УДК 625.7

О МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПРОФИЛОМЕТРОВ

Канд. техн. наук **Н.А. Лушников**,
канд. техн. наук **П.А. Лушников**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
Конт. информация: lab@rosdornii.ru

В статье рассмотрены некоторые проблемные вопросы, касающиеся выбора параметров участков автомобильных дорог, используемых для оценки точности профилометров.

Ключевые слова: *эталонный участок, нивелирование, микропрофиль, профилометр, спектральная плотность, амплитудно-частотная характеристика.*

Для измерения продольной ровности автомобильных дорог применяют специальные приборы – *профилометры.* Оценка точности профилометров регламентируется нормативными документами **[1, 2]**, некоторые практические аспекты, связанные с этими документами, приведены в **[3-5]**. В данной статье рассмотрены вопросы, касающиеся методики такой оценки, в частности выбора основных параметров так называемых *эталонных участков* автомобильной дороги, используемых для проверки профилометров.

На этих участках, путем нивелирования с постоянным шагом, получают вертикальные координаты эталонного продольного профиля поверхности в дискретном виде:

$$q = \{q_i\},\ i = 1,\ldots m \quad , \qquad \textbf{(1)}$$

где

m – число точек нивелирования.

Так как нивелирование представляет собой весьма трудоемкий процесс, желательно выбирать участки, с одной стороны, обеспечивающие оценку профилометров, а с другой – имеющие минимальную длину и максимальный шаг нивелирования. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Для оценки показателей ровности вполне достаточно рассматривать неровности из некоторого ограниченного диапазона длин волн (λ_1, λ_2):

$$0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \infty \quad . \qquad \textbf{(2)}$$

Это возможно, поскольку достаточно короткие и длинные неровности не оказывают влияния на колебания автомобиля, а поэтому и на показатели ровности. Практически переход в конечный диапазон **(2)** осуществляют с помощью процедуры фильтрации исходного продольного профиля; в результате получают *микропрофиль*.

Поскольку дорожная частота $n = 1/\lambda$, то диапазон частот в этом случае также будет ограничен:

$$0 < n_1 < n_2 < \infty \quad .$$

Разбивая диапазон (n_1, n_2) на интервалы Δn, можно для каждого интервала ввести понятие среднего значения спектральной плотности (спектральной плотности мощности **[6, 7]**) в интервале частот Δn, которое выражается формулой:

$$G(\Delta n) = \frac{1}{\Delta n \cdot L} \cdot \int_{\Delta n} \left|\hat{q}(n)\right|^2 dn \quad , \qquad \textbf{(3)}$$

где

$n = 1/\lambda$ – дорожная частота (величина, обратная длине волны неровности λ), $м^{-1}$;

$\hat{q}$ – преобразование Фурье **[6]** микропрофиля q, определенного на отрезке $[0, L]$.

Модуль преобразования Фурье $|\hat{q}|$ характеризует величину амплитуды неровности, поэтому $G(\Delta n)$ показывает интегральное среднее квадрата амплитуды неровности в диапазоне частот Δn.

В **[2]** предлагается для оценки профилометра использовать его амплитудно-частотную характеристику (*АЧХ*), определяемую следующим образом:

$$A = \sqrt{G / G_n} \quad , \qquad \textbf{(4)}$$

где

G – спектральная плотность микропрофиля, полученная с помощью профилометра;

G_n – спектральная плотность микропрофиля, полученная с помощью эталонного прибора (нивелира).

АЧХ является характеристикой профилометра, т.е. теоретически (без учета погрешностей) не зависит от выбора эталонного участка. Чем ближе величина АЧХ к единице, тем выше точность профилометра.

Условие **(2)** позволяет нам воспользоваться теоремой Котельникова **[6]**, в соответствии с которой постоянный шаг Δq профиля **(1)** связан с минимальной длиной волны неровности соотношением:

$$\Delta q < h_{max} = \lambda_1/2 \ , \qquad \textbf{(5)}$$

т.е. шаг определяется длиной наиболее коротких неровностей (минимальной длиной волны λ_1).

Поэтому, когда речь идет об оценке спектральной плотности или *АЧХ*, целесообразно разбить диапазон длин волн на два (или более) интервала: один – для коротковолновых неровностей, а другой – для остальных (средне- и длинноволновых). Далее для каждого из них подобрать свой участок: для первого (где значение λ небольшое) с меньшим шагом, а для второго - с большим. Однако из-за возникающих при определении АЧХ погрешностей шаг приходится назначать с некоторым запасом.

Минимально необходимая длина участка L_{min} определяется правой границей диапазона длин волн **(2)**, т.е. величиной максимальной длины волны $\lambda = \lambda_2$. Положим:

$$L_{min} = 2 * \lambda_2 \ . \qquad \textbf{(6)}$$

Данные о шаге измерения и длине эталонного участка, принятых в **[1]** и **[2]** для различных диапазонов длин волн неровностей приведены в **табл. 1.**

Таблица 1

	ГОСТ-Р 56925-2016		***ГОСТ 33101-2014***		
Диапазон длин волн, м	0,5-3	3-60	0,7-1,4	1,4-22,6	22,6-90,5
Шаг измерения h, м	0,05	0,25	0,125	0,25	0,25
Длина участка L, м	20	300	50	200	500

В **табл. 2** приведены значения условных коэффициентов запаса для шага измерений $K_h = h/h_{max}$ и для длины участка $K_L = L/L_{min}$, где h, L указаны в **табл. 1**, а значения h_{max}, L_{min} определяются выражениями **(5)**, **(6)**.

Таблица 2

	ГОСТ-Р 56925-2016		*ГОСТ 33101-2014*		
Диапазон длин волн, м	0,5-3	3-60	0,7-1,4	1,4-22,6	22,6-90,5
Коэффициент K_h	5	6	2,8	2,8	45,2
Коэффициент K_L	3,3	2,5	17,8	4,4	5,5

На показатель IRI влияют главным образом неровности из диапазона длин волн $0,5 < \lambda < 20$, поэтому для его оценки, например, на стометровых отрезках, необходимо выбирать участки с достаточно мелким шагом и относительно большой длиной (например, h = 0,25 м и L = 300-500 м **[1]**; в **[2]** прямая оценка показателя IRI не рассматривается).

Как видно из приведенных таблиц, принятые значения h и L в рассматриваемых нормативных документах существенно различаются (также как и коэффициенты запаса).

Рассмотрим следующий пример. На **рис. 1** приведен график АЧХ профилометра, полученный путем сравнения спектральных плотностей эталонного и измеренного микропрофилей на участке длиной 500 м (диапазон длин волн: 0,6 м – 60 м).

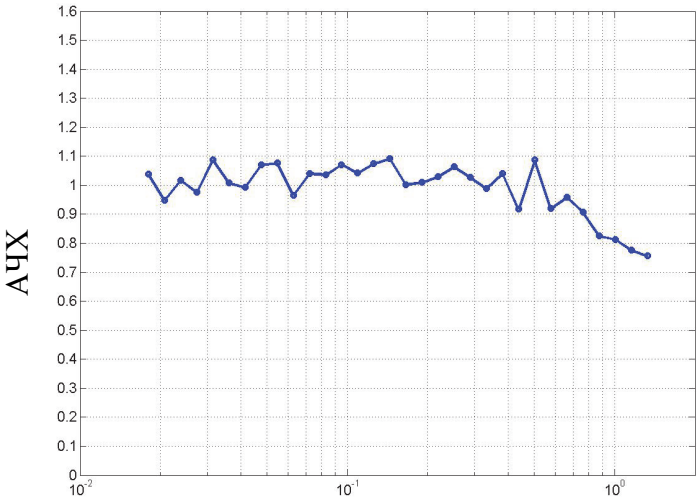

Рис. 1. График амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) профилометра:
диапазон длин волн: 0,6 м - 60 м;
$n = 1/\lambda$ – дорожная частота; λ – длина волны неровности

Основные сложности с определением АЧХ обычно возникают в коротковолновом диапазоне длин волн неровностей 0,5 < λ < 3 м, в данном случае, как видно из **рис. 1**, в интервале 0,6 < λ < 1,5 м. Это обстоятельство можно объяснить следующим образом.

Пусть A – АЧХ профилометра, полученная путем измерений на эталонном участке. Оценим величину $|A-1|$:

$$|A-1| = \left|\sqrt{\frac{G}{G_n}} - 1\right| = \frac{\left|\sqrt{G} - \sqrt{G_n}\right|}{\sqrt{G_n}} \le \sqrt{\frac{|G - G_n|}{G_n}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{G_n}} \quad , \qquad \textbf{(7)}$$

где

G – спектральная плотность микропрофиля, полученная с помощью профилометра;

G_n – спектральная плотность микропрофиля, полученная путем нивелирования.

При уменьшении длины волны неровности ее амплитуда достаточно быстро убывает, а погрешность определения спектральной плотности не уменьшается. Поэтому, когда погрешность ε_n становится сравнимой с величиной G_n (пропорциональной среднему квадрату амплитуды), значение правой части **(7)**, т.е. отклонение *АЧХ* от единицы, становится достаточно большим. При этом:

$$\varepsilon_n = \alpha + \beta \quad ,$$

где

α – погрешность измерений микропрофиля (зависит от измерительного оборудования);

β – погрешность вычислений АЧХ.

Для увеличения точности результатов можно пойти путем уменьшения величины шага нивелирования (и измерения). Уровень погрешности вычислений β при этом уменьшается, что дает возможность более точного определения *АЧХ* и продвинуться в частотном диапазоне в область более высоких частот (или более коротких волн). Но это справедливо, если только погрешность измерений α при этом не увеличивается, т.е. при выполнении следующего условия:

при уменьшении шага средний уровень точности измерений сохраняется. **(8)**

Рассмотрим подробнее, как можно реализовать этот способ на практике.

Для нивелирования эталонных участков в **[1]** рекомендуется использовать нивелирную рейку с подпятником в форме круга диаметром 0,1 м, поэтому, ввиду сглаживающего эффекта, шаг измерений снизу

ограничен величиной, сопоставимой с диаметром. В случае **[1]** это, по существу, отражено в **табл. 1** (h = 0,125 м = 1,25*h). Если попытаться уменьшить диаметр подпятника, то точность измерений также уменьшится, ввиду влияния шероховатости покрытия, и условие **(8)** не будет выполнено. Поэтому практическая реализация рассмотренного способа имеет некоторые ограничения.

В **[2]** предлагается уменьшить величину шага до величины 0,05 м, но рекомендации по размеру подпятника отсутствуют, и выбор его, ввиду изложенных выше соображений, представляется проблематичным (по крайней мере, для достаточно шероховатых покрытий). Поэтому предлагаемая величина шага выглядит не вполне обоснованной.

ВЫВОДЫ

1. Рекомендации по выбору эталонных участков для проверки точности профилометров, приведенные в нормативных документах **[1, 2]** имеют существенные расхождения.
2. Для выбора оптимальных значений длин участков и шага нивелирования (и измерения) участков требуются дополнительные экспериментальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 33101-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения ровности. – М: Стандартинформ, 2014. – 36 с.*
2. *ГОСТ Р 56925-2016. Методы измерения неровностей оснований и покрытий. – М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.*
3. *Лушников Н.А. Особенности измерения ровности дорожных покрытий профилометрами / Н.А. Лушников, П.А. Лушников, П.И. Александренко // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2015. – Вып. 34/2. – С. 157-164.*
4. *Лушников Н.А. О точности измерений ровности дорожных покрытий профилометрами / Н.А. Лушников, П.А. Лушников // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2016. – Вып. 35/1. – С. 112-124.*
5. *Лушников Н.А. К вопросу об оценке продольной ровности покрытий автомобильных дорог / Н.А. Лушников, П.А. Лушников // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2010. – Вып. 23/1. – С. 97-104.*
6. *Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьева. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 386 с.*
7. *Пугачев В.С. Теория случайных функций / В.С. Пугачев – М.: Физматгиз, 1962. – 884 с.*

L I T E R A T U R A

1. *GOST 33101-2014. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovaniya. Dorozhnye pokrytiya. Metody izmereniya rovnosti. – M.: Standartinform, 2014. – 36 s.*
2. *GOST R 56925-2016. Metody izmereniya nerovnostej osnovanij i pokrytij. – M.: Standartinform, 2016. – 14 s.*
3. *Lushnikov N.A. Osobennosti izmereniya rovnosti dorozhnyh pokrytij profilometrami / N.A. Lushnikov, P.A. Lushnikov, P.I. Aleksandrenko // DOROGI I MOSTY. – 2015. – Vyp. 34/2. – S. 157-164.*
4. *Lushnikov N.A. O tochnosti izmerenij rovnosti dorozhnyh pokrytij profilometrami / N.A. Lushnikov, P.A. Lushnikov // DOROGI I MOSTY. – 2016. – Vyp. 35/1. – S. 112-124.*
5. *Lushnikov N.A. K voprosu ob ocenke prodolnoj rovnosti pokrytij avtomobilnyh dorog / N.A. Lushnikov, P.A. Lushnikov // DOROGI I MOSTY. – 2010. – Vyp. 23/1. – S. 97-104.*
6. *Solonina A.I. Osnovy cifrovoj obrabotki signalov / A.I. Solonina, D.A. Ulahovich, S.M. Arbuzov, E.B. Soloveva. – SPb: BHV-Peterburg, 2005. – 386 s.*
7. *Pugachev V.S. Teoriya sluchajnyh funkcij / Pugachev V.S. – M.: Fizmatgiz, 1962. – 884 s.*

ABOUT THE METHOD FOR ESTIMATING THE ACCURACY OF PROFILOMETERS

Ph. D. (Tech.) ***N.A. Lushnikov****,*
Ph. D. (Tech.) ***P.A. Lushnikov***
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information: lab@rosdornii.ru

The article deals with some outstanding issues concerning the choice of parameters of road sections used for estimating the accuracy of profilometers.

Key words: *reference area, leveling, microprofile, profilometer, spectral density, frequency-response characteristic.*

Рецензент: д-р техн. наук О.А. Красиков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 20.02.2019 г.