

# ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА АВМ

Б. СЮЧ Кафедра автоматизации,  
Л. ИЛОШВАИ, Кафедра транспортных средств,  
Будапештского Технического университета

(Поступила 18 марта 1972 г.)  
Представлена проф. Д-р. Ф. Чаки

## 1. Введение

В каждой подвеске транспортных средств имеется сухое трение, степень которого зависит, главным образом, от типа подвески, от количества, материала и качества трущихся поверхностей. Самое большое сухое трение в полуэллиптических листовых рессорах грузовых автомобилей, где сила трения может достигнуть даже 30% от полной статической нагрузки, приходящейся на задний мост [1]. На основе испытаний, проводимых приборами, было установлено, что величина силы трения, возникающей в листовых рессорах увеличивается с пробегом автомобиля и после пробега пути порядка 50 000 км она остаётся приблизительно постоянной.

Значит, как это следует из вышеприведённых, в случае отдельных типов подвески есть основание подвергать испытаниям влияние сухого трения на плавность хода и устойчивость хода, поскольку это необходимо в согласии с силой трения, определить оптимальные параметры подвески (характеристика рессор, т. е. амортизации).

На основе публикаций [1, 2, 3], появившихся в литературе, можно сделать некоторые выводы на счёт колебательной роли сухого трения, однако то обстоятельство, что дотеперешние испытания ограничивались только на колебательные системы одно- или двухмассовые, возбуждаемые только синусоидальными волнами, необходимы дальнейшие испытания, приближающиеся в большей степени действительному положению.

Целью настоящей работы является представить, — с помощью метода моделирования на вычислительной машине, значительно автоматизированного и в то же время экономного, — влияние сухого трения на плавность хода для случая реального возмущающего действия микропрофиля дороги стохастического протекания и для двухмассовой колебательной системы.

## 2. Выбор метода испытания

Программа испытаний предусматривала выполнение 720 измерений тождественного типа при различных дорожных условиях и при различных технических параметрах транспортных средств (пять различных дорог, т. е.

скоростей движения, два вида состояния нагрузки, шесть видов коэффициентов сопротивления демпфированию, четыре вида сил трения, измерение трёх статистических характеристик колебаний), что обосновывало сопоставление возможных методов испытания как с точки зрения затраты времени, так и с точки зрения материальных затрат.

Были выдвинуты три метода, а именно: выполнение серии дорожных испытаний, автоматизированное моделирование на аналоговой вычислительной машине (АВМ), а также исследование моделей на цифровой вычислительной машине (ЦВМ). Хотя нижеприведённые определения, строго говоря, справедливы только для данной задачи, однако они могут дать хорошую оценку и для выбора испытаний колебаний транспортных средств, выполняемых с учётом других аспектов.

#### *Серия дорожных испытаний*

а) Была бы продолжительной и дорогостоящей (смотри данные таблицы 1.), так как выполнение 240 дорожных испытаний в оптимальном случае потребовало бы 48 дней.

б) Воспроизводимость измерений не может быть обеспечена в должной мере, ибо при измеряемых, повторенных на том же участке дороги из-за измененных следов, наблюдается 10%-ное расхождение между отдельными результатами измерений.

в) Для реализации исследуемых технических параметров транспортных средств было бы необходимо изготовление и выверка полуэллиптических листовых рессор, представляющих собой предписанную силу сухого трения и амортизаторов с данным коэффициентом сопротивления демпфированию, что уже само по себе является критической задачей.

#### *Автоматизированное испытание моделей на АВМ*

а) Универсальная АВМ отлично пригодна для испытания процессов, происходящих в нелинейных системах и зависящих от времени, а в случае соответствующей машинной ёмкости модель колебания может быть произвольно уточнена.

б) Технические параметры транспортных средств могут быть быстро и произвольно изменены по сравнению с дорожными испытаниями.

в) Нет необходимости отдельных снаряжений, потому что измерительные цепи статистических характеристик колебаний могут быть построены из стандартных элементов вычислительной машины.

г) На вычислительной машине по единственному сигналу генератора шума могут быть параллельно произведены аналогичные сигналы микро-

профиля дороги, характерные для любого типа дороги или же скорости движения.

д) После установки технических параметров модели транспортного средства измерения могут быть автоматизированы, начиная со «старта» транспортного средства до напечатания результатов измерений.

е) Используя соответствующий генератор шума, можно обеспечить, чтобы модель транспортного средства двигалась всегда по тождественному «следу», и поэтому с одной стороны воспроизводимость измерений определяется точностью вычислительной машины, с другой стороны, учитывая нелинейный характер системы, выгодно, что «пройденный участок дороги» является тождественным не только в статистическом смысле, но и с учётом мгновенных неровностей дороги.

### Испытание моделей на ЦВМ

При общезвестных преимуществах и возможностях этого метода [4] в данном случае появилось бы два заметных недостатка:

а) Отображение статистического возмущающего действия микропрофиля дороги, учитывая также динамические свойства системы, требует внесения дискретных данных микропрофиля дороги порядка 50 000.

б) На вычислительной машине средней мощности выполнение 240 испытаний потребовало бы около 50 часов машинного времени, непрерывное обеспечение которого в наших отечественных условиях представляется почти невозможным.

Таблица 1

Методы испытания	Затрата времени и материальных средств	стадии работы			
		подготовка, программирование	дорожные испытания	работа, оценка результ.	всего
Серия дорожных испытаний	дней	смотри пункт в)	50	25	75
	тыс. фор.		200	50	250
Испытания на АВМ	дней	10	*	10	20
	тыс. фор.	20		20	40
Испытания на ЦВМ	дней	10	*	20**	30
	тыс. фор.	20		500	520

\* В случае задач по оптимализации необходимо выполнение нескольких дорожных испытаний.

\*\* 50 часов машинного времени может быть расходувано в благоприятном случае за 20 суток.

На основании вышесказанного и величин затрат времени и материальных средств, приведённых в таблице 1, испытания были выполнены на АВМ с помощью следующего метода моделирования.

### 3. Описание методики испытаний

Испытания плавности хода и устойчивости хода выполнены на двухмассовой модели транспортного средства с двумя степенями свободы (рис. 1), при установке которой мы исходили из следующих:

а) произведения координат центров тяжести соответствуют квадрату радиуса инерции, вследствие чего колебания передней и задней подвесок становятся независимыми друг от друга. Это условие в случае грузовых автомобилей практически было выполнено [5];

б) демпфирующим действием шин можно пренебречь;

в) подвергаются испытанию только вертикальные колебания транспортного средства;

г) применяя плоскую модель, предполагалось, что левые и правые колёса следуют по тождественному следу.

Колебания модели описываются следующей системой неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$M_1 \ddot{y}_1 + k(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + s(y_1 - y_2) + F_\mu \operatorname{sign}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0$$

$$M_2 \ddot{y}_2 + k(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + s(y_2 - y_1) + F_g + F_\mu \operatorname{sign}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) = 0$$

где кроме обозначений рис. 1

$$F_\mu = \begin{cases} s_g(y_2 - h), & \text{если } y_2 - h \leq d \\ s_g d, & \text{если } y_2 - h > d \end{cases}$$

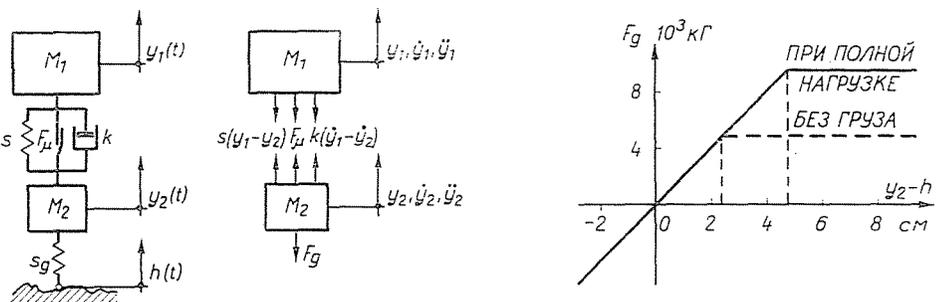


Рис. 1

В пределах одного испытания постоянные технических параметров транспортного средства с данными задней подвески грузового автомобиля типа УРАЛ—375 [5]:

- $M_1 = 3,0 (7, 4) \text{ кГсек}^2\text{см}^{-1}$  без груза (при полной нагрузке)
- $M_2 = 2,0 \text{ кГсек}^2\text{см}^{-1}$
- $s = 800 (810) \text{ кГсм}^{-1}$  без груза (при полной нагрузке)
- $d = 2,45 (4,65) \text{ см}$  без груза (при полной нагрузке)
- $s_g = 2000 \text{ кГсм}^{-1}$
- $k = 10, 20, 27, 50, 70, 100 \text{ кГсексм}^{-1}$
- $F_{\mu} = 0, 600, 1300, 2000 \text{ кГ}$ .

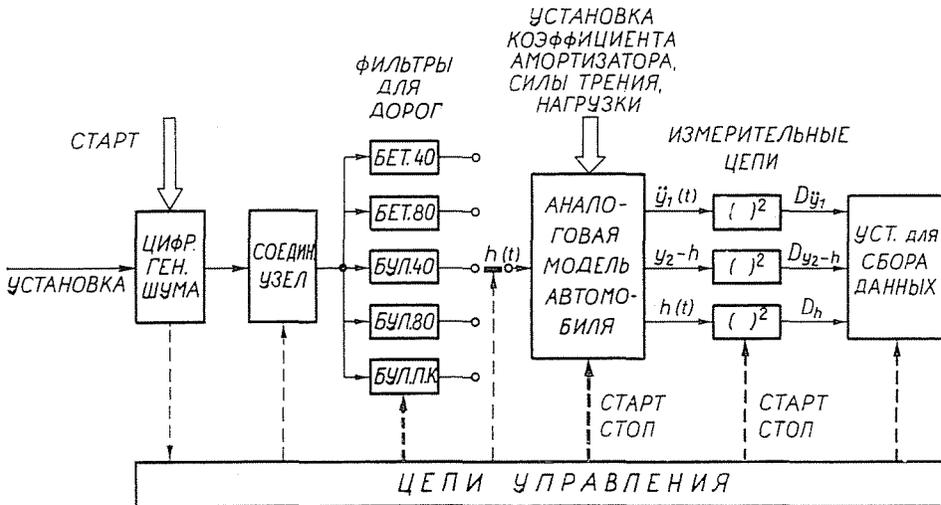


Рис. 2

Модель транспортного средства для АВМ была построена на основе системы дифференциальных уравнений после её преобразования с точки зрения более выгодного программирования и масштабы установлены методом нормализованных переменных. Испытания на вычислительной машине выполнены на АВМ типа МЕДА—40ТА—Б. За устройением программы хорошо можно следить на основе блок-схемы, показанной на рис. 2.

«Белый шум» генератора шума, по сравнению с предписанными спектрами микропрофилей дороги, типа ГПБ—1, был присоединён к входу фильтров профиля дороги с помощью интерфейса с автоматической компенсацией среднего значения. Модель можно было возбуждать аналогичными сигналами микропрофиля дороги. Пять видов, соответствующих типам дорог и

скоростям движения, указанным в таблице 2, спектральная плотность мощности и среднеквадратическое отклонение которых определялись фильтрами микропрофилей дорог.

Величины дисперсии выбранных сигналов модели определялись измерительными цепями и печатались устройством для сбора данных измерения фирмы Солартрона.

После выбора типа дороги и установки технических параметров модели транспортного средства, а также после старта генератора шума, измерение происходило автоматически, и это обеспечивалось цепями управления, встроенными в АВМ в следующей последовательности. При старте генератора шума фильтры микропрофиля дороги заняли состояние «работы», и после истечения 10 секунд включился уже стационарный сигнал  $h(t)$  на входе модели и одновременно начали работать измерительные цепи. Участок измерения длился  $T_0 = 40$  сек (что при скорости 80 км/час обозначало совершение участка дороги около 880 м), после истечения которого цепь управления переключила вычислительную машину в состояние «задержки» и дала отчитать результаты. Сжатием кнопки начального условия генератора шума вся система занимала начальное состояние и можно было установить новую комбинацию параметров. Прямое управление процессом измерения путём двух кнопок в значительной мере сократило возможности ошибки.

Таблица 2

Тип дороги и скорость движения	Спектральная плотность мощности $S_h(j\omega)$ , см <sup>2</sup> сек	Средне-квадратическое отклонение микропрофиля дороги $\sigma_h$ , см
Бетонная дорога 40 км/час	$\frac{0,145}{1 + 0,36 \omega^2}$	0,87
Бетонная дорога 80 км/час	$\frac{0,073}{1 + 0,09 \omega^2}$	0,87
Булыжник 40 км/час	$\frac{0,208}{1 + 0,04 \omega^2}$	1,81
Булыжник 80 км/час	$\frac{0,104}{1 + 0,01 \omega^2}$	1,81
Булыжник плохого качества 40 км/час	$\frac{0,311}{1 + 0,032 \omega^2} +$ $+ \frac{0,00136(1 + 0,002\omega^2)}{1 - 0,0039 \omega^2 + 4 \cdot 10^{-6} \omega^4}$	2,52

### 4. Оценка результатов

В ходе испытаний плавность хода описывалась дисперсией ускорения колебаний кузова:

$$D\ddot{y}_1 = \overline{\ddot{y}_1^2} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \ddot{y}_1^2(t) dt$$

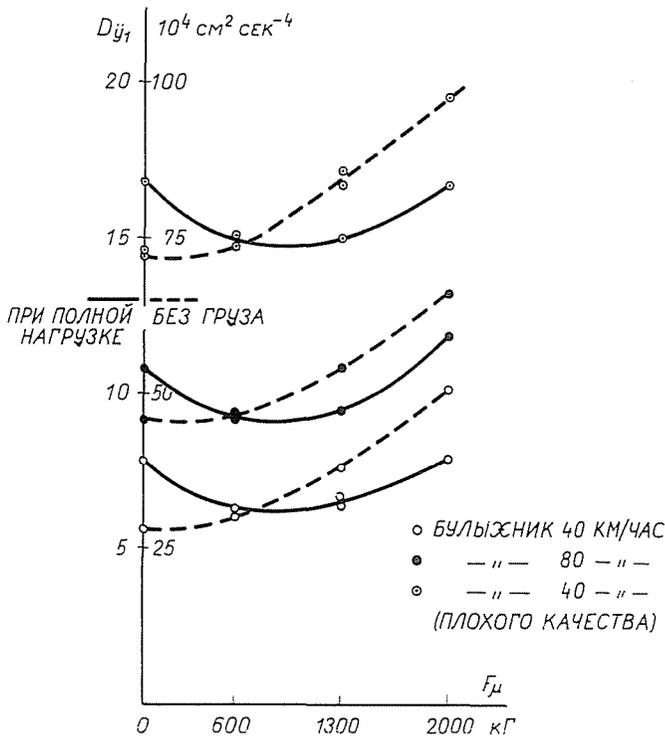


Рис. 3

Устойчивость хода характеризовалась дисперсией неподрессорной массы и относительного перемещения грунта, что пропорционально дисперсии динамической реакции грунта:

$$D_{(y_2-h)} = \overline{(y_2-h)^2} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} [y_2(t) - h(t)]^2 dt.$$

Для проверки во время каждого измерения печаталась дисперсия неровностей микропрофиля дороги.

Изложение подробных результатов испытаний и выводов [6] вышло бы за пределы настоящей статьи, поэтому в качестве иллюстрации показано на рис. 3 образование плавности хода в функции сухого трения  $F_{\mu}$  для транспортного средства, передвигающегося по бульжнику (40 и 80 км/час) и бульжнику плохого качества (40 км/час) с полной нагрузкой и без груза.

Кривые дают количественное описание общеизвестного опыта, согласно которому плавность хода с одной стороны лучше в случае нагруженной грузовой машины, с другой стороны плавность хода становится невыгодной с ухудшением качества дороги и ростом скорости движения.

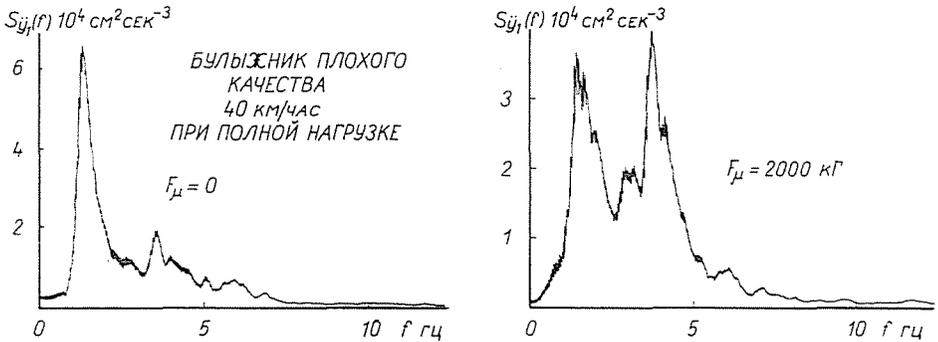


Рис. 4

Плавность хода транспортного средства без груза в значительной мере ухудшается с ростом силы трения, в то время как в случае транспортного средства при полной нагрузке оно до определённой степени улучшается. Факт, что при величине силы трения в пределах 0—2000 кг средняя квадратическая величина ускорения колебаний кузова находится на тождественном уровне, создаёт вид, как будто плавность хода не изменялась. Для более точного определения действительного положения нами определена с помощью специальной статистической вычислительной машины фирмы НОРАТОМ спектральная плотность мощности сигналов ускорения кузова (рис. 4). Анализ показывает, что под действием сухого трения, имеющегося в подвеске, частоты доминантных колебаний повышаются, переходят в область труднее переносимую человеческим организмом, итак они отрицательно влияют на плавность хода.

Анализируя с точки зрения устойчивости хода, можно также установить, что вместе с ростом сил трения растёт опасность (вероятность) отрыва от поверхности грунта, т. е. динамическая реакция грунта, что в повышенной мере подвергает нагрузке дорожное покрытие и ухудшает устойчивость хода.

Как известно, шина отрывается от поверхности грунта в том случае, когда относительное перемещение вала ( $y_2 - h$ ) больше, чем деформация ( $d$ ) шины под влиянием статической нагрузки.

На рис. 5 показана вероятность отрыва шины от поверхности грунта в случае, выдвинутом в качестве примера. В случае транспортного средства без груза колёса отрываются от грунта. Вероятность отрыва кроме роста  $F_{\mu}$  повышает увеличение скорости движения автомобиля и дорожное покрытие худшего качества. Например, на бульжнике плохого качества при исследуемых величинах сил трения колёса совершают 10—22% пройденного пути в воздухе.

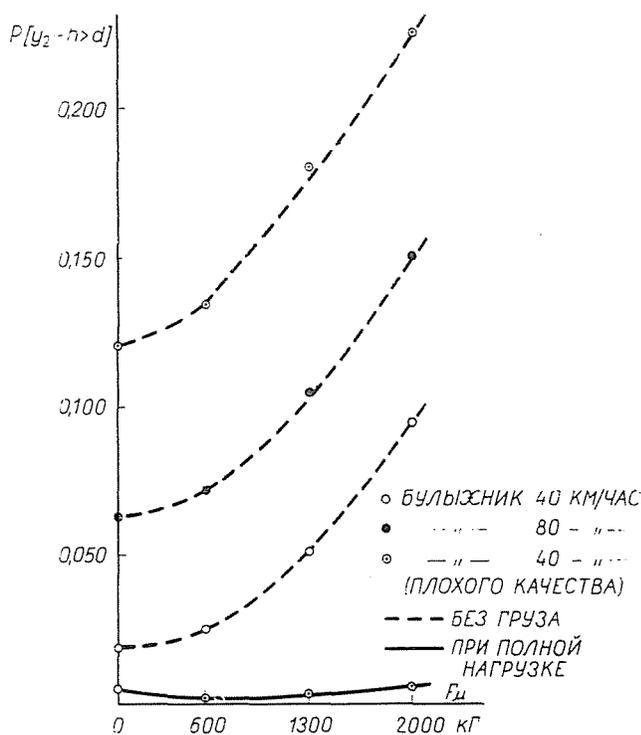


Рис. 5

### Резюме

Имея в виду цель и результаты испытаний, применение случайного возбуждения микропрофилей дороги, а также определение вероятности отрыва шин от грунта дополняют дотеперешний опыт, приобретённый в связи с сухим трением, возникающим в подвесках автомобилей.

Целесообразно подчеркнуть эффективность описанных испытаний при исследовании случайных колебаний транспортных средств, так как по сравнению с методами, дающими примерно тождественные результаты, они могут быть выполнены на один порядок величин дешевле и за более короткие сроки. С технической точки зрения испытания характеризовались в первую очередь автоматической синхронной работой составляющих приборов и производством сигналов микропрофиля дороги спектральной плотности мощности, тождественными с действительными микропрофилями дорог.

### Литература

1. HELLIG, J.: Der Einsatz regelbarer Pulser beim Untersuchen von Fahrzeugteilen. VDI—Z. No. 12. 15. 1967.
2. Ротенберг, Р. В.: Подвеска автомобиля и его колебания. Москва, 1960.
3. Скиндер, И. Б.: К вопросу о действии в подвеске сухого и вязкого трения. Автомобильная промышленность, 1969, № 12.
4. ILOSVAI, L.: Schwingunguntersuchung von Kraftfahrzeugen mit Hilfe von Digitalrechnern. Wiss. Z. der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ in Dresden, 17, 1970, H. 3.
5. Яценко, Н., Прутчиков, О.: Плавность хода грузовых автомобилей. Москва, 1969.
6. Илошвай, Л., Сюч, Б.: Исследование колебательных воздействий сухого трения, возникающего в подвеске транспортных средств. II. Конференция по транспортным средствам и технике двигателей. Шопрон, 1971. (по-венгерски.)

Béla Szücs, 1052 Budapest, XI. Garami E. tér 3, Hungary  
Dr. Lajos ILOSVAI, 1092 Budapest, IX. Kinizsi u. 1, Hungary.