а) и имитационные (б) модели для определения вертикальных колебаний кресла оператора

С помощью имитационной модели можно исследовать вертикальные колебания динамической системы «дорога – трактор – сидение оператора» при различных возмущающих воздействиях. Так, в качестве примера на рисунках 2, 3, 4 и 5 представлены кривые колебаний всех независимых переменных модели: вертикального перемещения остова  $Z_o$ , угла поворота остова  $\alpha$  и кресла оператора  $Z_c$  при скорости движения  $V = 20$  км/ч по дороге с микропрофилем «Асфальт в изношенном состоянии».

Параметры модели трактора выбраны следующим образом [8, 9]:

$$l_1 = 1,37; l_2 = 0,91; l_c = 0,7 м; m_o = 2890 кг; m_c = 150 кг;$$

$$J_o = 3664 кг \cdot м^2; c_1 = 444000 Н / м; k_1 = 2254 Н \cdot с / м;$$

$$c_2 = 610000 Н / м; k_2 = 3986 Н \cdot с / м;$$

$$c_c = 10045 Н / м; k_c = 3000 Н \cdot с / м.$$

Изменения микропрофиля пути под передними ( $q_1$ ) и задними( $q_2$ ) колесами в зависимости от времени представлены на рисунке 2.

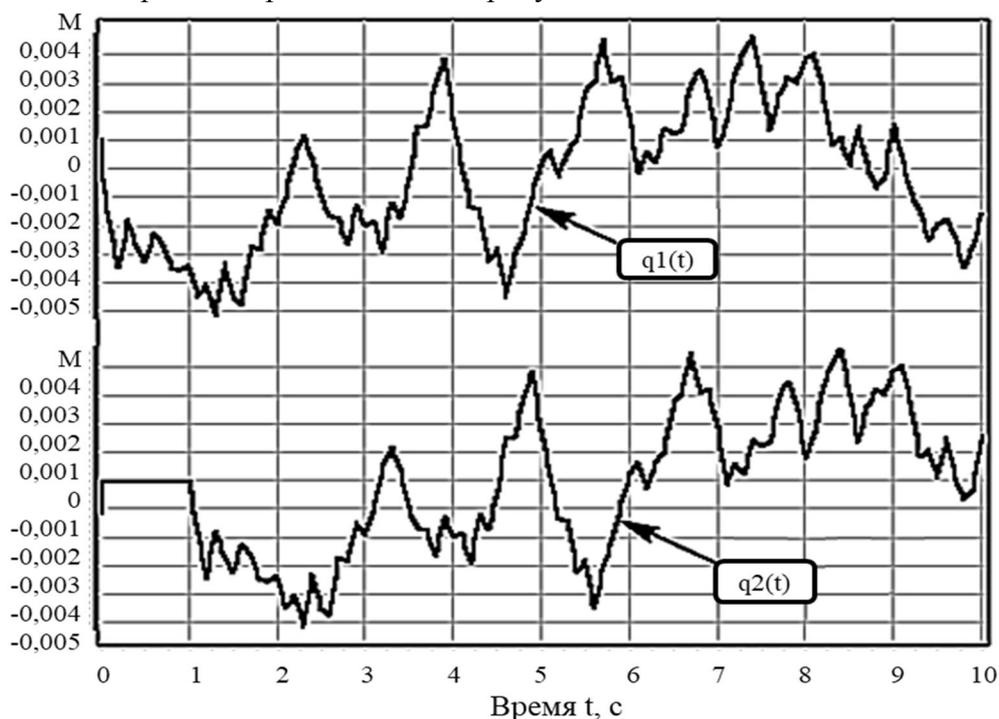


Рис. 2. Микропрофиль пути «Асфальт в изношенном состоянии» в зависимости от времени

Изменения угла поворота остова трактора с учётом заданного микропрофиля при движении МТА со скоростью 20 км/ч представлены на рисунке 3.

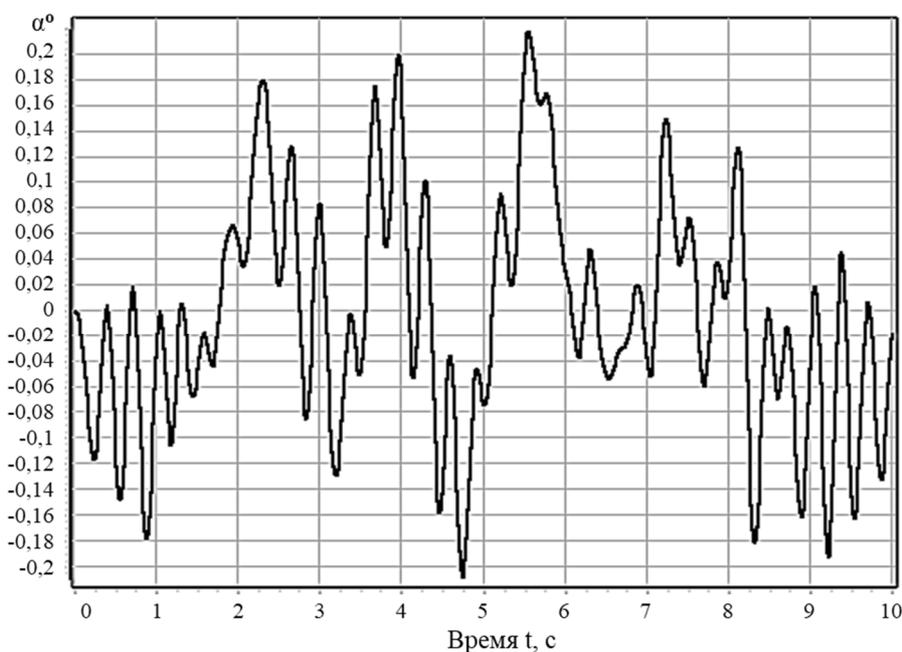


Рис. 3. Изменения угла поворота остова при движении МТА со скоростью 20 км/ч по микропрофилю «Асфальт в изношенном состоянии»

Вертикальные перемещения и ускорения остова при движении МТА со скоростью 20 км/ч по микропрофилю «Асфальт в изношенном состоянии» представлены на рисунке 4.

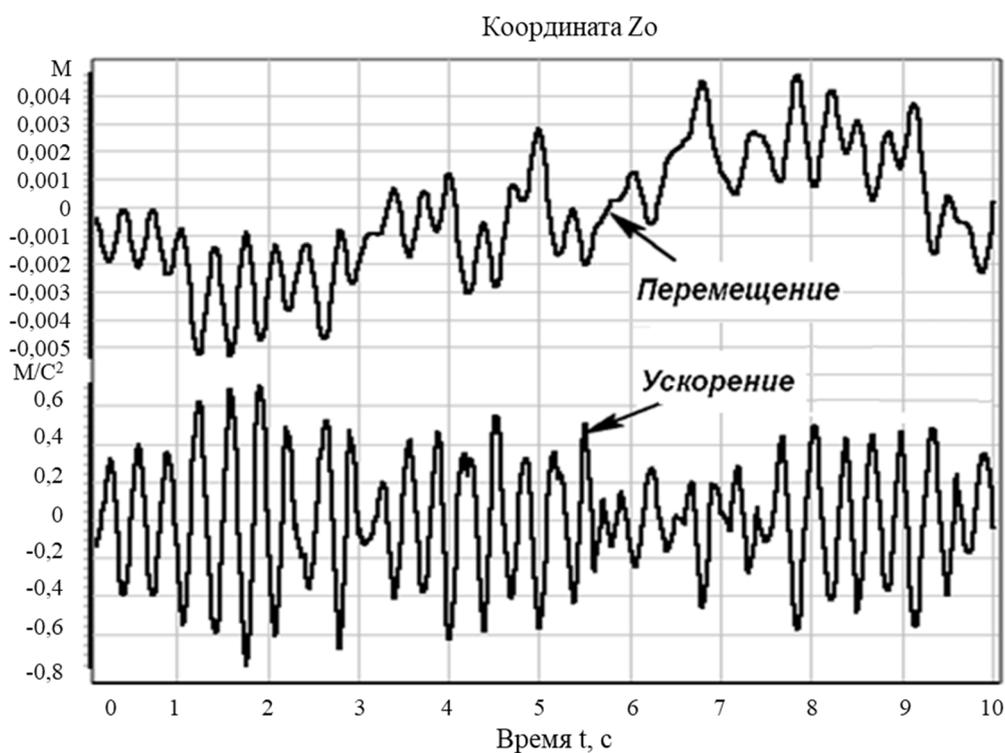


Рис. 4. Вертикальные перемещения и ускорения остова при движении МТА со скоростью 20 км/ч по микропрофилю «Асфальт в изношенном состоянии»

Вертикальные перемещения и ускорения кресла оператора МТА при движении со скоростью 20 км/ч по микропрофилю «Асфальт в изношенном состоянии» представлены на рисунке 5.

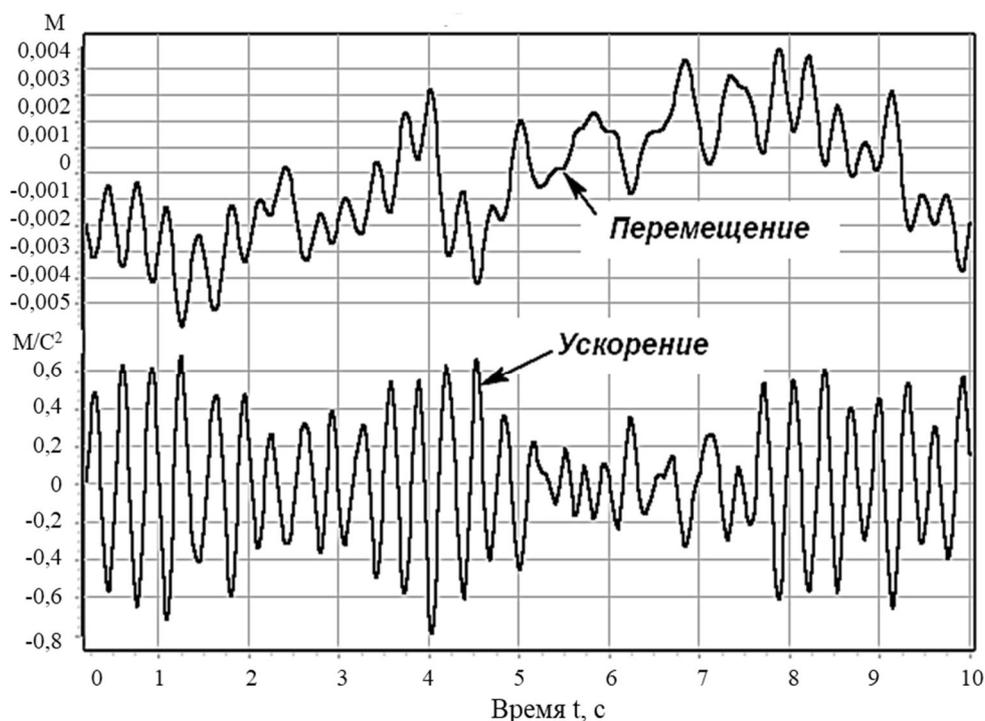
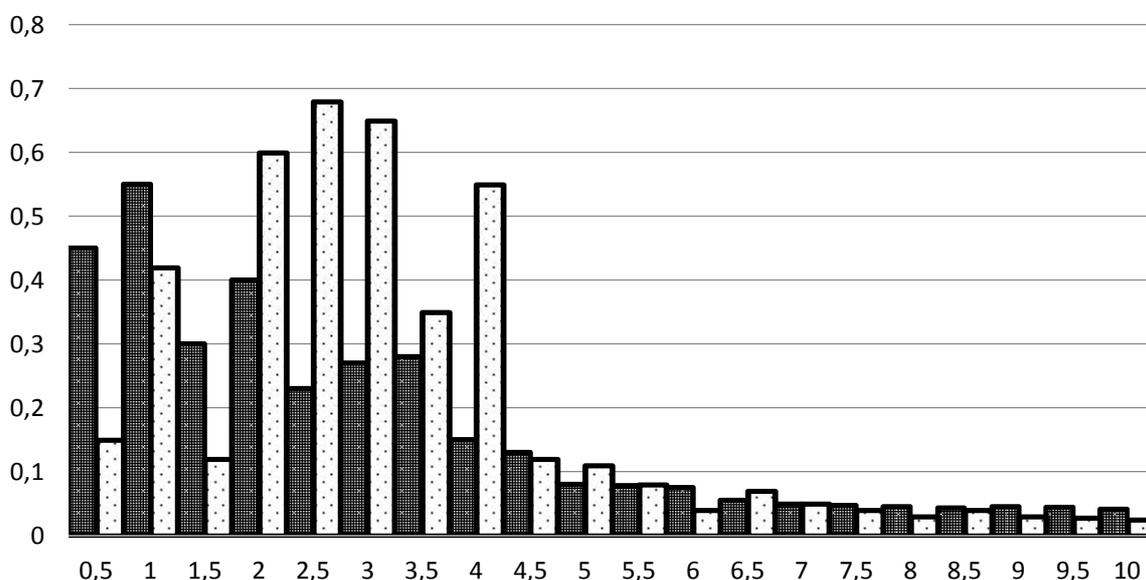


Рис. 5. Вертикальные перемещения и ускорения остова при движении МТА со скоростью 20 км/ч по микропрофилю «Асфальт в изношенном состоянии»

С помощью данной модели можно подобрать такие параметры демпфирующего устройства, которые обеспечат минимальное значение вредных вертикальных ускорений кресла оператора. Характерной особенностью программы SimInTech является встроенный аппарат частотного анализа любой расчётной кривой.

Так, на рисунке 6 показан частотный анализ кривой изменения вертикального ускорения кресла оператора при различной жёсткости подвески кресла и коэффициента демпфирования. На этом графике видно, что при значениях масс и коэффициентов демпфирующих устройств  $C_c = 8000 \text{ Н/м}$ ,  $k_c = 1000 \text{ Н·с/м}$  собственная (резонансная) частота кресла составляет 3,2 Гц, а ширина спектра его собственных колебаний находится в диапазоне от 1 до 4,5 Гц. При параметрах подвески  $C_c = 4000 \text{ Н/м}$ ,  $k_c = 680 \text{ Н·с/м}$  амплитуда вертикальных ускорений уменьшилась и спектральная кривая сместилась в сторону более низких частот.



**Рис. 6. Частотный анализ вертикального ускорения кресла оператора:**  
 ■ –  $C_c = 8000 \text{ Н/м}$ ,  $k_c = 1000 \text{ Н·с/м}$ ; □ –  $C_c = 4000 \text{ Н/м}$ ,  $k_c = 680 \text{ Н·с/м}$

Таким образом, построенная имитационная модель является универсальной и позволяет определять характер вертикальных ускорений при различных параметрах транспортного средства и видах возмущающих воздействий:

- случайного процесса микропрофиля пути;
- единичных препятствий;
- заданного гармонического изменения пути или тягового усилия.

Кроме того, открытая архитектура программного комплекса SimInTech позволяет добавлять в данную модель и исследовать устройства демпфирования кресла оператора различной физической природы (механические, пневматические, гидравлические) и их системы автоматического управления.

### Библиографический список

1. Афоничев Д.Н. Моделирование микропрофиля пути с помощью программного комплекса SimInTech / Д.Н. Афоничев, А.В. Лощенко, С.Н. Пиляев // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК : матер. международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Воронеж, 27 марта 2020 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – С. 268–277.
2. Бровцин В.Н. Моделирование микропрофиля поверхности полей и дорог / В.Н. Бровцин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2015. – № 86. – С. 59–68.

3. Вибронагруженность рабочих мест трактористов колесных сельскохозяйственных машин при воздействии низкочастотных случайных колебаний / Я.И. Заяц, В.А. Гидон, А.П. Орехов и др. // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты : сборник тезисов конференции ; отв. ред. К.Ф. Фролов. – Москва : Наука, 1974. – С. 460–465.
4. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др. – Москва : Машиностроение, 1976. – 535 с.
5. Кратиров И.В. Колебания тракторов и сельскохозяйственных машин, возбуждаемые грунтозацепами колес / И.В. Кратиров, И.В. Сидоров, В.Г. Столинин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1974. – № 11. – С. 15–16.
6. Оценка вертикальных колебаний колесных тракторов / Б.И. Кальченко, Н.М. Кириенко, Е.Н. Резников, Н.А. Дорошенко // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 10. – С. 17–19.
7. Поливаев О.И. Снижение транспортной вибрации операторов мобильных энергетических средств : монография / О.И. Поливаев. – Москва : РУСАЙНС, 2016. – 182 с.
8. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий : санитарные нормы : утв. и введ. в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 40. – Москва : Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 10 с.
9. Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин / А.А. Силаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1972. – 192 с.
10. Троцкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троцкий. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 248 с.
11. Фомина О.В. Имитационное моделирование динамических процессов в системе «оператор – сиденье – машина – среда» / О.В. Фомина // Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Естественные науки». – 2004. – № 5–6. – С. 150–154.
12. Klee H. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink® / H. Klee, R. Allen. – 3rd edition. – CRC Press : Taylor & Francis Group, 2018. – 852 p.
13. Chaparro L. Signals and Systems Using MATLAB / L. Chaparro, A. Akan. – 3rd edition. – UK : Academic Press (imprint of Elsevier), 2019. – 836 p.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Олег Иванович Поливаев – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Афоничев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Пиляев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Лощенко Алексей Владиславович – ассистент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: loshenko.av@mail.ru.

Александр Юрьевич Черемисинов – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой мелиорации, водоснабжения и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: melioal@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 11.11.2020

Дата принятия к печати 26.12.2020

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Oleg I. Polivaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Dmitriy N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Sergey N. Pilyaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru

Alexey V. Loshchenko, Assistant, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, Russia, e-mail: loshenko.av@mail.ru.

Alexander Yu. Cheremisinov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Land Reclamation, Water Supply and Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: melioal@mail.ru.

Received November 11, 2020

Accepted after revision December 26, 2020