

Полученные аналитические выражения закономерностей торможения трактора с активным прицепом, при использовании тормоза-замедлителя для обеспечения достаточной динамики их торможения, необходимы при обосновании новых разработок средств активизации тракторных прицепов, эксплуатирующихся в тяжелых условиях движения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуськов В.В. Тракторы: Теория/ В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.; Под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с
2. Атаманов Ю.Е., Плищ В.Н., Поварехо А.С., Равино В.В., Таяновский Г.А. Моделирование характеристик дизельного двигателя. Минск, БНТУ, [2014. – 134 с.](#)

УДК 629.114.2

#### **К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ УРОВНЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВОДИТЕЛЯ И ПАССАЖИРОВ ТРОЛЛЕЙБУСА**

*К.О. Артименя, Г.А.Таяновский*

*Аннотация: Рассмотрен методический подход к оценке уровней колебаний частей тела водителя и пассажиров троллейбуса при виртуальных испытаниях машины на математических моделях.*

Троллейбус представляет собой сложную многомерную колебательную динамическую систему. При установившейся средней скорости движения возмущающие воздействия на его колеса от микропрофиля дороги описываются случайными стационарными функциями. Эти воздействия приводят к возникновению, как известно, случайных стационарных низкочастотных колебаний рамы машины, водителя и пассажиров на сиденьях, а также людей, стоящих на полу пассажирского салона. Высокие уровни колебаний неблагоприятно сказываются на здоровье человека, поэтому предельно допустимые значения их ограничиваются законодательно.

При разработке новой машины и подвески ее колес необходимо на этапе выбора параметров общей компоновки, схемы и параметров подвески убедиться в обеспечении допустимых санитарных норм колебаний человека, находящегося в машине. С учетом особенностей планировки пассажирского салона, числа и размещения пассажиров изменится распределение нагрузок на колеса машины, что изменяет картину пространственных колебаний людей в машине. К тому же характер воздействия колебаний на человека, находящегося на сиденье и стоящего на полу салона существенно разнятся. Поэтому в стандартные

методики исследования уровней колебаний людей в машине всегда необходимо вносить доработки. В частности, при рассмотрении колебаний человека в машине, по мнению Международной организации по стандартизации ISO, целесообразно определять их с учетом структуры тела человека, так как для разных частей тела безвредные уровни колебаний существенно отличны и по амплитуде и по частоте.

Разработанная расчетная динамическая система троллейбуса состоит из инерционных масс, взаимодействующих между собой посредством упругих и диссипативных элементов, моделирующих физические свойства механизмов подвески кузова и сидений. Эта модель имеет шесть степеней свободы механической системы и позволяет моделировать продольно-вертикальные колебания рамы машины в продольной и поперечной вертикальных плоскостях, вертикальные колебания пола салона, либо подушки сиденья водителя и пассажиров. Математическое описание движения масс расчетной динамической системы выполняется по методике, изложенной в работе проф. А.А. Силаева [1]. Взаимодействие инерционных масс колес с пневмошинами динамической системы троллейбуса с дорогой моделируется с учетом их упругих и диссипативных характеристик. Микропрофиль поверхности дороги описывался экспоненциально-косинусной корреляционной функцией. Такие функции определены по результатам либо натурных измерений с помощью теодолита ординат выбранных характерных участков городских дорог с последующим удалением тренда матожидания, либо брались ординаты из рекомендуемых стандартами таблиц тестовых дорог, либо по известным из научной литературы корреляционным функциям дорог находились реализации ординат высоты микропрофиля по алгоритму проф. Р.И. Фурунжиева. Шаг дискретизации времени при определении статистических оценок вероятностных характеристик колебаний определяется по теореме Котельникова-Шеннона и по опыту подобных исследований принят равным 0,025 с. Параметры низкочастотных колебательных процессов определялись в диапазоне частот до 28,3 Гц, в котором регламентированы санитарные нормы виброскоростей и виброускорений в октавных и третьоктавных полосах частот, и в которых чаще всего лежат значения собственных частот колебаний динамической колебательной системы.

Скорость движения троллейбуса существенно влияет на характер колебаний и при моделировании дискретно изменяется от 10 до 60 км/ч, чтобы выявить возможные зоны проявления статистических резонансов, которые характеризуются значительным увеличением амплитуд и ускорений колебаний. Оценочные параметры колебаний определяются с помощью вычисленной корреляционной функции, позволяющей рассчитать ординаты спектральной плотности в функции частоты

колебаний, а затем, интегрируя график спектральной плотности в полосах частот, определить интересующие среднеквадратические отклонения либо виброскоростей, либо виброускорений. Спектральные плотности вычисляются на основе ординат корреляционных функций, для сглаживания которых используется корреляционное окно Тьюки. При машинном исследовании колебаний троллейбуса должны быть получены графики зависимостей упомянутых оценок колебаний пола салона троллейбуса в характерных точках в зависимости от коэффициентов жесткостей упругих элементов и коэффициентов сопротивлений диссипативных элементов подвески троллейбуса и пассажирских сидений. Охарактеризованный процесс исследования колебаний колесной машины методически хорошо отработан отечественными учеными. Однако возросшие требования к показателям плавности хода машины, комфортности и безопасности для здоровья человека усложняют задачу исследования.

Так Международная организация по стандартизации ISO рекомендует определять более подробную картину уровней колебаний, воздействующих на человека на основе двухмассовых и четырехмассовых моделей тела человека, так как достижения медицины показали, что для различных частей тела опасны различные значения уровней и частот колебаний. Например, в многомассовых моделях человеческое тело, усаженное на сиденье представлено четырьмя отдельными массовыми сегментами, связанными пятью наборами пружин и демпферов, с полной человеческой массой 60.67 кг 55,2 кг. Эти четыре массы представляют следующие сегменты тела: голова и шея, верхняя часть туловища, нижняя часть туловища, бедра и таз (смотри топологические динамические модели на рисунке 1,а и 1,б). Биомеханические параметры моделей 1а и 1б приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

<i>Биомеханические параметры модели</i>		
<i>Масса (кг)</i>	<i>Демпфирование (кг/с)</i>	<i>Жесткость (Н/м)</i>
<i>голова и шея <math>m_1 = 4.17</math></i>	<i><math>c_1 = 250</math></i>	<i><math>k_1 = 134400</math></i>
<i>верх туловища <math>m_2 = 15</math></i>	<i><math>c_2 = 200</math></i>	<i><math>k_2 = 10000</math></i>
<i>низ туловища <math>m_3 = 5.5</math></i>	<i><math>c_3 = 909.1</math></i>	<i><math>k_3 = 192000</math></i>
<i>бедра и таз <math>m_4 = 36</math></i>	<i><math>c_4 = 330</math></i>	<i><math>k_4 = 20000</math></i>
<i>подушка сиденья</i>	<i><math>c_5 = 2475</math></i>	<i><math>k_5 = 49340</math></i>

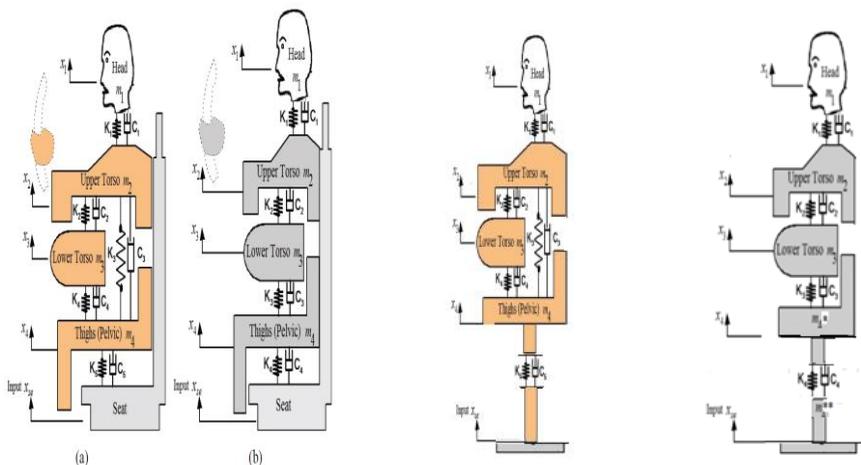


Рисунок 1 – многомассовые модели тела человека для исследований его колебаний при нахождении в машине

Таблица 2

Биомеханические параметры модели		
Масса (кг)	Демпфирование (кг/с)	Жесткость (Н/м)
голова и шея $m_1 = 5.31$	$c_1 = 400$	$k_1 = 310000$
верх туловища $m_2 = 28.49$	$c_2 = 4750$	$k_2 = 183000$
низ туловища $m_3 = 8.62$	$c_3 = 4585$	$k_3 = 162800$
бедря и таз $m_4 = 12.78$	$c_4 = 2064$	$k_4 = 90000$
подушка сиденья	$c_5 = 2475$	$k_5 = 49340$

Для учета структуры тела человека в рассматриваемом исследовании целесообразно применять прием последовательного рассмотрения связанных локальных моделей. Суть приема состоит в определении, на первом этапе, на математической модели характеристик колебаний транспортного средства в процессе имитационного моделирования. В результате определяются значения ординат, скоростей и ускорений колебаний в любой точке подрессоренной массы несущей системы машины, зная значения перечисленных величин в ее центре масс, в соответствии с известными выражениями [1].

На втором этапе используются математические модели, разработанные на основе приведенных биомеханических расчетных моделей человека в машине в сидящем или стоящем положении. Причем

входным воздействием являются соответствующие величины, определенные в результате выполнения первого этапа виртуальных исследований, например, текущие ординаты перемещения либо рамы сиденья, либо точки пола пассажирского салона, над которой размещается стоящий пассажир. Далее, в результате моделирования на биомеханической модели также определяются спектральные плотности виброскоростей или виброускорений низкочастотных колебаний каждой из структурных частей тела человека, вычисляются среднеквадратические их значения в третьоктавных или октавных полосах частот спектра колебаний и сравниваются с допустимыми уровнями по медицинским нормам, которые не вызывают негативного влияния на здоровье человека, находящегося в данной машине.

По результатам описанного анализа делается вывод о приемлемости параметров машины, обуславливающих такие уровни колебаний. Все исследования проводятся для различных скоростей движения, обеспечиваемых моторно-трансмиссионно-двигательным агрегатом троллейбуса. Вычислительный эксперимент параметрической оптимизации подвески по предложенному подходу позволяет найти требуемые рациональные параметры подвески машины. Изложенный подход с использованием набора локальных моделей удобен тем, что на модели человека можно подавать в качестве входных и воздействия, определенные по результатам натуральных испытаний, поскольку замеры параметров низкочастотных колебаний на теле человека и внутренних органах до сих пор в широкой практике затруднительны. Кроме того, составление, отладка программных приложений и проведение виртуального имитационного моделирования в таком случае существенно проще, чем на одной общей сложной модели.

Доработанные методические положения позволяют выполнить расчетно-теоретический анализ лимитирующей возможности работы троллейбуса параметров подвески и режимов движения по критериям плавности хода, выбрать рациональные параметры общей компоновки и планировки салона.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Силаев А.А. Спектральная теория поддрессирования транспортных машин / А.А. Силаев. - М.: Машиностроение, 1972. — 192 с
3. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. - М.: Мир, 1971. - [Т.1,2. - 314 с.](#)