

УДК 629.331

# ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОГО МАССИВА ПРОДОЛЬНОГО И МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТС

В. Г. Михайлов, к. т. н.

## ВВЕДЕНИЕ

Сейчас при проектировании транспортных средств всё больше прибегают к методам виртуального моделирования. Для осуществления моделирования движения автомобиля с учётом дорожных условий требуется массив данных продольных уклонов дорог, а для осуществления расчётов колебаний необходим массив данных микропрофилей дорог. Отличие их заключается в диапазоне замеров высот неровностей: 0,7–22,4 Гц для микропрофилей дорог при шаге замеров обычно 0,1 м, а для продольного профиля используются замеры высот дорог с шагом 150–250 м фактически в диапазоне <0,1–0,3 Гц.

Первый можно получить следующими способами:

- на основе геодезических карт дорог и их обработки;
- проведением замеров дорог с помощью геодезического оборудования, нивелиров;
- использованием дорогостоящих мобильных лабораторий, позволяющих фиксировать наклоны дорог в процессе движения с помощью гироскопов [1, 2];
- использованием данных космического радарного сканирования земли [3], имеющихся в интернете;
- регистрацией параметров CAN-шины электронного блока управления силовым агрегатом движущегося автомобиля и положения автомобиля на трассе с помощью датчика GPS и преобразований на основе уравнений тяговой динамики [4–6].

Микропрофиль дороги можно получить следующими методами:

- использованием специальной подрессоренной тележки, выполненной в виде качающегося маятника и прикрепляемой к автомобилю [8, 9];
- проведением замеров дорог с помощью геодезического оборудования с шагом 0,1 м;

- использованием мобильных лабораторий, регистрирующих перемещение подрессоренной массы автомобиля через ускорения и расстояния от неё до дороги с помощью радаров [1].

К сожалению, метод IRI по оценке ровности дорог [1, 8, 9, 10] непригоден для получения микропрофиля дорог из-за использования базы замеров с шагом 3 м и диапазона регистрации >7,7 Гц. Кроме того, все эти способы трудоёмки, затратны, неточны (погрешность — от 10–15 до 50 %) [9, 10] и небезопасны в условиях интенсивного дорожного движения.

Как показали проведённые автором исследования, продольный профиль и микропрофиль дороги можно получить путём замеров ускорений и углов наклона подрессоренной и неподрессоренной массы автомобиля и последующего математического преобразования на основе следующей схемы колебаний задней части автомобиля в поперечной плоскости (рис. 1).

Колебания неподрессоренной задней части автомобиля описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= (0,5m_n \ddot{Z}_n - C_{uu} \cdot (q_1 - Z_{n1}) - k_{uu} \dot{Z}_{n1} - K_1 F_1 + K_2 F_2); \\ \dot{q}_2 &= (0,5m_n \ddot{Z}_n - C_{uu} \cdot (q_2 - Z_{n2}) - k_{uu} \dot{Z}_{n2} - K_1 F_2 + K_2 F_1); \end{aligned}$$

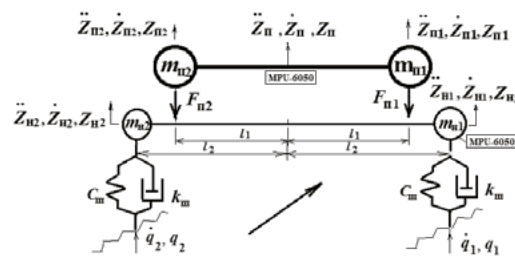


Рисунок 1. Схема колебаний задней части автомобиля в поперечной плоскости



Рисунок 2. Сравнение высот участка дороги от улицы Куйбышева до ул. Л. Беды в Минске

$$F_1 = 0,5(m_n \ddot{Z}_n + l_2 a_n); F_2 = 0,5(m_n \ddot{Z}_n - l_2 a_n);$$

$$\ddot{Z}_{n1} = \ddot{Z}_n + l_2 a_n; \ddot{Z}_{n2} = \ddot{Z}_n - l_2 a_n; \ddot{Z}_{n2} = \ddot{Z}_{n1} + 2l_2 a_n;$$

$$K_1 = (l_2 + l_1) / 2l_2; K_2 = (l_2 - l_1) / 2l_2,$$

где  $m_n$ ,  $m_r$ ,  $\ddot{Z}_n$ ,  $\ddot{Z}_r$ ,  $Z_n$ ,  $Z_r$ ,  $\ddot{Z}_n$ ,  $\ddot{Z}_r$ ,  $Z_n$  — масса, ускорение, виброскорость, и перемещение (приведённое к оси  $Z_n$ ) поддрессоренных и неподдрессоренных частей задней части автомобиля;  $F_{n1}$ ,  $F_{n2}$  — усилие в подвеске;  $C_{ш}$ ,  $k_{ш}$  — жёсткость и коэффициент демпфирования шины;  $l_1$ ,  $l_2$  — размеры;  $K_1$ ,  $K_2$  — коэффициенты приведения к оси  $Z_n$ .

Решая эти уравнения в пакете MATLAB/Simulink с использованием массива замеров ускорений и углов наклона  $a_n$  и  $a_r$ , можно получить значения виброскорости, а через них —  $q_1$  и  $q_2$  микропрофиля

дороги. Массив продольных углов дорог можно получить путём замеров наклона автомобиля.

В результате этого получаются два разных массива, которые сложно использовать при решении одновременных задач тяговой динамики и колебаний автомобиля ввиду ограниченности объёма массива памяти 384 Кб даже при использовании модуля S-Function Builder MATLAB/Simulink (подпрограммы в виде DLL на языке C). Это около 5 км дороги по микропрофилю по двум колеям. Для сравнения: при использовании массива MS Excel доступен только 1 Кб.

Проведённая дополнительная обработка и анализ показали возможность использования единого массива параметров дороги.

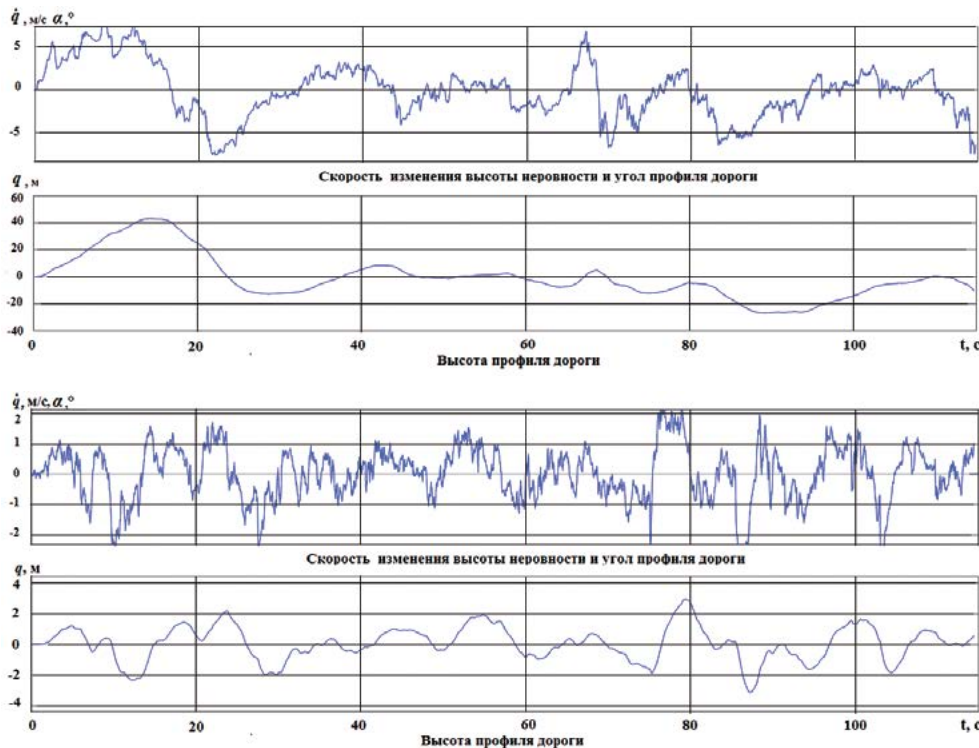


Рисунок 3. Изменение скорости, угла наклона и высоты неровности участков дороги от д. Сёмково до д. Юзофова под Минском

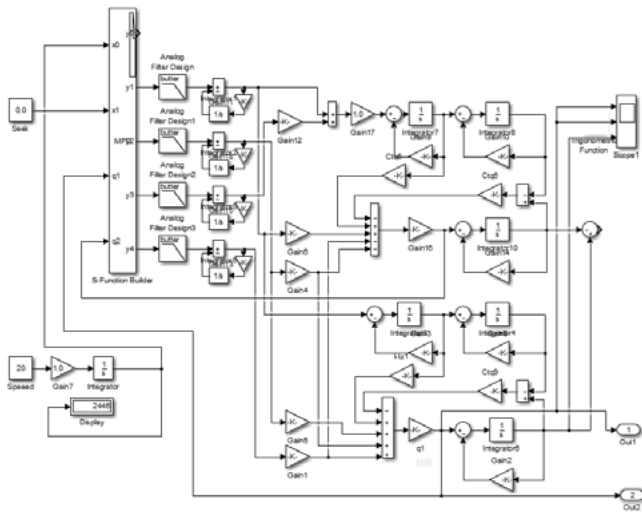


Рисунок 4. Блок-схема получения продольного и микропрофиля дороги в пакете MATLAB/Simulink

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОГО МАССИВА ПАРАМЕТРОВ ДОРОГИ

Как показала дополнительная обработка данных ускорений поддрессоренной и неподдрессоренной массы, при использовании параметров сглаживания интеграторов, равных 0,08, на выходе получают значения высоты профиля дороги (рис. 2). Хотя визуально кажется, что это инфранизкочастотный спектр, но он содержит и спектр колебаний 0,7–22,4 Гц. Это зависит от точности интегрирования. Единственное условие — постоянство скорости движения. К сожалению, выдержать это в городских условиях движения из-за светофоров, препятствий, ям, колодцев крайне сложно, что приводит к некорректности в подобных случаях. В то же время на начальном участке 300 м, где не было обозначенных факторов, разница с данными эксперимента по высоте получилась 3–7 % при скоростях 20–60 км/ч.

По субъективным визуальным оценкам, на трассах имеет место хорошее совпадение данных по профилю дороги и характеру его изменения. Здесь легче выдержать постоянство скорости. При скорости 72 км/ч (20 м/с) на трассах практически никого не обгоняешь, не создаёшь помех движению, а качество дорог гораздо лучше, чем в городе. Похоже, что исходя из этих же соображений в методе IRI выбрана скорость 80 км/ч (22,2 м/с) (в соответствии со скоростным потоком за рубежом). Метод замеров по ускорениям и углам наклона автомобиля лучше подходит для записей дорог вне города. Пример полученных осциллограмм неровностей дорог показан на рис. 3. Блок-схема получения неровностей дорог приведена на рис. 4.

Как показали проведённые исследования, в качестве массивов возмущения лучше использовать высоту профиля дороги  $q$ . Скорость ( $\dot{q}$ ) изменения высоты профиля дороги можно получить дифференцированием  $q$ . Этот же параметр можно использовать для определения угла наклона дороги, поскольку производная функции в точке равна тангенсу угла наклона касательной, проведённой в точке, то есть  $tg(\alpha) = \dot{q}$ . Отсюда  $\alpha = arctg(\dot{q})$ . При вычислении продольного угла при использовании модуля тригонометрической функции в MATLAB/Simulink вначале надо  $\dot{q}$  разделить на 57,3 для перевода в радианы, а потом полученное  $\alpha$  умножить на 57,3. Ввиду линейной зависимости при небольших углах наклона ( $<10^\circ$ ) величина  $\alpha$  в градусах практически равна  $\dot{q}$ .

Несмотря на то что параметры сглаживания интеграторов 0,08 (для продольного) и 0,4 (для микропрофиля) существенно влияют на высоту профиля/неровности, при выборе точности 9–10 знаков в пакете MATLAB/Simulink это не оказывает серьёзного влияния на точность расчёта колебаний (ускорений) в диапазоне 0,7–22,4 Гц при получаемом и используемом микропрофиле, так как конечное воздействие определяется разностью возмущения дороги и реакцией автомобиля. Параметры сглаживания интеграторов 0,08 для продольного профиля можно использовать и для микропрофиля. Получаемый при этих параметрах микропрофиль является единым массивом возмущения дороги.

Единственное — при моделировании движения для продольного профиля необходимо использовать фильтр низких частот, чтобы исключить фактор необоснованного переключения передач.

Предложенный метод получения и использования единого массива продольного и микропрофиля дороги открывает возможность проведения одновременного моделирования движения, колебаний, нагруженности автомобиля и его узлов в дорожных условиях, более приближенных к реальным, и позволяет точнее оценивать параметры автомобиля при моделировании, проводить оценку ровности дороги, а также управлять работой испытательных стендов.

## ВЫВОДЫ

1. Как показал анализ используемых методов замеров дорог, ни один из них не обеспечивает получения для моделирования единых данных параметров дорог и необходимой точности.
2. Предложен метод получения продольных профилей и микропрофилей больших участков дорог в процессе движения автомобиля, базирующийся на интегрировании ускорений поддрессоренной и не-

подрессоренной массы транспортного средства, учёте продольных и поперечных углов наклона, силового воздействия основной подвески через массу и ускорение и последующем математическом преобразовании в пакете MATLAB/Simulink.

3. Установлена возможность получения и использования единого массива данных профилей дорог для задач моделирования движения и колебаний автомобиля или транспортного средства на основе использования скорости изменения высоты неровности, предложена реализация её записи на автомобиле и математической обработки в пакете MATLAB/Simulink.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Methods and devices for registration of road microprofiles / A. D. Skulić, B. B. Pejović, T. N. Todić et al. // ТЕХНИКА — МАШИНСТВО. — 2016. — № 5 (65). — P. 697–701 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2016/0040-21761605697S.pdf> (дата обращения: 30.10.2017).
2. Al-Ghalieh M. A. M. Developing a roughness criterion as a basis for performance measurement of Palestinian roadway network. — Nablus: An-Najah National University, 2003 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: [https://scholar.najah.edu/sites/default/files/all-thesis/developing\\_a\\_roughness\\_criterion\\_as\\_a\\_basisfor\\_performance\\_measurement\\_of\\_palestinian\\_roadway\\_network.pdf](https://scholar.najah.edu/sites/default/files/all-thesis/developing_a_roughness_criterion_as_a_basisfor_performance_measurement_of_palestinian_roadway_network.pdf) (дата обращения: 24.09.2017).
3. Шпенст В. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли космического базирования // Компоненты и технологии. — 2013. — № 3. — С. 154–158 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: [http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2013\\_3\\_154.pdf](http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2013_3_154.pdf) (дата обращения: 24.07.2017).
4. Sahlholm P. Piecewise linear road grade estimation / P. Sahlholm, A. Gattami, K. H. Johansson. — Stockholm, 2011. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: [https://people.kth.se/~kallej/papers/vehicle\\_sae11.pdf](https://people.kth.se/~kallej/papers/vehicle_sae11.pdf) (дата обращения: 19.01.2018).
5. Sahlholm P. Road grade estimation for look-ahead vehicle control / P. Sahlholm, K. H. Johansson. — Stockholm, 2008. — P. 7 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: [https://people.kth.se/~kallej/papers/vehicle\\_ifac08.pdf](https://people.kth.se/~kallej/papers/vehicle_ifac08.pdf) (дата обращения: 19.01.2018).
6. Bae H. S. Road grade and vehicle parameter estimation for longitudinal control using GPS / H. S. Bae, J. Ryu, J. C. Gerdes [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. — URL: [http://ddl.stanford.edu/sites/default/files/bae\\_ieee\\_its2001.pdf](http://ddl.stanford.edu/sites/default/files/bae_ieee_its2001.pdf) (дата обращения: 19.01.2018).
7. Динамика системы «дорога — шина — автомобиль — водитель» / под ред. А. А. Хачатурова. — М.: Машиностроение, 1976. — 535 с.
8. Гришкевич А. И. Исследование динамики движения армейских автомобилей по дорогам с неровной поверхностью: дис. ... докт. техн. наук. — Минск, 1973. — С. 353.
9. SO 8608:2016. Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data. — 2016.
10. ГОСТ 33101-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности. — М.: Стандартинформ, 2016.