

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСАДОК РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ БАЗОВЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ПУТИ

Целью работы является моделирование вертикальных неровностей рельсовых нитей с заданной балльной оценкой состояния пути. Исследования проведены с применением к записям показаний вагона-путеизмерителя методов математической статистики, в частности спектрального анализа.

Выполнен качественный и количественный анализ некоторых статистических характеристик просадок рельсовых нитей, зарегистрированных на различных участках пути с одинаковой суммой баллов за просадки. Дана оценка возможного разброса спектральных плотностей этих неровностей и их дисперсий в полосе частот, учитываемых при определении балльности участка пути. Описан алгоритм формирования неровностей виртуальных участков пути заданной балльности, с помощью которого построены реализации случайных процессов неровностей с различными степенями отступлений от норм. Определены и проанализированы спектральные плотности и дисперсии таких процессов.

Сформированные реализации случайных процессов вертикальных неровностей рельсовых нитей и их статистические характеристики могут быть использованы при проведении расчетов динамических показателей рельсовых экипажей и анализе состояния железнодорожного пути.

Метою роботи є моделювання вертикальних нерівностей рейкових ниток із заданою балльною оцінкою стану колії. Дослідження проведено із застосуванням до записів показань вагона-колісвимірювача методів математичної статистики, зокрема спектрального аналізу.

Виконано якісний і кількісний аналіз деяких статистичних характеристик осідань рейкових ниток, зареєстрованих на різних ділянках колії з однаковою сумою балів за осідання. Дано оцінку можливого розкиду спектральних густин цих нерівностей та їх дисперсій в смузі частот, що враховуються при визначенні балльності ділянки колії. Описано алгоритм формування нерівностей віртуальних ділянок колії заданої балльності, за допомогою якого побудовано реалізації випадкових процесів нерівностей з різними ступенями відступів від норм. Визначено та проаналізовано спектральні густини та дисперсії таких процесів.

Сформовані реалізації випадкових процесів вертикальних нерівностей рейкових ниток і їх статистичні характеристики можуть бути використані при проведенні розрахунків динамічних показників рейкових екіпажів та аналізі стану залізничної колії.

The aim of the work is to simulate the vertical rail irregularities filaments with a given point assessments of the way. The studies were conducted with the use of a recording to the track-test car statistical techniques, such as spectral analysis.

Performed a qualitative and quantitative analysis of some of the statistical characteristics of subsidence rail threads, registered in various sections with the same amount of points for drawdown. An assessment of the possible distribution of the spectral densities of these irregularities and their variances in the frequency band into the determination of intensities of the route section. The algorithm of the formation of the virtual sections of track irregularities specified intensities with which to construct a realization of random processes with different degrees of roughness deviations from the norm. Identify and analyze the spectral density and the variance of such processes.

Formed implementation of random processes vertical irregularities rail threads and their statistical properties can be used for calculations of dynamic parameters of rail vehicles and analysis of the state railway.

При исследованиях динамики железнодорожных экипажей необходимым условием получения достоверных результатов математического моделирования является корректное задание возмущающих воздействий, поступающих со стороны пути. В случае использования для формирования входных возмущений результатов измерений геометрических параметров реальных участков пути остается открытым вопрос о разбросе статистических характеристик случайных процессов, которыми описываются неровности. Некоторые аспекты указанной проблемы и рассмотрены в данной статье.

В работе приведены результаты исследований только вертикальных неровностей рельсовых нитей. В качестве исходных данных использованы записи просадок, зарегистрированные вагоном-путеизмерителем во время плановой проверки состояния магистрального пути на участке Пятихатки – Чаплино Приднепровской железной дороги в феврале 2007 г. При этом учитывалось, что записи просадок в силу особенностей применяемых в настоя-

щее время двухточечных схем измерения отличаются от фактических неровностей пути под движущимся путеизмерителем как формой, так и величиной [1]. Для устранения указанной методической погрешности измерений и определения фактических неровностей записи преобразовывались с учетом передаточной функции измерительной системы [2, 3].

1. Анализ статистических характеристик вертикальных неровностей рельсовых нитей на участках пути нулевой балльности. Проанализируем вертикальные неровности рельсовых нитей, которые зарегистрированы на участках, имеющих одинаковую сумму баллов, начисленных за просадки – $\Sigma_{пр}$. При проведении такого анализа значение $\Sigma_{пр}$ не принципиально, важным фактором является объем исследуемой статистической выборки. Из имеющихся записей путеизмерителя наибольшее количество (25 записей) было получено на участках пути с просадками только I степени отступлений от норм содержания рельсовой колеи, т. е. при $\Sigma_{пр} = 0$, поэтому анализировались неровности пути именно на таких участках.

Для каждого из участков пути нулевой балльности определены такие параметры как количество просадок, наибольшая глубина просадки и полная дисперсия неровностей D . Значения указанных статистических характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение параметра		
	максимальное	минимальное	среднее
Количество просадок на участке, приведенное к 1 км пути, шт.	445	226	305 – 325 ^{*)}
Наибольшая на участке глубина просадки, мм	9,6	3,4	6,2
Дисперсия неровностей, 10^7 , м ²	42,1	4,81	14,8

^{*)} Под средним количеством просадок на участке понимается интервал, значения из которого встречаются наиболее часто.

Как показали исследования, закономерность в изменении полной дисперсии при изменении количества просадок отсутствует, а увеличение значения D с ростом максимальной на участке глубины просадок существует только как тенденция.

Для проведения анализа внутренней структуры случайных процессов неровностей пути в частотной области рассмотрим их спектральные плотности. Следует отметить, что, согласно [2, 3], по данным вагона-путеизмерителя достаточно точно можно восстановить вертикальные неровности рельсовых нитей длиной L от 0,92 до 54 м, за исключением длин, кратных базе путеизмерительной тележки и близких к ним – таких, для которых выполняются соотношения $2,56 \text{ м} \leq L \leq 2,86 \text{ м}$ и $1,32 \text{ м} \leq L \leq 1,39 \text{ м}$. При определении состояния пути балльной оценке подлежат записи просадок, у которых расстояние на ленте путеизмерителя между вершинами пиков не превышает 3 мм [1], а с учетом масштаба записи это означает, что оцениваются вертикальные неровности пути длиной не более 12 м. Исходя из этого и был выбран частотный диапазон для проведения спектрального анализа.

Графики спектральных плотностей S неровностей участков пути нулевой балльности, инвариантных по отношению к скорости движения экипажа

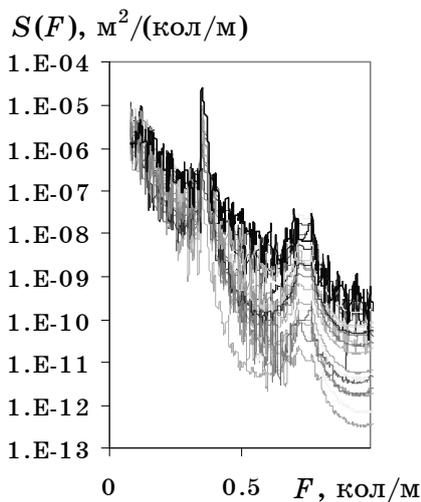


Рис. 1

(т. е. полученных для значений пространственной частоты F , характеризующей число циклов колебаний составляющей неровности на 1 м пути), приведены на рис. 1. Анализ этих графиков показал, что спектральные плотности просадок рельсовых нитей на различных участках пути одинаковой балльности отличаются друг от друга весьма существенно. В среднем максимальное и минимальное значения спектральных плотностей неровностей на различных участках при одной и той же частоте отличаются примерно в 10^3 раз, а наибольшее отличие между ними превышает $5 \cdot 10^3$ раз.

Обозначим дисперсию в полосе частот, соответствующих неровностям, которые учитываются при определении балльности пути, через D_F . Наибольшее значение $D_F = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ имеет процесс неровностей h_0 на участке с наибольшим количеством просадок I степени и достаточно большой их максимальной глубиной – 9,0 мм (к I степени отступлений от норм относятся просадки глубиной до 10 мм включительно [1]). Спектральная плотность этого процесса на рис. 1 показана толстой темной линией. Ее уровень является наибольшим на большей части анализируемого частотного диапазона. Можно предположить, что существует такой участок пути нулевой балльности, спектральная плотность просадок на котором во всем анализируемом частотном диапазоне будет близка к наибольшим полученным значениям $S(F)$. Дисперсия D_F такого виртуального процесса (обозначим его $h_{0\text{max}}$) равна $7,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, т. е. она превышает дисперсию D_F процесса h_0 на величину $\Delta_0 = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, или на 56 %. При одном значении частоты F значения спектральных плотностей процессов h_0 и $h_{0\text{max}}$ различаются между собой не более чем на один порядок.

Что касается минимального значения дисперсии D_F просадок рельсовых нитей для участков пути нулевой балльности, то теоретически оно должно быть равно 0 (в случае абсолютно гладкого пути), чего в действительности на железных дорогах не существует. Близким к реальности является предположение, что существует такой участок пути нулевой балльности, спектральная плотность просадок на котором при каждом значении частоты F близка к наименьшим из полученных значений $S(F)$. Дисперсия D_F такого виртуального процесса отличается от дисперсии D_F виртуального процесса $h_{0\text{max}}$ с максимальной дисперсией примерно в 30 раз.

2. Формирование виртуальных неровностей пути заданной балльности. Анализ неровностей пути, аналогичный описанному выше, следовало бы провести и для участков ненулевой балльности. Идеальным решением такой задачи было бы накопление большого количества записей показаний путеизмерителя, полученных на пути не только различной балльности, но и с раз-

личным сочетанием неровностей, дающих одинаковую сумму баллов $\Sigma_{\text{пр}}$. Очевидно, что данная задача является практически невыполнимой, прежде всего из-за невозможности получения и обработки большого количества записей показаний путеизмерителя для различных участков пути с одинаковым значением $\Sigma_{\text{пр}}$.

В такой ситуации целесообразным является формирование неровностей пути, соответствующих виртуальным участкам пути заданной балльности. Суть предлагаемого подхода состоит в том, что в реальном процессе фактических неровностей пути, полученном путем обработки записей показаний путеизмерителя, следует искусственно увеличить или уменьшить глубину отдельных неровностей таким образом, чтобы изменить сумму баллов до требуемого значения. При этом необходимо учитывать, что балльная оценка участка пути определяется не по фактическим неровностям, а по записям показаний путеизмерителя, которые, как уже было отмечено, отличаются от фактических неровностей. В связи с этим для формирования неровностей виртуальных участков пути заданной балльности предлагается использовать следующий алгоритм.

Шаг 1. В реализации случайного процесса фактических неровностей пути, полученных по записям показаний путеизмерителя, изменить ординаты отдельных неровностей. Это может быть выполнено, например, путем графического подбора параметров в программе Microsoft Excel.

Шаг 2. Для полученного на шаге 1 процесса $\eta_{\text{изм}}$ сформировать виртуальную запись показаний путеизмерителя. Данная процедура выполняется таким образом: к процессу $\eta_{\text{изм}}$ применяется прямое преобразование Фурье; полученные комплексные коэффициенты Фурье умножаются на обратную комплексную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) измерительной системы путеизмерителя W'_B ; с помощью обратного преобразования Фурье определяются виртуальные записи просадок. Выражение прямой АЧХ измерительной системы $W_B(iF)$ приведено в работе [3], обратная АЧХ вычисляется так:

$$W'_B(iF) = 1 / W_B(iF) = 1 - \exp(-2\pi iFl),$$

где l – база тележки путеизмерителя.

Шаг 3. По построенной виртуальной записи просадок согласно [1] определить сумму баллов $\Sigma_{\text{пр}}$ на участке. Если полученное значение $\Sigma_{\text{пр}}$ не совпадает с требуемым, нужно вернуться к шагу 1 для корректировки изменений в исходном процессе.

3. Формирование базы спектральных плотностей вертикальных неровностей рельсовых нитей. С помощью алгоритма, приведенного в п. 2, может быть сформировано множество реализаций случайных процессов неровностей для участков пути заданной балльности и построена база виртуальных неровностей пути с заданными характеристиками. Поскольку при проведении расчетов железнодорожных экипажей анализируются максимальные значения динамических показателей, то в качестве основы для создания такой базы целесообразно выбрать реальный процесс с наибольшим

уровнем спектральной плотности – в нашем случае это h_0 (толстая темная линия на рис. 1).

С использованием процесса h_0 были сформированы реализации случайных процессов неровностей h_b , соответствующих виртуальным участкам пути с различной суммой баллов за просадки: 10, 20, ..., 100. Значение $\Sigma_{\text{пр}}=100$ теоретически является максимально возможным для пути хорошего состояния с непросроченным капитальным ремонтом в предположении, что отступления от норм всех других геометрических параметров пути (положения рельсовых нитей по уровню и в плане, ширины колеи) не превышают I степени, а несоответствия границ отводов возвышения и кривизны находятся в пределах нормы. На практике сумма баллов за просадки на пути хорошего состояния редко достигает 30 баллов. При формировании процессов h_b увеличение глубины неровностей производилось таким образом, чтобы величины просадок в полученных виртуальных записях путеизмерителя по возможности были близки к наибольшему для заданной степени отступления от норм. Кроме того, для отдельных значений $\Sigma_{\text{пр}}$ были сформированы процессы с различным набором просадок, дающих вклад в балльную оценку участка.

Отметим, что каждый из построенных случайных процессов является только одним вариантом возможных неровностей пути заданной балльности $\Sigma_{\text{пр}}$, при этом спектральная плотность и дисперсия таких процессов близки к максимально возможному.

Если считать, что для статистических характеристик вертикальных неровностей участков пути произвольной балльности выполняются такие же соотношения, как и полученные в п. 1 для участков с $\Sigma_{\text{пр}}=0$, то можно определить верхнюю и нижнюю границы дисперсий (соответственно $D_{F_{\text{max}}}$ и $D_{F_{\text{min}}}$) неровностей виртуальных участков заданной балльности. Характеристики сформированных виртуальных случайных процессов просадок рельсовых нитей, а также некоторых процессов, полученных путем обработки записей показаний путеизмерителя на реальных участках пути, приведены в табл. 2.

Ниже в качестве примера приведены спектральные плотности просадок рельсовых нитей некоторых участков пути. На рис. 2 показаны графики спектральных плотностей неровностей реального участка пути нулевой балльности (процесс h_0 – тонкая сплошная линия) и сформированных на его основе процессов с различным количеством неровностей одинаковой (второй) степени, соответствующих значениям $\Sigma_{\text{пр}}=20$ и $\Sigma_{\text{пр}}=100$ (процесс h_{20} – толстая сплошная линия, процесс h_{100} – пунктирная линия). На рис. 3 показаны графики спектральных плотностей неровностей участков пути с близкими значениями балльности, но различным составом неровностей – виртуальных процессов h_{50} (светлая сплошная линия) и h_{54} (темная сплошная линия), а также реального процесса h_{U54} (пунктирная линия).

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее.

Случайные процессы просадок рельсовых нитей для участков пути одинаковой (или близкой) балльности, но с различным набором амплитуд неровностей имеют различный уровень спектральных плотностей и, следовательно,

различные значения дисперсии D_F . Более высокий уровень имеют спектральные плотности процессов с бóльшим количеством неровностей, несмотря на то, что амплитуды этих неровностей могут быть и меньше. Так, например, одна просадка с отступлением от норм III степени дает меньший вклад в уровень спектральной плотности и, следовательно, в дисперсию D_F , чем 5 неровностей II степени, а сумма баллов в обоих случаях одинакова – 10.

Таблица 2

Наименование процесса	Количество просадок на 1 км пути с отступлениями от норм степени			Сумма баллов $\Sigma_{пр}$	D_F , $10^7, м^2$	$D_{F_{max}}$, $10^7, м^2$	$D_{F_{min}}$, $10^7, м^2$
	II	III	IV				
h_0 (реальный участок)	-	-	-	0	5,00	-	-
h_{0max}	-	-	-	0	7,82	-	0,26
h_{10}	5	-	-	10	8,01	10,8	0,36
h_{12}	1	1	-	12	5,81	8,63	0,29
h_{U12} (реальный участок)	1	1	-	12	4,53	-	-
h_{20}	10	-	-	20	10,1	12,9	0,43
h_{30}	15	-	-	30	12,6	15,4	0,51
h_{40}	20	-	-	40	15,0	17,2	0,57
h_{50}	25	-	-	50	16,6	19,4	0,65
h_{54}	2	-	1	54	6,53	9,4	0,31
h_{U54} (реальный участок)	2	-	1	54	7,31	-	-
h_{60}	30	-	-	60	19,2	22,0	0,73
h_{70}	35	-	-	70	22,0	24,8	0,83
h_{80}	40	-	-	80	24,8	27,6	0,92
h_{100}	45	1	-	100	28,2	31,0	1,03
h_{100-1}	10	8	-	100	15,6	18,4	0,61

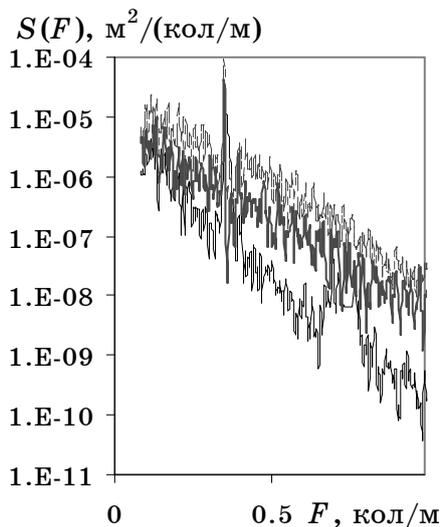


Рис. 2

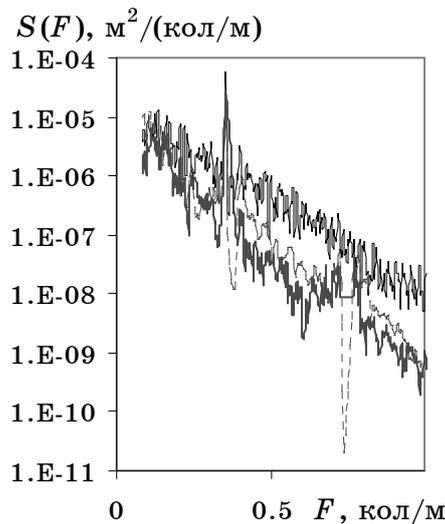


Рис. 3

Увеличение балльности пути на 10 единиц путем добавления пяти неровностей с отступлениями II степени приводит к увеличению дисперсии D_F на 10 – 60 %.

Сравнение характеристик случайных процессов неровностей с одинаковым набором степеней отступлений, зарегистрированных на реальном участке пути и сформированных с помощью предложенного в п. 2 алгоритма, показывает их соответствие результатам анализа, полученным в п. 1.

Выводы. На основании качественного и количественного анализа статистических характеристик просадок рельсовых нитей на участках пути нулевой балльности установлено, что различие между максимальным и минимальным значениями спектральных плотностей неровностей на различных участках при одной и той же частоте может превышать $5 \cdot 10^3$ раз. Дисперсии неровностей в полосе частот, соответствующих длинам неровностей, которые учитываются при определении балльной оценки пути, могут отличаться друг от друга в 30 раз. Более высокий уровень имеют спектральные плотности процессов с большим количеством неровностей, несмотря на то, что амплитуды этих неровностей могут быть и меньше. Выявленные закономерности справедливы и для других случаев – когда рассматриваются участки пути с одинаковой суммой баллов за просадки, отличной от 0.

С использованием описанного в работе алгоритма сформированы реализации случайных процессов вертикальных неровностей рельсовых нитей с различными степенями отступлений от норм и различной суммой баллов за просадки. Определены спектральные плотности и дисперсии таких процессов, которые являются близкими к максимально возможным для пути заданной балльности. Полученные случайные процессы и их статистические характеристики могут быть использованы при проведении расчетов динамических показателей рельсовых экипажей и анализе состояния железнодорожного пути.

1. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. – Київ, 2005. – 48 с.

2. Коган А. Я. Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов / А. Я. Коган, М. А. Левинзон, С. В. Малинский, В. О. Певзнер // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 1. – С. 39 – 43.
3. Ушкалов В. Ф. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 38 – 41.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 21.01.13,
в окончательном варианте 06.03.13