

УДК 629.113.073

Михайлов Владимир Георгиевич, канд. техн. наук,
Республика Беларусь, Минск, sapr7@mail.ru

ВЫБОР И ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РОВНОСТИ И КАЧЕСТВА ДОРОГ

Аннотация. Рассмотрены существующие и предложены новые методы замеров продольных профилей и микропрофилей больших участков дорог в процессе движения автомобиля, базирующийся на замерах продольных углов наклона автомобиля, ускорений поддрессированной и неподдрессированной массы и их математического преобразования в пакете MatLab/Simulink. На основе их проведена регистрация продольных и микропрофилей 5 типов дорог. Выполнен анализ их характеристик по параметрам перемещений, скорости, ускорениям в третьоктавных полосах частот. Предложено оценивать ровность дороги по скорости изменения уклонов в полосе 0,16–0,4 Гц: до 0,15 м/с – дороги с малыми уклонами, до 0,25 м/с – небольшими, до 0,3 м/с – средние, свыше 0,4 м/с – большими. Качество микропрофиля дорог целесообразно оценивать по спектру среднеквадратической скорости микропрофиля в третьоктавных полосах 6,3–12,6 Гц: $\dot{q}$ до 4 см/с – дороги отличного качества, до 6 см/с – дороги хорошего качества, до 8 см/с – дороги удовлетворительного хорошего качества, свыше 10 см/с – плохие.

Ключевые слова: автомобиль; продольный профиль; микропрофиль дороги; Raspberry; Matlab/Simulink.

Mikhailov Vladimir G., Ph. D.,
Republic Of Belarus, Minsk, sapr7@mail.ru

CHOICE AND ESTIMATION OF INDICATORS OF FLATNESS AND QUALITIES OF ROADS

Abstract. Are considered existing and new methods of gaugings of longitudinal and microprofile – of the big sites of roads in the course of the vehicle movement, based on gaugings of longitudinal discharge angles of the vehicle, speedups sprung and unsprung mass and their mathematical transformation in package MatLab/Simulink are offered. On the basis of them registration longitudinal and microprofile of 5 types of roads is spent. The analysis of their characteristics on parametres of conveyances, speeds, to speedups in 1.3 octave strips of frequencies is made. It is offered to estimate flatness of road on speed of change of biases in a strip of 0,16–0,4 Hz: to 0,15 sm/s – roads with small biases, to 0,25 sm/s – small, to 0,3 sm/s – averages, over 0,4 sm/s – big. Quality of a microprofile is expensive to estimate expediently on a spectrum squared magnitude speeds of a microprofile in 1/3 octave strips of 6,3–12,6 Hz: to 4 sm/with – roads of excellent quality, to 6 sm/with – high quality roads, to 8 sm/with – roads of satisfactory high quality, over 10 sm/with – bad.

Key words: the Vehicle; longitudinal profile microprofile of road; its reception by means of minicomputer Raspberry and transformations in Matlab/Simulink.

Введение

Для проведения расчетов автомобиля в пакете Matlab/Simulink требуется использование массивов углов продольных профилей и высот микропрофилей дорог, которые характеризуют ровность и качество дорог. К сожалению, полученные в 70–80 годах прошлого столетия статистические данные по микропрофилям дорог [1] во многом устарели, так как изменился характер интенсивности эксплуатации дорог. Использование их данных в современных пакетах затруднено из-за ступенчатости сигнала с генератора «белого» шума. Для проведения сопоставимых испытаний автомобиля также требуется учитывать параметры продольного профиля и микропрофиля дороги. Основной вопрос по каким показателям это делать.

Параметры продольного профиля дороги можно получить следующими способами: на основе геодезических карт дорог, их обработки, проведения замеров дорог с помощью геодезического оборудования, нивелиров [2], использования дорогостоящие мобильные лаборатории [1, 3, 4, 5], использования данных космического радарного сканирования земли [6], имеющиеся в интернете, регистрации 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 [7].

Для получения микропрофиля дорог требуется использование дорогостоящих мобильных лабораторий, позволяющих фиксировать перемещение поддрессоренных и неподдрессоренных частей автомобиля и расстояния от поддрессоренной части до полотна дороги с помощью радарных датчиков и последующего математического преобразования [5].

Все эти методы сложны и затратны. Сейчас основным способом оценки ровности дорог, используемый строителями и эксплуатационщиками дорог, является метод IRI, в основе которого

среднеарифметические значения вычисляемого параметра высоты неровности (q_0/L) как разности перемещений кузова и высоты до неровности дороги [2, 3, 4]. Фактически это метод оценки микропрофиля дороги, а не ее ровности, характеризуемой углами наклона дороги. Метод IRI базируется на регистрации ускорений (с последующим преобразованием в виброскорости и перемещения) поддрессоренной и неподдрессоренной масс движущегося автомобиля (80 км/ч). База блоков замеров дороги L принята равной 3 м при шаге 0,125 м. Отметим, что в IRI фактически вместо высоты неровности дороги q_0 используется перемещение Z_n неподдрессоренной массы автомобиля, что может быть корректно только до 4–5 Гц, а не областей больше 7,4 Гц, для которых рассчитывается показатель IRI.

Недостатком метода IRI с позиции колебаний автомобиля является использование блоков коротких участков замеров (с базой 3 м, соответствующей частоте возмущения 7,4 Гц и выше при скорости 80 км/ч при основных вибрациях, приходящихся на полосу 2 Гц. Из-за этого данные IRI не подходят для моделирования колебаний автомобиля.

Целью данной работы является выбор и оценка показателей продольных профилей и микропрофилей дорог для использования при моделировании движения, колебаний и испытаний автомобиля.

1. Разработка новых методов получения параметров дорог

Базируясь на фактах, что датчики ускорений линейно реагируют на небольшие наклоны и при двойном интегрировании ускорений в спектре сигнала присутствует инфранизкочастотная составляющая, характерная для наклона дороги в работе [8] предложены два новых метода получения данных по продольному профилю и микропрофилю дорог:

– **использование данных ускорений и наклонов** на кузове и над задней осью по двум осям X и Y , интегрирования их с экспонентным

сглаживанием с коэффициентом K и получения микропрофиля дороги в широкой полосе 0,1–25 Гц, затем выделение полосы сигнала 0,1–0,63 Гц, соответствующей продольному профилю дороги);

– на основе регистрации **продольного угла наклона автомобиля** (по h), учитывая, что

$$h = K_{\pi} \cdot v \cdot \int_0^t \alpha dt$$

где $K_{\pi} = 0,0176$ – коэффициент перевода угла из градусов в радианы;

α – угол наклона автомобиля; v – скорость автомобиля.

Получение микропрофиля дорог на движущемся автомобиле по первому методу базируется на следующей схеме колебаний задней части автомобиля в поперечной плоскости (рис. 1), подробно рассмотренной в работе [8].

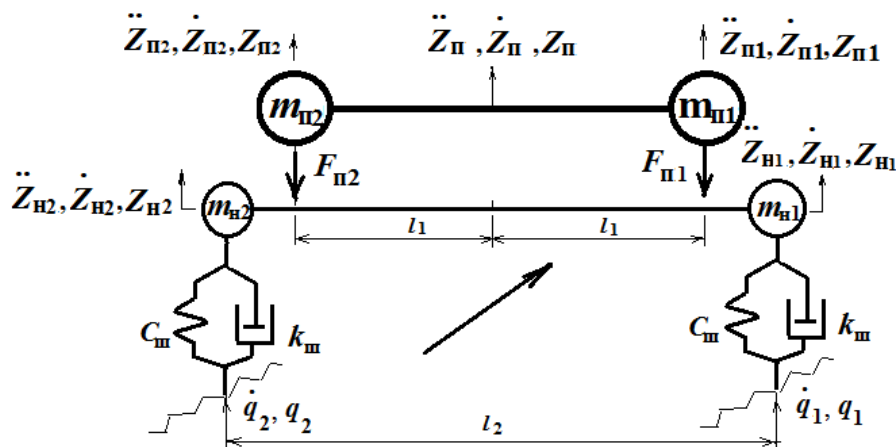


Рис. 1. Схема колебаний задней части автомобиля в поперечной плоскости

Колебания неподрессоренной задней части автомобиля можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{k_{ш}} (0,5m_n \ddot{Z}_n - C_{ш} \cdot (\dot{q}_1 - \dot{Z}_{n1}) - k_{ш} \dot{Z}_{n1}) - K_1 (F_1 + F_2);$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{k_{ш}} (0,5m_n \ddot{Z}_n - C_{ш} \cdot (\dot{q}_2 - \dot{Z}_{n2}) - k_{ш} \dot{Z}_{n2}) - K_1 (F_1 + F_2);$$

$$F_1 = 0,5m_{\text{п}}\ddot{Z}_{\text{п}} + K_1l_1a_{\text{п}}; F_2 = 0,5m_{\text{п}}\ddot{Z}_{\text{п}} - K_1l_1a_{\text{п}};$$

$$\dot{Z}_{\text{п1}} = \dot{Z}_{\text{п}} + l_1 \cdot \dot{a}_{\text{п}}; \dot{Z}_{\text{п2}} = \dot{Z}_{\text{п}} - l_1 \cdot \dot{a}_{\text{п}};$$

$$\dot{Z}_{\text{н2}} = \dot{Z}_{\text{н1}} - l_1 \cdot \dot{a}_{\text{н}}; Z_{\text{н2}} = Z_{\text{н1}} - l_2 \cdot a_{\text{н}}; K_1 = 2l_1/l_2;$$

где $m_{\text{п}}$, $m_{\text{н}}$, $\ddot{Z}_{\text{п}}$, $\dot{Z}_{\text{п}}$, $Z_{\text{п}}$, $\ddot{Z}_{\text{н}}$, $\dot{Z}_{\text{н}}$, $Z_{\text{н}}$ – масса, ускорение, виброскорость, перемещение поддрессоренных и неподдрессоренных частей задней части автомобиля; $F_{\text{п1}}$, $F_{\text{п2}}$ – усилие в подвеске; $C_{\text{ш}}$, $k_{\text{нi}}$ – жесткость и коэффициент демпфирования шины, l_1 и l_2 – размеры.

Решая эти уравнения в пакете Matlab/Simulink с использованием записей экспериментальных замеров ускорений и углов наклона автомобиля при постоянной скорости движения 72 км/ч (20 м/с), можно получить продольный профиль и микропрофиль дороги [8].

2. Результаты исследования характеристик дорог

Исследовались следующие участки дорог возле Минска:

- участок 1 асфальтированного шоссе Вишневка – Новинки, характеризуемого субъективно как дорога очень хорошего качества, 4 полосы движения с небольшими уклонами, протяженностью 10 км;
- участок 2 бетонного шоссе МКАД-2, между Острошицким городком – перекресток М, недавно введенная в эксплуатацию, 4 полосы движения с небольшими уклонами;
- участок 3 местной дороги Белробот – Приморье – Семков городок – Чучаны – МКАД2 длиной 10 км. Данный маршрут характерен значительными перепадами высот, разным качеством покрытия (асфальт, бетонные плиты), проездом через 3 населенных пункта, наличием двух поворотов, две полосы движения;
- участок 4 местной дороги Саломоречье – Вишневка, дорога из бетонных плит, значительные перепады высот, 12 км;

– участок 5 местной дороги возле г.п. Салюты, грунтовое разбитое шоссе, 5 км.

В качестве основных критериев качества дорог оценивалась возможность использования среднеквадратических значений высоты, скорости и ускорения неровностей дороги в третьоктавных, октавных и широких полосах частот (1,25–25 Гц) для микропрофиля и среднеквадратические значения скорости изменения высоты профиля дороги в третьоктавных полосах 0,03–0,63 Гц, характеризующих уклоны. Следует отметить, что значение скорости изменения высоты профиля дороги соответствует значению tg наклона дороги в процентах.

Результаты сравнения скорости изменения наклона дороги, полученные различными методами, приведенные на рис. 2, показали, что характер и значения спектра при различных методах близки и лежат в пределах погрешности этих методов (расхождение от среднего 10–25%).

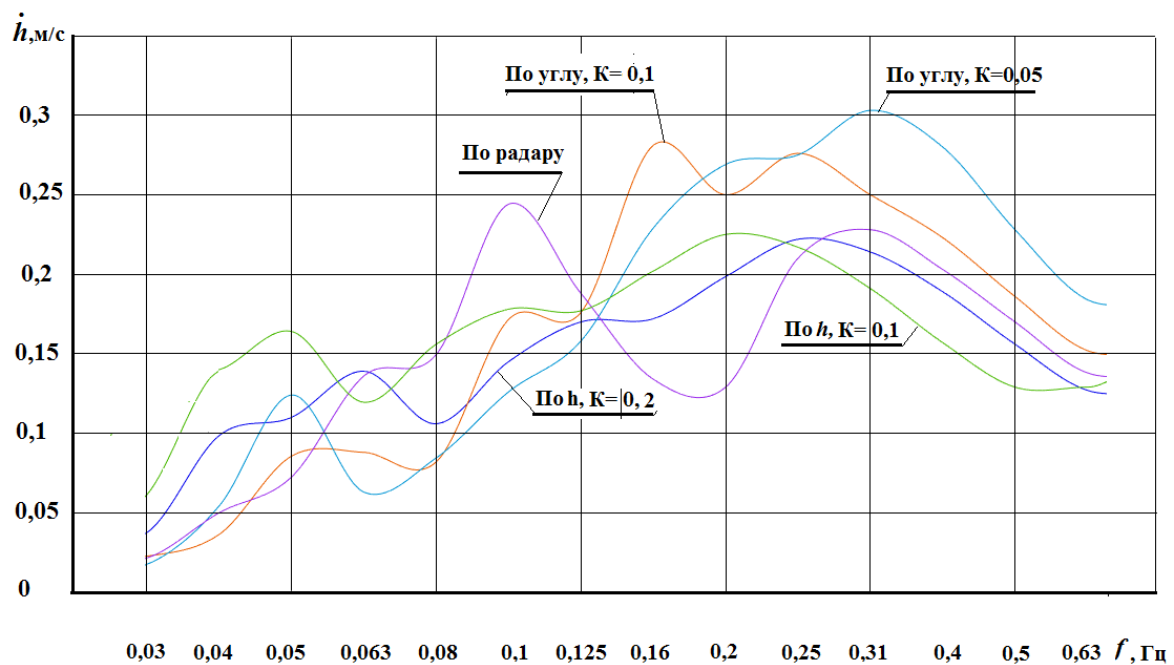


Рис. 2. Сравнение спектра скорости изменения высоты при различных методах получения продольного профиля дороги

Результаты исследования характеристик дорог, полученных по углу наклона для продольного профиля и микропрофиля приведены

на рисунках 3–7. Для построения графиков использовался метод интерполяции Catmull-Rom, реализованный в разработанной программе на C/C++ S-Function Builder MatLab/Simulink.

Примечание. 1 – асфальтовое шоссе Вишневка–Новинки, 2 – бетонное шоссе МКАД-2, 3 – шоссе Белробот–Семков городок–перекресток МКАД-2, 4 – перекресток МКАД-2 – Вишневка, 5 – гравийная разбитая дорога.

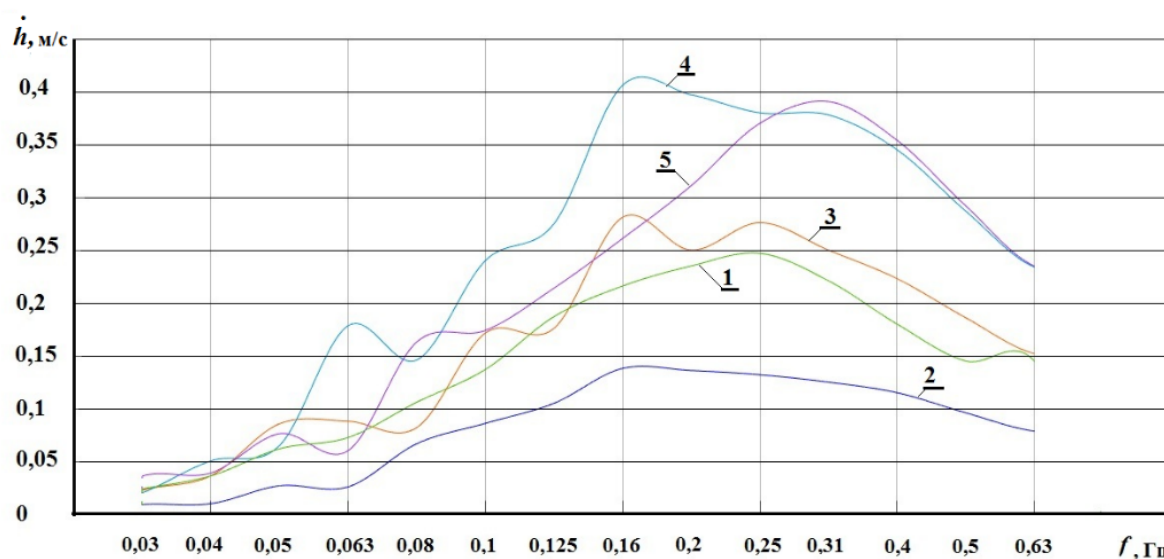


Рис. 3. Изменение среднеквадратических значений скорости изменения высоты продольного профиля (наклона дороги) от типа дороги в третьоктавных полосах 0,03–0,63 Гц

Как видно из рис. 3 основной спектр скорости изменения высоты продольного профиля приходится на третьоктавы 0,15; 0,2; 0,25; 0,31 Гц. Уровень среднеквадратических значений составляет 0,25 м/с при 0,25 Гц у дороги 1; 0,14 м/с при 0,16 Гц у дороги 2; 0,28 м/с при 0,16 Гц у дороги 3; 0,41 м/с при 0,16 Гц у дороги 4; 0,39 м/с при 0,31 Гц у дороги 5. И такой же характер изменения в целом по общей полосе 0,03–0,63 Гц. Приведенные среднеквадратические значения в полосе 0,16–0,4 Гц могут характеризовать состояние продольного профиля дороги по уклонам: до 0,15 м/с – дороги с малыми уклонами, до 0,25 м/с – небольшими уклонами, до 0,3 м/с – со средними, свыше 0,4 м/с – большими.

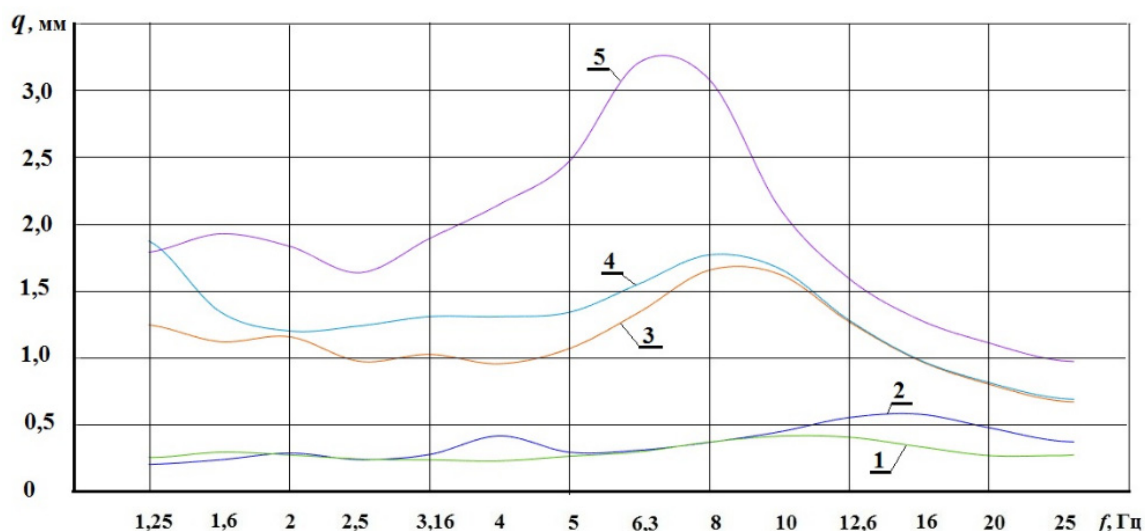


Рис. 4. Изменение среднеквадратических значений высоты микропрофиля от типа дороги в третьоктавной полосе 1,2–25 Гц

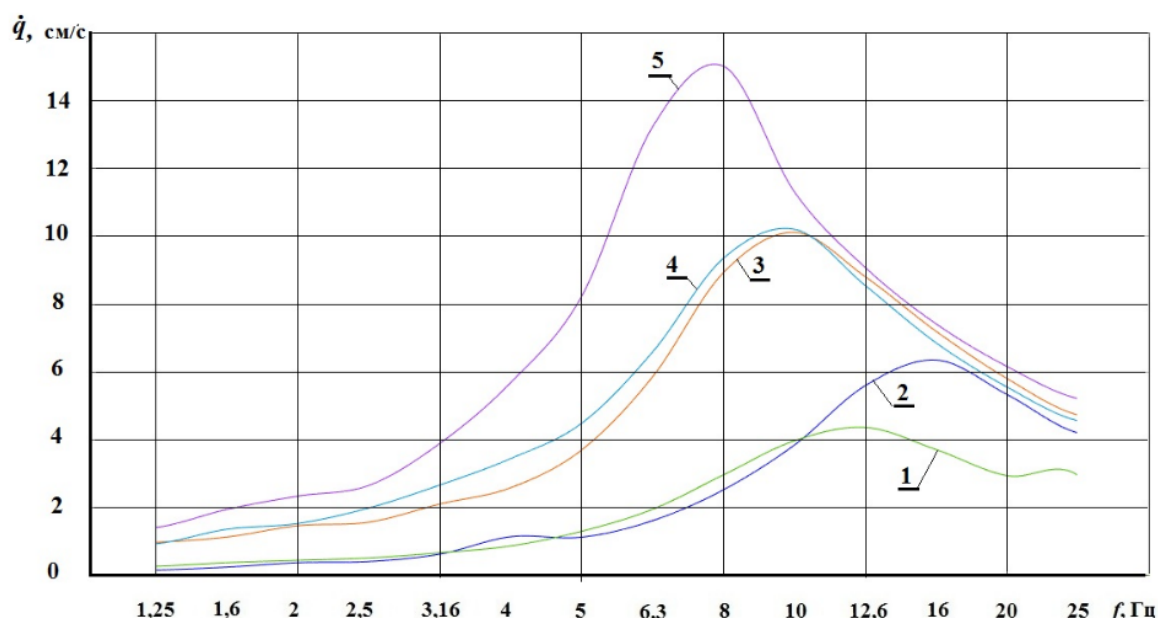


Рис. 5. Изменение среднеквадратической скорости микропрофиля дороги в третьоктавных полосах 1,2–25 Гц от типа дороги

Из рисунков 4–6 следует, что для оценки микропрофиля дороги лучше подходит использование значений высоты и скорости ее изменения. Но в первом случае необходимо гарантировать отфильтрацию более низких частот (менее 1 Гц), относящихся к продольному профилю и имеющих большие значения. Использование значений ускорений микропрофиля дороги неоднозначно в области больше 10 Гц. Из рис. 6 видно, что дороги 3, 4 по ускорению микронеровности практически

совпадают, дороги 1, 2 имеют близкие параметры до частоты 11 Гц. У грунтовой дороги 5 спектр смещен влево, в диапазоне 10–25 Гц ее спектр совпадает с дорогой 4. Учитывая необходимость оценки больших участков дорог, все же лучше использование значений скорости изменения высоты.

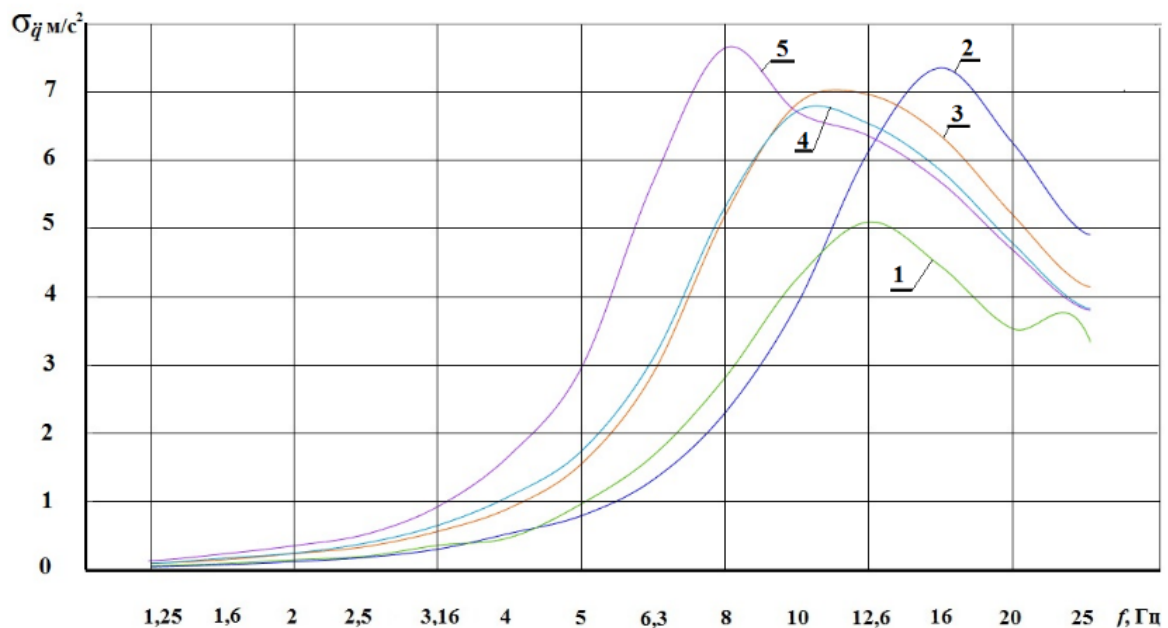


Рис. 6. Изменение среднеквадратических ускорений микропрофиля дороги от частоты и типа дороги

При обработке данных по методу IRI величина неровностей дорог 1, 2, 3, 4, 5 составила соответственно 1,07; 0,9; 6,93; 8,96; 9,5 мм/м против 1,476; 1,91; 5,29; 5,8; 8,92 мм среднеквадратических значений высоты в полосе 2–22 Гц и 12,5; 17,6; 29; 29,2; 38 м/с при оценке по скорости изменения высоты в полосе 6,3–22 Гц. По методу IRI получается больший диапазон изменений значений ровности исследованных дорог (9 против 6-ти и 3). В большинстве работ по плавности хода в основном приводят данные по среднеквадратическим величинам высоты неровностей, но это данные замеров небольших (200–400 м) ровных участков дорог.

Приведенные на рис. 2 графики могут характеризовать дороги по продольным уклонам, основной спектр которых приходится

на третьоктавы 0,16–0,315 Гц. Наиболее низкие значения у дороги 2 (0,138 м/с при 0,16 Гц), 2-е место занимает дорога 1 (0,25 м/с при 0,16 Гц), 3-е – место у дороги 3 (0,2 м/с при 0,16 Гц), 4 – место у дороги 5 (0,39 м/с при 0,315 Гц), 5-е – место у дороги 4 (0,406 м/с при 0,16 Гц). На основании этих данных предлагается оценивать дороги по уклонам по скорости изменения высоты уклонов в полосе 0,16–0,4 Гц до 0,15 м/с дороги с малыми уклонами, до 0,25 м/с небольшими, до 0,3 м/с средние, свыше 0,4 м/с большими.

Качество микропрофиля дорог исходя из вышеизложенного целесообразно оценивать по спектру среднеквадратической скорости микропрофиля в третьоктавных полосах 6,3–12,6 Гц: $\dot{q}$ до 4 см/с – дороги отличного качества, до 6 см/с – дороги хорошего качества, до 8 см/с – дороги удовлетворительного хорошего качества, свыше 10 см/с – плохие либо по более широкой полосе 6,3–22,4 Гц с распределением значений градаций 12,5; 18; 30; 38 см/с для этих же дорог. И все это необходимо учитывать при подборе дорог для заводских испытаний автомобилей.

Заключение

1. Как показал проведенный анализ ранее используемые методы получения параметров дорог уже не отвечают современным требованиям и необходимы новые методы получения продольного профиля и микропрофиля дороги, пригодные как для оценки ровности и качества, так и моделирования движения и колебаний автомобиля.

2. Предложены два новых метода замеров продольного профиля и микропрофилей больших участков дорог в процессе движения автомобиля, базирующийся на интегрировании ускорений поддрессоренной и неподдрессоренной массы транспортного средства, учета продольного и поперечных углов наклона, и преобразования в пакете MatLab/Simulink.

3. На основе выполненного анализа характеристик 5-ти типов дорог предложено оценивать ровность дорог по скорости изменения высоты продольного профиля в полосе 0,16–0,4 Гц до 0,15 м/с дороги с малыми уклонами, до 0,25 м/с небольшими, до 0,3 м/с средние, свыше 0,4 м/с большими.

4. Качество микропрофиля дорог целесообразно оценивать по спектру среднеквадратической скорости микропрофиля: $\dot{q}$ в третьоктавных полосах 6,3–12,6 Гц до 4 см/с – дороги отличного качества, до 6 см/с – дороги хорошего качества, до 8 см/с – дороги удовлетворительного хорошего качества, свыше 10 см/с – плохие либо по более широкой полосе 6,3–22,4 Гц с распределением значений градаций 12,5; 18; 30; 38 см/с для этих же дорог. Использование параметра IRI не пригодно для задач плавности хода автомобиля из-за большого разброса изменений величин (в 9 раз).

Список литературы

1. Хачатуров, А.А. Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / А.А. Хачатуров. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение продольного микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения: СТО МАДИ 02066517.1-2006.
3. ГОСТ 33101-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности. – М.: Стандартинформ, 2016.
4. International Standart ISO 8608 2016. Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data.
5. URL: <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2016/0040-21761605697S.pdf> (дата обращения: 30.10.2017).
6. URL: http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2013_3_154.pdf (дата обращения: 24.07.2017).
7. Sahlholm, P. Piecewise Linear Road Grade Estimation / P. Sahlholm, A. Gattami, K.H. Johansson. – Sweden, Stockholm: KTH – School of Electrical Engineering; SE-100 44, 2011. – 16 p.
8. Михайлов, В.Г. Получение и использование единого массива продольного профиля и микропрофиля дороги для моделирования ТС / В.Г. Михайлов // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – № 2. – С. 4–7.

References

1. Hachaturov A.A. *Dinamika sistemy doroga–shina–avtomobil'–voditel'* (The dynamics of the system road–tyre–vehicle–driver), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 535 p.
2. *Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Diagnostika. Opredelenie prodol'nogo mikropofilja dorozhnoj poverhnosti i mezhdunarodnogo pokazatelya rovnosti IRI. Obshhie trebovanija i porjadok provedenija, STO MADI 02066517.1-2006* (ONE HUNDRED MADI 02066517.1-2006. Public roads. Diagnostics. Determination of the longitudinal microprofile of the road surface and the international evenness index IRI. General requirements and procedure).
3. *Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Pokrytija dorozhnye. Metody izmerenija rovnosti, GOST 33101-2014* (Public roads. Road surfaces. Methods of measurement of flatness, State Standart 33101-2014), Moscow, Standartinform, 2016.
4. International Standart ISO 8608 2016, Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data.
5. URL: <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2016/0040-21761605697S.pdf>
6. URL: http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2013_3_154.pdf
7. Sahlholm P., Gattami A., Johansson K.H., Piecewise Linear Road Grade Estimation, Sweden, Stockholm, KTH – School of Electrical Engineering, SE-100 44, 2011, 16 p.
8. Mihajlov V.G. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2018, no. 2, pp. 4–7.