

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРОЦЕСС

НОРМИРОВАНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ УСТРОЙСТВА МАКРОШЕРОХОВАТЫХ ДОРОЖНЫХ И МОСТОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Предлагается дополнительно использовать параметры разнорельефности активных выступов и разноточности впадин микрошероховатости и их знаменитие. Дополнительно к методическому обеспечению государственного стандарта ГОСТ 2789-73 предлагается использовать способ оценки среднеквадратического отклонения разнорельефности макрошероховатости.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксплуатационные качества дорожных и мостовых покрытий (ездового полотна мостовых сооружений) во многом зависят от свойств макрошероховатости поверхности как важнейшего показателя ее состояния, важнейшими физико-техническими параметрами которого являются коэффициент сцепления, трения покоя (срыва), скольжения, верчения, качения.

Степень макрошероховатости покрытия является ключевым фактором свойств, влияющим на триботехнические характеристики. С увеличением макрошероховатости покрытия возрастают коэффициенты сцепления и сопротивления движению. Анализируя динамику изменения параметров шероховатости в процессе эксплуатации готового изделия, можно устанавливать характеристики износа и долговечности покрытия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Между тем, помимо задачи оценки такого технико-эксплуатационного показателя, как коэффициент сцепления, стоит актуальная задача проверки соответствия качества исполнения технологических регламентов при выполнении дорожных работ на основе сравнения с проектными показателями и требованиями безопасности проектных показателей (вероятностно-статистических характеристик), как это указано в ВСН 38-90. Технические указания по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью.

К вероятностно-статистическим характеристикам обычно относят среднее, текущее среднее, среднее квадратическое отклонение, дисперсию, коэффициент вариации, показатели автокорреляции. На практике большое распространение получили контрольные карты.

Однако существующие методы применения контрольных карт показывают только степень отличия управляемого технологического процесса от неуправляемого.

Например, они могут визуализировать и оценить направление и скорость тренда текущего среднего. Оценить эффективность управления как минимизацию доли объясненной дисперсии (собственно случайной составляющей числового ряда результатов) управляемого технологического процесса они не могут.

Как известно, шероховатость поверхности есть геометрическая совокупность неровностей относительно базовой плоскости покрытия. Параметры, используемые для оценки степени шероховатости покрытий, определяются по ГОСТ 2789-73 [1]. Шероховатость образовавшейся поверхности также может быть определена с помощью его более ранних редакций 1945 и 1959 годов [2]. Следует обратить внимание на основной способ определения параметров шероховатости, используемый в технологии машиностроения [3]. В нем измерение шероховатости производится контактным способом при помощи профилометра, игла которого с заданным радиусом закругления движется по поверхности покрытия с постоянной скоростью. Количественное значение средних квадратических отклонений определяется по шкале электроизмерительного прибора.

Эта особенность способа основана на положениях ГОСТ 2789-45 (использование средних квадратических отклонений для точек профиля), следует заметить, что диаметр закругления указан в 5 раз (15 мкм вместо 3 мкм ширины рисок) большим требуемого по условиям измерения. Фактически закругление иглы огибает шероховатую поверхность по высотам выступов. Это позволило при измерении шероховатости определять величину, устойчиво коррелирующую с изменением параметров трения (покоя, качения, скольжения, верчения, сцепления, сопротивления движению).

Простейшим параметром, характеризующим качество шероховатой поверхностной обработки (шероховатости поверхности), является наибольшая высота выступа H_{\max} , представляющая собой расстояние между высшей

и низшей точками профиля выбранного участка поверхности. Однако этот показатель считается нехарактерным из-за значительного искажения геометрии поверхности отдельными глубокими рисками. Поэтому уже с 1945 года использовался ГОСТ 2789-45, в котором в качестве показателя чистоты (шероховатости) поверхности применялось среднее квадратичное отклонение ее неровностей. Следует еще раз отметить, что метрологическая база профилометров фактически привязана к ГОСТ 2789-45 еще 1945 года – к измерению статистического инварианта как среднеквадратического отклонения.

С 1959 года в СССР действовала стандартная оценка шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-59. Для оценки геометрии поверхности были установлены два параметра: среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) – среднее значение расстояний точек измеряемого профиля от его средней линии и высота неровностей (R_z) – среднее расстояние между находившимися в пределах базовой длины пятью высшими и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии.

ГОСТ 2789-73 [1] был введен взамен ГОСТ 2789-59, в мае 1980 года было введено Изменение №1. Стандарт распространяется на шероховатость поверхности независимо от материала и способов изготовления или получения поверхности.

В качестве параметров шероховатости выбираются среднее арифметическое отклонение профиля, высота неровностей по десяти точкам, наибольшая высота профиля, средний шаг неровностей, средний шаг местных выступов профиля, относительная опорная длина профиля.

Однако увеличение конкретно высоты (средней или максимальной) неровностей макрошероховатости дорожного или мостового покрытия не приведет к изменению условий, которые вызовут изменение измеряемых параметров трения. Встает задача поиска такого геометрического параметра шероховатой поверхности, изменение которого будет существенно более коррелироваться с изменением показателей триботехники. При назначении параметров шероховатости необходимо учитывать, что на изменение коэффициента сцепления влияет не только изменение средней высоты выступов и средней глубины впадин шероховатостей, но и изменение разброса (диапазона или статистического распределения) высот выступов. Данный подход соответствует методам оценки риска, применение которых устанавливается ГОСТ Р 58137-2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла».

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для оценки типа макрошероховатости дорожных и мостовых покрытий в практических целях достаточно определять следующие основные характеристики шероховатых структур: среднюю глубину впадин (высоту выступов), средний шаг шероховатости, плотность шероховатости, а также дополнительно раздельно разброс (дисперсию) высот активных контактирующих выступов и впадин (разноглубинность и разновысотность).

В ряде случаев шероховатость поверхности изделия может характеризоваться глубокими рисками (трещинами), профиль поверхности содержит высокий уровень случайной составляющей. При определении площади поверхности контакта целесообразно использовать метод статического моделирования. Практически временной ряд складывается из четырех составляющих: кусочно-линейного тренда (систематической составляющей), периодической составляющей и колебаний относительно тренда с большей или меньшей регулярностью (коррелированные составляющие), собственно случайной составляющей. Обычно анализируются графики профилограммы и распределение количества вершин выступов шероховатости по высоте. Под вершиной идентифицируется фрагмент профиля с вершиной, возвышающейся по отношению к базовой линии (к основанию).

Стандартная процедура обработки результатов измерения в виде числовых рядов предполагает автоматическое исключение случайных выбросов, построение диаграмм и оценку параметров распределений, проверку статистических гипотез, оценку стационарности параметров, определение среднего арифметического, дисперсии, автокорреляционной функции, спектральной плотности, выделение долей детерминированной, коррелированной и собственно случайной составляющих. Кроме того, определяется контур плавных границ полосы рассеивания экспериментальных точек.

Проводится выбор вида математической модели для аппроксимирующих функций, строятся частные и обобщенные математические модели, проводится проверка их адекватности. Определяется доля объясненной дисперсии для моделей и выбирается лучшая из них [3]. Допустимо полагать, что поверхность выделенного элемента макрошероховатой поверхности представляется в виде модели последовательно расположенных элементарных профилей, которые имеют вид плоских кривых в вертикальном поперечном сечении. Их огибающая учитывает разновысотность выступов.

В условиях отсутствия воспроизводимой (кроме центра Земли) базы измерений перспективно использование статистических инвариантов, к которым относится среднее квадратическое отклонение (дисперсия) разброса активных контактирующих выступов и впадин макрошероховатости.

В части применения контрольных карт управляемых технологических процессов разработаны новые вычисляемые параметры для оценки качества геометрии макрошероховатости: знакочередований и числа последовательных повторений знаков высот активных выступов макрошероховатости покрытия.

Учет только максимального числа одинаковых знаков для ряда сочетаний знаков не всегда является оптимальным по критерию использования получаемой информации и не может обеспечить достижения цели контроля качества. Во многих случаях более приемлемым представляется введение числа знакочередований в сочетании знаков скользящей выборки, а также коррелированность последовательности знаков.

Данный параметр близок по своей статистической природе к контрольным картам, применяемым в системах менеджмента качества.

Например, примем достаточным для задач диагностирования объем скользящей выборки равным четырем, из-за того что сочетания знаков соответствуют основным состояниям коррелированности процесса (оценка нормированного коэффициента корреляции равна -1; -0,5; 0,5; +1). Если рассмотреть совокупность случайных вариантов положительных и отрицательных знаков отклонений высот активных выступов шероховатости от любой условной (сигнальной) границы, например средней линии высот активных выступов, то с помощью сочетания знаков можно определить максимальное количество одинаковых знаков и количество знакопеременований S_{n-1} . При этом в рассматриваемой выборке из четырех знаков эти параметры различны: $S_{n-1} = 0, \dots, 3$.

Параметры всех возможных схем чередований знаков отклонений в выборке из четырех знаков, а также соответствующие им значения коэффициентов α_n приведены в таблице 1. Оценка нормированного коэффициента корреляции может вычисляться по нескольким предыдущим знакам отклонения высоты активных выступов от средней линии согласно этой таблице 1.

Параметр учитывающий количество знакопеременований, является более информативным, чем максимальное число одинаковых знаков. Из шести возможных схем чередований знаков в выборке из четырех знаков (таблица 1) в трех из них: в схемах с S-, V- и И- образными чередованиями знаков для одного и того же числа одинаковых знаков $M = 2$, количество знакопеременований изменяется от одного до трех. В качестве критерия адаптации был выбран нормированный коэффициент корреляции соседних высот активных выступов макрошероховатости. Графическое обобщение сочетаний знаков высот активных выступов макрошероховатости приведено в таблице 2.

Аналогично можно продолжить рассмотрение сочетаний знаков и для выборки из пяти и более знаков выступов активных выступов макрошероховатости.

Учет информации о знакопеременованиях знаков высот активных выступов позволяет для декоррелированной выборки определять площадки сцепления, а для коррелированной – площадки скольжения и переходные состояния [4].

Критерий диагностирования или качества устройства шероховатого покрытия будет определяться отсутствием корреляции в последовательности знаков, когда случайная последовательность знаков будет декоррелирована. Оценка коэффициента корреляции соседних знаков проводится с помощью корреляции типа «знак-знак» [6]:

$$\hat{\rho}_{X_{n-1}^*} (1) = \cos \pi \frac{S_{n-1}}{m - 1}, \quad (1)$$

где m – размерность скользящей выборки (не меньше двух), S_{n-1} – число знакопеременований.

Формализуем зависимость для N :

$$S_{n-1} = 1,5 - 0,5 \cdot \sum_{l=n-3}^{n-1} (\text{sign}X_l^* \cdot \text{sign}X_{l-1}^*), \quad (2)$$

где N – объем скользящей выборки, S_{n-1} – число знакопеременований в скользящей выборке, n – номер текущего цикла измерения.

Аналогично можно продолжить рассмотрение сочетаний знаков и для выборки из пяти и более знаков выступов активных выступов шероховатости. Могут быть использованы выражения для числа знакопеременований и корректирующего приращения для разных объемов (3–5) текущей выборки, ранее разработанные В.В. Ермолаевой и А.В. Чвановым:

Таблица 1. Оценка нормированного коэффициента корреляции для различных сочетаний знаков (выборки из четырех знаков)

№ схемы	Графическое представление	Наименование схемы	Число знакопеременований	Число одинаковых знаков	Оценка коэффициента корреляции
1		«-» образная	0	4	1,0
2		«Г» образная	1	3	0,5
3		«S» образная	1	2	0,5
4		«v» образная	2	3	-0,5
5		«v» образная	2	2	-0,5
6		«и» образная	3	2	-1

Таблица 2. Типовые сочетания знаков для различных выборок

Два выступа	$\frac{\triangle \triangle}{\quad}$	$\frac{\triangle}{\quad \triangle}$				
Три выступа	$\frac{\triangle \triangle \triangle}{\quad}$	$\frac{\triangle \triangle}{\quad \triangle}$	$\frac{\triangle \triangle}{\quad \triangle}$	$\frac{\triangle}{\quad \triangle \triangle}$		
Четыре выступа	$\frac{\triangle \triangle \triangle \triangle}{\quad}$	$\frac{\triangle \triangle \triangle}{\quad \triangle}$	$\frac{\triangle \triangle}{\quad \triangle \triangle}$	$\frac{\triangle \triangle}{\quad \triangle \triangle}$	$\frac{\triangle \triangle \triangle}{\quad \triangle}$	$\frac{\triangle}{\quad \triangle \triangle \triangle}$
Статистическая взаимосвязь	Нет чередования	Есть корреляция	Декоррелированность	Есть корреляция	Есть корреляция	Есть корреляция

$$S_{n-1} = -0,5 + \frac{N}{2} - 0,5 \sum_{i=n-(N-1)}^{n-1} \text{sign} X_i \cdot \text{sign} X_{i-1}, \quad (3)$$

где N – объем скользящей выборки, S_{n-1} – число знако-чередований в скользящей выборке.

Авторами предлагается использование нового параметра – числа знако-чередований выступов или впадин шероховатости относительно их средних линий (как оценки их автокорреляции). Учет информации о знако-чередовании позволяет оценить декорреляцию – достижение требуемого качества геометрии макрошероховатой поверхности [4].

Проведено комбинаторное моделирование различных объемов текущих выборок для их визуального представления и оценки их статистических параметров декоррелированности. Выборка представляет собой последовательность бинарных событий вида «+» «-» (0 или 1, -1 или 1). Ранее подробно В.В. Ермолаевой и А.В. Чвановым было исследовано комбинаторное представление выборки объемом 4.

Ю.Э. Васильевым был исследован объем выборки, равный 5 [5–7].

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Возникла задача приводить оценку статистических характеристик переменной выборки не только объема 4 и 5, но и 6 и 7. Такая задача усложнилась и потребовала ее автоматизации. С учетом того, что данная формула относится к непрерывной функции, а значения высот выступов и глубин впадин есть числовые ряды, синтезируются формулы для расчета числа знако-чередований:

$$z_i = \prod_{i=1}^{n-1} \text{sign}(x_i - u) \text{sign}(x_{i+1} - u),$$

$$f_i = \frac{z_i + 1}{2},$$

$$y_j = l - \sum_{i=1}^{j+1-1} f_i, \quad (4)$$

где x_i – дискретное значение высоты выступа или глубины впадин, z_i, f_i – служебные параметры, y_j – число знако-чередований.

Был составлен автоматизированный программный модуль, позволяющий организовать комбинаторику с визуальным представлением расчета выборок объема до 7 и более, в случае необходимости и обоснования ее информативности. Отсутствие информативности в выборке объема 8 объясняется значением автокорреляционной функции, близкой к 0.

Программный комплекс был реализован в программной среде Visual C++. Автоматический тренажер комбинаторики и расчета статистических характеристик для выборки от 1 до 6 (пример задания объема выборки представлен на рис. 1).

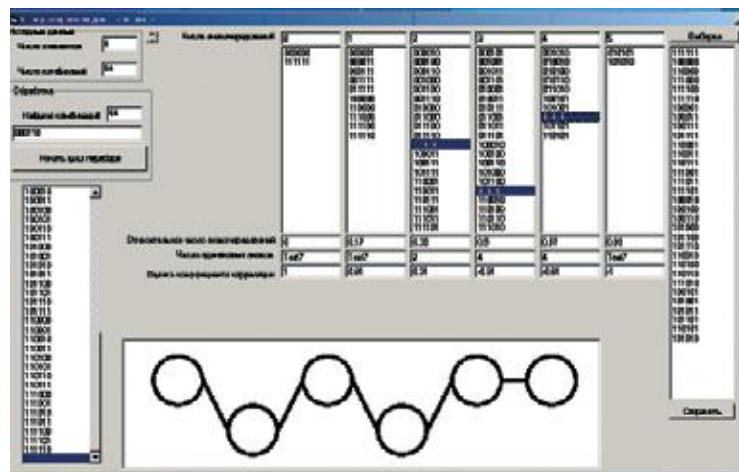


Рис. 1. Автоматический тренажер комбинаторики и расчета статистических характеристик для выборки объема 6

Результаты работы автоматизированного тренажера по расчету статистических характеристик декоррелированности представлены в таблице 3.

Разработан программный модуль оценки статистических параметров макрошероховатости, результаты работы которого представлены на рис. 2.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаются новые методы нормирования контрольных карт управляемых технологических

Таблица 3. Результаты работы автоматизированного тренажера по расчету статистических характеристик декоррелированности

Комбинация	Число знако- чередований	Относительное число знакочередований, приведенное к максимально возможному	Относительное число знако- чередований	Число одина- ковых знаков	Оценка коэффи- циента корреляции
111111	0	0	0	6	1
100000	1	0,2	0,17	5	0,81
110000	1	0,2	0,17	4	0,81
111000	1	0,2	0,17	3	0,81
111100	1	0,2	0,17	4	0,81
111110	1	0,2	0,17	5	0,81
100001	2	0,4	0,33	4	0,31
100011	2	0,4	0,33	3	0,31
100111	2	0,4	0,33	4	0,31
101111	2	0,4	0,33	5	0,31
110001	2	0,4	0,33	3	0,31
110011	2	0,4	0,33	4	0,31
110111	2	0,4	0,33	5	0,31
111001	2	0,4	0,33	4	0,31
111011	2	0,4	0,33	5	0,31
111101	2	0,4	0,33	5	0,31
100010	3	0,6	0,5	4	-0,31
100100	3	0,6	0,5	4	-0,31
100110	3	0,6	0,5	3	-0,31
101000	3	0,6	0,5	4	-0,31
101100	3	0,6	0,5	3	-0,31
101110	3	0,6	0,5	4	-0,31
110010	3	0,6	0,5	3	-0,31
110100	3	0,6	0,5	3	-0,31
110110	3	0,6	0,5	4	-0,31
111010	3	0,6	0,5	4	-0,31
100101	4	0,8	0,67	3	-0,81
101001	4	0,8	0,67	3	-0,81
101011	4	0,8	0,67	4	-0,81
101101	4	0,8	0,67	4	-0,81
110101	4	0,8	0,67	4	-0,81
101010	5	1,0	0,83	3	-1

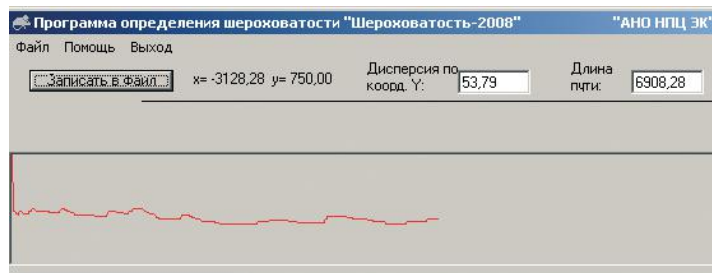


Рис. 2. Программный модуль оценки статистических параметров макрошероховатости

процессов на примере устройства макрошероховатых дорожных и мостовых покрытий.

2. Такая постановка с применением математических методов менеджмента качества управляемых технологических процессов применения контрольных карт является новой.

3. В отличие от контрольных карт неуправляемых технологических процессов, где имеется смещение текущего среднего, для управляемых технологических процессов, которые характеризуются нулевым или установившимся средним, показателем нормирования контрольной карты является чередование бинарных состояний относительно сигнальной границы.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77). Шероховатость поверхности. – М.: Гос. Комитет СССР по стандартам, 1980.
2. Кочетков А.В., Суслиганов П.С. Устройство шероховатых поверхностных слоев на покрытиях автомобильных дорог и мостовых сооружений. Обзорная информация. ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР». Автомобильные дороги и мосты. – 2005. – Выпуск 3.
3. ОДМ. Рекомендации по устройству дорожных поверхностей с шероховатой поверхностью. (взамен ВСН 38–90). – М.: Росавтодор, 2004.
4. ГОСТ на шероховатые поверхности нуждается в улучшении / А.В. Кочетков, М.Л. Ермаков, Н.Е. Кокодева, С.П. Аржанухина // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 12. – С. 32–34.
5. Кочетков А.В., Янковский Л.В., Сухов А.А. Нормирование макрошероховатости поверхностей // Вестник гражданских инженеров. Серия «Архитектура. Строительство. Транспорт». – 2013. – № 1(36). – С. 137–144.
6. Чванов А.В. Нормирование, устройство и контроль качества макрошероховатых дорожных покрытий: дис. канд. техн. наук: 05.23.11 – Саратов, 2010. – 178 с.
7. Рекомендации по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью / Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства (РОСАВТОДОР). – Москва, 2004. Источник: http://www.znaytovar.ru/gost/2/RekomendaciiRekomendacii_po_us11.html

