DOI: 10.17117/na.2015.08.1091

Поступила (Received): 29.08.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.08.1091.pdf>

Бочкарев Н.Н. Аппаратно-программное устройство для измерения продольной ровности автомобильных дорог

Bochkarev N.N. The hardware-software device for measuring the longitudinal evenness of road

Приводится описание аппаратно-программного устройства, в котором международный индекс IRI продольной ровности автомобильных дорог рассчитывается по измеренному с использованием инерциальных модулей массиву ординат микропрофиля покрытия дороги. В отличие от толчкомера не требуется калибровка этого устройства по вертикальным перемещениям на эталонных дорожных участках

Ключевые слова: аппаратно-программное устройство, вертикальные перемещения, индекс продольной ровности, уравнение движения двухмассовой модели

A description of the hardware and software devices, in which international index IRI longitudinal evenness of road is calculated from the measured using inertial module array ordinate microprofile road surfacing. Unlike tolchkomer not require calibration of the device for vertical movement on the reference road sections

Key words: hardware and software device, vertical displacement, longitudinal evenness index, the equation of motion the two-mass model

Бочкарев Николай Николаевич

Доктор физико-математических наук, научный сотрудник

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

Bochkarev Nikolai Nikolaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Research Scientist

Institute of atmospheric optics named V.E. Zuev
Tomsk, Academician Zuev square, 1

Транспортно-эксплуатационное состояние автомобильных дорог оценивается локальными отклонениями поверхности качения колес автомобиля от геометрически идеальной поверхности. Большинство неровностей можно описать гармоническими функциями и оценить методами математической статистики [1, 2].

Прямое определение неровностей на автомобильной дороге выполняется с помощью измерительных реек, нивелиров и профилографов различных конструкций [3–8].

Косвенное определение основано на записи относительных колебаний неподрессоренных и поддрессоренных масс транспортных машин или специальных испытательных прицепов. Критерием ровности является сумма амплитуд колебаний, отнесенная к единице длины пути, обычно в м/км.

Стандартным критерием принято считать международный индекс ровности IRI (International Roughness Index) [2], который имеет аналогичный физический смысл и размерность в м/км.

Ровность через колебания воздействует на комфорт движения, дорожные издержки транспортных средств и является интегральным показателем состояния покрытия. Показатели индекса IRI обоснованы, исходя из допустимых санитарных норм воздействия вибрации на человека, находящегося в автомобиле [8].

С 2006 г. в России проводится диагностика федеральной сети дорог по показателям сцепления, прочности и продольной ровности, которая должна оцениваться по европейской методике IRI. Индекс IRI рассчитывается на основе четырех переменных величин, являющихся функцией измеряемого профиля дороги. Эти переменные отражают динамический ответ математической модели автомобиля (просчитывается кузов и одно колесо; за рубежом известна как математическая модель SQY).

Уравнения четырех переменных величин рассчитываются с использованием высотных отметок микропрофиля дороги с помощью коэффициентов, приведенных в методике. Далее рассчитывается индекс IRI, который является средней статистической переменной для отрезка измеряемой дороги. Индекс IRI оценивает ровность в диапазоне частотных характеристик от 0,033 ц/м до 0,76 ц/м в полосе длин волн неровностей от 1,3 м до 30 м, где индекс «ц» означает цикл вибраций.

Данная методика разрабатывалась за рубежом более 20 лет, и в ряде европейских стран применяется как основная. В разных странах используются различные нормативные требования к ровности категорий дорог по IRI, но единого общего норматива для различных категорий дорог пока не существует. В табл. 1 показан ряд используемых за рубежом нормативов [9].

Методы измерения IRI делятся на четыре класса исходя из применяемого оборудования и технологии проведения измерений.

В I и II класс точности входят измерения профилометрами в движении со скоростями до $V=100$ км/ч, отличающиеся по величине разбросов показаний на контрольных участках (до 5% – I класс точности, до 7% – II класс). К используемому для этого типу приборов относятся: анализатор статистического профиля TRRL, «Dipstick» (приборы для ручных измерений); инерционный измеритель ровности APL (измерение уклонов покрытия относительно базы автомобиля); информационный анализатор продольного профиля K.J LAW (регистрация вертикальных перемещений подвески с помощью акселерометров с дальнейшим расчётом по математической модели SQY); приборы, построенные на получении микропрофиля с помощью бесконтактных датчиков (в РФ к ним относятся лаборатории МАДИ, РосдорНИИ, НПО «Регион»), а так же методы ручного нивелирования дорожных участков.

В качестве базовой принята методика измерения высотных отметок микропрофиля дороги при $V=40$ или 80 км/ч и продольным шагом $Step=0,25$ м. По результатам измерений строится микропрофиль, из которого рассчитывается индекс IRI. Не все профилометры дают высотные отметки микропрофиля. Не-

которые выполняют дополнительную обработку измерений других параметров или сразу определяют индекс IRI на основе своих измерений.

Таблица 1. Используемые за рубежом нормативы к ровности дорог по индексу IRI

№ п/п	Страна использования индекса IRI	Характеристика ровности	Значение IRI, м/км
1	Бельгия, 1984 г.	Класс А. Очень хорошая ровность	До 2
		Класс В. Хорошая ровность	2÷4
		Класс С. Хорошая ровность	4÷6
		Класс D. Плохая ровность	6÷8
		Класс Е. Очень плохая ровность	более 8
		Порог вмешательства	более 6
2	Швеция, 1988 г.	Очень хорошая ровность	до 1,5
		Хорошая ровность	1,5÷2,5
		Средняя ровность	2,5÷3,5
		Удовлетворительная ровность	3,5÷4,5
		Неудовлетворительная ровность	более 4,5
3	Финляндия, 2000 г.	Автомобильные магистрали	до 1,7
		Прочие 2 полосные государственные и национальные дороги	до 1,9
		Прочие дороги общего пользования	до 2,1
4	Международный эксперимент (Мировой банк, Бразилия, 1982 г.)	Взлетно-посадочные полосы в аэропортах и высокоскоростные автомобильные дороги	0,8÷1,3
		Новые дорожные покрытия	1,3÷3,3
		Эксплуатируемые автомобильные дороги	2,3÷5,5
5	Международный эксперимент FILTER (PIARC, Нидерланды, Германия, 1998 г.)	Хорошая ровность	до 1,5
		Средняя ровность	1,5÷3,5
		Плохая ровность	более 3,5

К III классу приборов относятся: Opala-Maysmeter № 2; Caravan-NAASRA; Remorque BI; Rugosimetre BPR; установка ПКРС-2У. Принцип измерения IRI данными приборами основан на тарировке их показаний, отражающих воздействие неровностей на подвеску автомобиля, на контрольных дорожных участках по всему спектру неровностей.

В IV класс точности входит экспертная или субъективная оценка ровности дороги в соответствии с имеющейся шкалой. Данная методика даёт приблизительное представление о состоянии дороги, а так же знакомит специалистов со шкалой индексов IRI и состоянием соответствующих дорог.

В стандарт [4] вошли профилометрические установки I и II класса точности, причём все расчёты привязаны к высотным отметкам микропрофиля. Стандарт устанавливает требования к выполнению работ по мониторингу ровности проезжей части и общей диагностике дорог различного назначения и категорий на основе измерений продольной ровности поверхности дорог с помощью установок, позволяющих измерять и регистрировать ординаты про-

дольного микропрофиля проезжей части для дальнейшего вычисления значений показателей ровности, необходимых при оценке качества строительных, ремонтных работ и текущего состояния покрытий.

В ходе выполнения работ по созданию нового измерительного устройства, рассмотренного в настоящем сообщении, проанализированы все применяемые в мировой практике системы измерения по методике IRI, изучены их сильные и слабые стороны. В частности, профилометрические установки на бесконтактных датчиках отличаются сложностью создания и эксплуатации, дороговизной. Установки типа APL (Франция) мало приспособлены для наших дорог с их далеким от идеального качеством покрытия.

Толчкомеры отличаются низкой точностью измерений и сложностью методики тарировки. Руководство [7] разработано для обеспечения сопоставимости результатов при измерении ровности покрытий дорог с помощью толчкомеров, которые являются наиболее распространенными и недорогими быстродействующими средствами измерения ровности. Простота конструкции, высокая производительность при минимальных затратах объясняют их применение при строительстве, эксплуатации и диагностике дорог.

Методу толчкомера присущи недостатки, связанные с повторяемостью и сопоставимостью результатов измерений. Эти недостатки обусловлены, главным образом, техническим состоянием транспортного средства, динамикой изменения параметров его подвески и шин, а также факторами методического характера. Для уменьшения погрешности измерений и сопоставимости получаемых данных в руководстве [7] описан метод калибровки толчкомеров с использованием эталонных дорожных участков. На основании экспериментальных исследований определены калибровочные зависимости толчкомеров по методу трехметровой рейки и индексу IRI.

Из-за большого количества факторов, влияющих на результаты измерений, достоверную оценку ровности с помощью толчкомеров можно получить только при добросовестном и скрупулезном выполнении всех положений руководства [7].

В связи с отсутствием в России серийных устройств измерения индекса IRI, а так же малым количеством устройств импортного производства актуальна задача создания функционально надежного, не дорогого по стоимости и достоверного по измеряемым параметрам устройства, изготовление которого можно выполнить в кратчайшие сроки из доступной комплектации.

Для расчета индекса IRI по массиву ординат микропрофиля проезжей части дороги используется двухмассовая модель, уравнения движения которой известны [10]:

$$\begin{aligned} M\ddot{z} + B(\dot{z} - \dot{y}) + C_1(z - y) &= 0 \\ m\ddot{y} - B(\dot{z} - \dot{y}) - C_1z + (C_1 + C_2)y &= C_2q' \end{aligned} \quad (1)$$

где M – поддрессоренная масса; m – неподдрессоренная масса; C_1 – жесткость подвески; C_2 – жесткость шины; B – коэффициент вязкого трения подвески; z – вертикальные перемещения поддрессоренной массы; y – вертикаль-

ные перемещения неподрессоренной массы; q – вертикальное возмущение от поверхности проезжей части; $\dot{z} = \partial z / \partial t$ – скорость массы M ; $\dot{y} = \partial y / \partial t$, $\ddot{y} = \partial^2 y / \partial t^2$ – скорость и ускорение массы m , соответственно. При расчете индекса IRI фиксируются следующие параметры модели:

$$\frac{C_1}{M} = 63,3 \text{ с}^{-2}; \frac{C_2}{M} = 653 \text{ с}^{-2}; \frac{B}{M} = 6 \text{ с}^{-1}; \frac{m}{M} = 0,15. \quad (2)$$

Из (1) определяются величины $\dot{z}$, $\dot{y}$ и рассчитывается суммарное абсолютное перемещение массы m относительно массы M , т. е. индекс IRI.

$$IRI = \frac{3600}{TV} \int_0^T |\dot{z} - \dot{y}| dt, \quad (3)$$

где T – время движения автомобиля по участку дороги. Расстояние, на котором рассчитывается индекс IRI – $R = TV$.

В соответствии с (3) для аппаратной реализации определения индекса IRI необходимы два инерциальных модуля измерения скорости перемещения неподрессоренной и поддрессоренной $\frac{1}{4}$ части кузова автомобиля.

Показатель ровности по толчкомеру определяют также по формуле (3), только интеграл в правой части получают в результате непосредственных измерений при движении по дороге реального автомобиля. Если моделировать движение автомобиля уравнениями (1), то показатель ровности по толчкомеру зависит от четырех констант, характеризующих данный автомобиль, и скорости его движения. Индекс IRI, хотя и рассчитывается по тому же алгоритму, зависит только от профиля дороги, так как константы входящие в (1) фиксируются. Следовательно, индекс IRI, являясь логическим развитием понятия ровности по толчкомеру, свободен от его существенного недостатка – зависимости показаний от особенностей автомобиля, на котором установлен.

Вариант алгоритма программы расчета индекса IRI на языке Си представлен в стандарте [4, приложение Б].

В качестве автомобиля, на который устанавливается измерительное оборудование, можно использовать легковой автомобиль с параметрами, соответствующими условиям (2), тогда калибровки оборудования на реальных дорожных участках не требуется. Однако автомобиль с такими техническими характеристиками подобрать сложно. Еще сложнее поддерживать эти характеристики в рамках условий (2) в течение длительного времени.

При движении аппаратно-программного устройства, установленного на автомобиле-лаборатории, система рама-инерциальный модуль играет роль искусственного горизонта, вертикальные перемещения колеса автомобиля относительно которого фиксируются инерциальным модулем, установленным на оси колеса, т. е. на неподрессоренной массе. Измеренный массив данных микропрофиля обрабатывается по алгоритму, приведенному в [4]. Искусственный горизонт создается усреднением скользящего среднего [11, 12]:

$$\bar{\dot{z}}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{z}_{k-i}, \quad (4)$$

где $\bar{\dot{z}}_k$ – скользящее среднее в точке k ; n – количество точек выборки для интервала сглаживания; $\dot{z}_{k-i}$ – скорость массы M в точке $k-i$.

Для ускорения процесса расчета скользящего среднего, т. е. устранения процесса регулярного суммирования всех значений на интервале сглаживания, используется рекуррентное соотношение [12]:

$$\bar{\dot{z}}_k = \bar{\dot{z}}_{k-1} - \frac{\dot{z}_{k-n}}{n} + \frac{\dot{z}_k}{n}, \quad (5)$$

где $\bar{\dot{z}}_{k-1}$ – предыдущее значение скользящего среднего; $\dot{z}_{k-n}$ – самое раннее значение скорости массы M , используемое для вычисления $\bar{\dot{z}}_{k-1}$; $\dot{z}_k$ – текущее последнее значение в выборке для интервала сглаживания.

Благодаря параллельной работе двух инерциальных модулей и алгоритму программы, оптимизирующей расчет относительного перемещения модулей с учетом интервала усреднения вертикальных перемещений модуля на поддрессоренной массе, необходимость калибровки аппаратно-программного устройства по вертикальным перемещениям на эталонных дорожных участках отпадает. При этом расчетная погрешность остается не более $\pm 0,2 \text{IRI}$ от истинного значения, обусловленная лишь погрешностью в жесткости шины. Давление воздуха в шинах колес автомобиля, на котором установлена измерительная установка, должно быть в пределах $170 \pm 20 \text{ кПа}$ [3].

Рис. 1. Аппаратно-программное устройство:
 1 – инерциальные модули; 2 – блок электроники;
 3 – график индекса IRI; 4 – график скорости автомобиля

Одноосевые акселерометры устанавливались внутри инерциальных модулей, закрепляемых на неподрессоренной (ось колеса) и поддрессоренной (рама) массе $\frac{1}{4}$ части кузова легкового автомобиля. На рис. 1 показано оборудование демонтированного аппаратно-программного устройства.

Одно из главных преимуществ аппаратно-программного устройства перед измерителями типа толчкомеров – калибровка оборудования по вертикальным перемещениям на эталонных дорожных участках не требуется. Абсолютная калибровка выполняется на сертифицированном вибростенде только для инерциальных модулей, в которых установлены акселерометры.

В качестве датчика скорости, в данном примере, использовался стандартный от автомобиля «Волга» – № 344.3843, который вырабатывает частотно-импульсный сигнал: 10 импульсов на один оборот колеса.

Электропитание аппаратно-программного устройства выполнено от компьютера по USB интерфейсу.

Вывод информации реализован в трех вариантах: первый – массив ординат микропрофиля поверхности дороги в метрах; второй – индекс IRI в м/км; третий – аналогично измерениям толчкомера в м/км. Для второго и третьего вариантов указывается величина R в диапазоне $3 \div 1000$ м.

Неровности дорожного покрытия условно подразделяют на три группы в зависимости от их протяженности – длины волны λ : $\lambda \leq 5$ м – короткие; $5 \text{ м} < \lambda < 25$ м – средние; $25 \text{ м} < \lambda < 60$ м – длинные. Для целей определения спектральной плотности коротких и средних λ , т. е. $\lambda < 25$ м, при скорости движения автомобиля $V > 50$ км/ч, линейный частотный диапазон АПУ должен начинаться с частоты не более $f_n = 0,55$ Гц. Линейный частотный диапазон изготовленного аппаратно-программного устройства – $0,5 \div 30$ Гц.

Размер выборки для интервала сглаживания при расчете скользящего среднего выбран в программе исходя из условия:

$$n = \frac{V}{3600 \cdot f_n \cdot \text{Step}} < \frac{25}{\text{Step}}. \quad (6)$$

Аналого-цифровой преобразователь аппаратно-программного устройства 8-ми канальный 12-ти разрядный позволяет подключать одновременно до трех пар инерциальных модулей и адаптирован через оптронную развязку для подключения различных датчиков скорости автомобиля. При $V = 80$ км/ч и $\text{Step} = 0,18$ м, минимальная частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя должна составлять не менее 246 Гц. Минимальная частота дискретизации в аппаратно-программном устройстве составляет 300 Гц на канал, а максимальная – 40 кГц.

На рис. 2 показан интерфейс программного обеспечения аппаратно-программного устройства при выводе основных результатов обработки данных.

Когда оборудование аппаратно-программного устройства функционирует как толчкомер, т. е. для формирования результатов расчета используется непосредственно формула (3), то не требуется абсолютная калибровка оборудования на эталонных участках с предварительно измеренным микропрофилем дорожной поверхности другими методами, предлагаемыми, например, в [3, 4, 7].

Процедура такой калибровки с использованием, например, трехметровой линейки трудоемка и продолжительна по времени. Для калибровки можно использовать массивы данных о микропрофиле, измеренные аппаратно-программным устройством, и результаты расчетов индекса IRI.

Рис. 2. Графическое представление результатов расчета: 1 – пиктограмма сохранения файла; 2 – R , м; 3 – $Step$, м; 4 – расстояние, пройденное автомобилем за все время измерения, м; 5 – график V , км/ч; 6 – график индекса IRI; 7 – маркеры уточнения результата; 8 – уточненный результат в точке; 9 – директория и название обработанного файла; 10 – дополнительное меню графических настроек

Разработанное и изготовленное оборудование устанавливалось на три типа легковых автомобилей и прошло испытания в летне-осенний период на дорогах Томской и Кемеровской области.

В испытаниях была обнаружена дополнительная измерительная возможность аппаратно-программного устройства: при движении автомобиля по мостам в спектральной плотности виброскорости появлялись частоты свободных колебаний пролетных строений мостов, на что впервые было указано в [13]. Один из примеров обнаруженного в испытаниях эффекта показан на рис. 3, 4.

Частота свободных колебаний $2,52 \pm 0,1$ Гц соответствует сталежелезобетонному пролетному строению длиной ~ 40 м (рис. 4, б). При этом спектральная плотность виброскорости, характеризующая неровности дорожного покрытия, имела максимум на частотах выше ~ 10 Гц (рис. 4, а). Интервалы времени $12,16 \div 12,5$ с и $16,6 \div 17$ с соответствуют движению колеса с инерциальными модулями по деформационным швам пролетного строения моста. Интервал времени $6 \div 12,16$ с соответствует движению автомобиля до пролетного

строения моста. Интервал $12,5 \div 16,5$ с – движение автомобиля по пролетному строению моста.

Рис. 3. Временные записи виброскорости: а – поддрессоренный инерциальный модуль; б – неподдрессоренный инерциальный модуль

Рис. 4. Частотные спектры виброскорости для интервалов времени на рис. 3, б: а – $6 \div 12,16$ с; б – $12,5 \div 16,6$ с

Частота свободных колебаний пролетного строения в спектре на рис. 4, б уверенно выявляется благодаря наличию в аппаратно-программном устройстве двух инерциальных модулей, один из которых регистрирует микропрофиль дорожной поверхности, а второй на поддрессоренной массе – вертикальные перемещения рамы автомобиля.

Возможность измерения свободной частоты колебаний пролетных строений автодорожных мостов с использованием аппаратно-программного устройства, измеряющего индекс IRI, открывает следующие перспективы.

Первое: измерение свободной частоты колебаний пролетных строений мостов, выполняется в комплексе с работами по измерению продольной ровности дорог. Второе: автомобиль-лаборатория, на котором установлен измеритель индекса IRI, не останавливается на пролетном строении, а продолжает движение по дороге. Таким образом, одна из важнейших динамических характеристик – свободная частота колебаний всех пролетных строений автодорожных мостов, встречающихся на пути автомобиля-лаборатории, будет измерена дополнительно к измерениям продольной ровности дорожного покрытия. Как известно, индекс IRI измеряется при непрерывном движении на участках дорог протяженностью от нескольких до сотен километров.

Таким образом, разработанное и изготовленное аппаратно-программное устройство позволяет определять международный индекс IRI продольной ровности дорог. Аппаратно-программное устройство изготовлено из доступных и недорогих комплектующих и может быть тиражировано в короткие сроки. Для сертификации комплекса не требуется выполнять трудоемкую и длительную калибровку на эталонных дорожных участках с использованием других методик, предлагаемых в [3, 4]. В алгоритме программного обеспечения аппаратно-программного устройства использованы хорошо известные математические методы, проверенные в работе других устройств.

Измерения, выполняемые устройством в процессе традиционных испытаний пролетных строений мостов, позволяют анализировать взаимосвязь данных о дефектах проезжей части, массивах ординат микропрофиля проезжей части дороги и результатов измерения динамических характеристик пролетных строений мостов.

Список используемых источников:

1. Sayers M., Segel L., Wong J. Y., Law E. H., Hrovat D. ed. *Characteristic Power Spectral Density Functions for Vertical and Roll Components of Road Roughness // Symposium on Simulation and Control of Ground Vehicles and Transportation Systems. Proceedings, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1986. P. 113–139.*
2. *The International Road Roughness Experiment. Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements // The World Bank. USA. Washington. 1986. 453 p.*
3. ГОСТ Р 30412-96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий. 10 с.
4. СТО МАДИ 02066517.1-2006. Дороги автомобильные общего пользования. Диагностика. Определение микропрофиля дорожной поверхности и международного показателя ровности IRI. Общие требования и порядок проведения. М: МАДИ, 2006. 46 с.
5. Road Transport Research. *Road surface characteristics: their interaction and their optimization: Report Prepared By An OECD Scientific Expert Group. Organisation For Economic Co-Operation And Development. Paris, 1984. 207 p.*
6. Sayers M. W., Gillespie T. D., Paterson W. D. O. // *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements // The World Bank. USA. Washington. 1986. 98 p.*
7. Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкометом. М: Росавтодор, 2002. 14 с.
8. ИСО 86086:1995. Вибрация механическая. Профили дорожных покрытий. Представление результатов измерений.

9. Бочкарев Н. Н. Аппаратно-программный комплекс для определения индекса IRI [Электронный ресурс] // Сборник трудов научной конференции «XXVII сессия Российского акустического общества и сессия Научного совета РАН по акустике». 12 с.
10. Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С., Гольдин Г.В., Додонов Б.М., Жигарев В.П., Кольцов В.И., Юрик В.С., Яковлев Е.И. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель. М.: Машиностроение, 1976.
11. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.
12. Бочкарев Н.Н. Устройство для измерения продольной ровности автомобильных дорог // Приборы. 2015. № 5. С. 19–25.
13. Бочкарев Н.Н. Аппаратно-программный комплекс для определения международного индекса продольной ровности автомобильных дорог // Наука и образование в жизни современного общества. Ч. 10. Тамбов: . 2013. С. 23–24.

© 2015, Бочкарев Н.Н.

Аппаратно-программное устройство для
измерения продольной ровности автомобильных
дорог

© 2015, Bochkarev N.N.

The hardware-software device for measuring the
longitudinal evenness of road