УДК 629.4:519.6

Л. Г. ЛАПИНА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ УСКОРЕНИЙ БУКСОВЫХ УЗЛОВ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: lglap@bigmir.net

Роботу присвячено розвитку підходів до визначення фактичних нерівностей залізничної колії. Такі нерівності традиційно використовуються як складові вхідного збурення при розрахунках динамічного стану екіпажу, що рухається. Метою роботи є розробка способу визначення нерівностей колії, більш точного і зручного у використанні, ніж обробка записів показань вагона-колієвимірювача. Для випадку вертикальних нерівностей в припущенні безвідривного руху колеса по рейці цю задачу пропонується вирішувати шляхом двократного інтегрування записів прискорень буксових вузлів вантажного вагона. Розглянуто спосіб числового інтегрування процесів в частотній області із застосуванням перетворення Фур'є. Для видалення з результатів інтегрування складових, що залежать від початкових умов і викликають зсув цих результатів від дійсних, пропонується скористатися алгоритмом фільтрації. Описаний підхід апробовано на прикладах інтегрування гармонічної функції, заданої аналітично, і випадкового процесу, отриманого в експерименті. Проведено порівняння обчислених оцінок переміщень заданої точки механічної системи з відповідними значеннями, відомими апріорі. Визначено значення нижньої і верхньої границь смуги фільтрації результуючого процесу. Показано високу точність результатів інтегрування після застосування смугової фільтрації. Відзначено, що застосування даного підходу для визначення нерівностей колії може розширити діапазон аналізованих довжин нерівностей колії в порівнянні з тими, що коректно відновлюються по записах показань колієвимірювача.

Запропонований спосіб дворазового інтегрування в частотній області в поєднанні зі смуговою фільтрацією результатів може бути використаний не тільки для визначення нерівностей залізничної колії, але й при вирішенні інших технічних задач, в яких необхідно інтегрувати сигнали, отримані в ході експерименту.

Работа посвящена развитию подходов к определению фактических неровностей железнодорожного пути. Такие неровности традиционно используются в качестве составляющих входного возмущения при расчетах динамического состояния движущегося экипажа. Целью работы является разработка способа определения неровностей пути, более точного и удобного в применении, чем обработка записей показаний вагона-путеизмерителя. Для случая вертикальных неровностей в предположении безотрывного движения колеса по рельсу данную задачу предлагается решать путем двукратного интегрирования записей ускорений буксовых узлов грузового вагона. Рассмотрен способ численного интегрирования процессов в частотной области с применением преобразования Фурье. Для удаления из результатов интегрирования составляющих, зависящих от начальных условий и вызывающих смещение этих результатов от истинных, предлагается воспользоваться алгоритмом фильтрации. Описанный подход апробирован на примерах интегрирования гармонической функции, заданной аналитически, и случайного процесса, полученного в эксперименте. Проведено сравнение вычисленных оценок перемещений заданной точки механической системы с соответствующими значениями, известными априори. Определены значения нижней и верхней границ полосы фильтрации результирующего процесса. Показана высокая точность результатов интегрирования после применения полосовой фильтрации. Отмечено, что применение рассматриваемого подхода для определения неровностей пути может расширить диапазон анализируемых длин неровностей пути по сравнению с теми, которые корректно восстанавливаются по записям показаний путеизмерителя.

Предложенный способ двукратного интегрирования в частотной области в сочетании с полосовой фильтрацией результатов может быть использован не только для определения неровностей железнодорожного пути, но и при решении других технических задач, в которых необходимо интегрировать сигналы, полученные в ходе эксперимента.

This work is devoted to the development of approaches to the determination of the actual irregularities of a railway track. Such irregularities are traditionally used as input disturbance components in the simulation of the dynamic behavior of a moving vehicle. The aim of this work is to develop a track irregularity determination method that would be more accurate and easier in use than the processing of track measurement car records. For vertical irregularities in the assumption that no wheel–rail detachment occurs, this problem is proposed to be solved by double integration of recorded accelerations of freight car axleboxes. A method of numerical integration of processes in the frequency domain using the Fourier transform is considered. To eliminate components that depend on the initial conditions and cause the results of integration to deviate from the true ones, a filtering algorithm is used. The proposed approach is verified by applying it to the integration of a harmonic function defined analytically and an experimentally obtained random process. The calculated estimates of the displacements of a given point of a mechanical system are compared with their values known a priory. The lower and the upper limits of the filtering band of the resulting process are determined. The high accuracy of the integration results on application of bandpass filtering is shown. The approach to track irregularity determination considered in this paper may extend the range of analyzable track irregularity lengths in comparison with those correctly extracted from track measurement car records.

The proposed method of double integration in the frequency domain in combination with bandpass filtering may be used not only in the determination of railway rack irregularities, but also in the solution of other engineering problems involving the integration of experimentally obtained signals.

Ключевые слова: *неровности железнодорожного пути, ускорения буксовых узлов, интегрирование, преобразование Фурье.*

Введение. При проведении расчетов по определению динамического состояния движущегося железнодорожного экипажа большое значение для корректности получаемых результатов имеют возмущения, поступающие на вход системы, моделирующей экипаж. В качестве составляющих таких возмущений обычно используют неровности рельсового пути. Традиционный способ получения неровностей – обработка записей показаний вагона-путеизмерителя, с помощью которого производится периодический контроль состояния пути. На железных дорогах Украины используются путеизмерители ЦНИИ-2 или переоборудованные из них КВЛ-П1М, регистрирующие вертикальные и горизонтальные неровности пути с помощью двух- и трехточечных измерительных систем. Полученные при этом записи имеют невысокую точность и, кроме того, отличаются от фактических неровностей пути под движущимся путеизмерителем как формой, так и величиной [1]. Для использования их в качестве составляющих возмущений требуется выполнить преобразования [2, 3], позволяющие исключить методическую погрешность измерений. В случае вертикальных неровностей в предположении безотрывного движения колеса по рельсу процесс определения фактических неровностей может быть существенно упрощен, если вместо регистрации стрел неровностей с помощью громоздкой системы путеизмерителя использовать записи ускорений, полученные с помощью компактных и недорогих акселерометров, установленных на неподрессоренной части вагона, например вблизи буксовых узлов. При анализе результатов ходовых испытаний экипажей наличие таких записей в сочетании с корректной информацией о скорости движения позволило бы оценить, в каком состоянии находится путь непосредственно во время поездки. Кроме того, с помощью подобных записей может быть организован постоянный мониторинг текущего состояния пути для того, чтобы своевременно выявлять угрожающие безопасности изменения его качества и планировать ремонтные работы.

Неровности пути по записям ускорений буксовых узлов определяются как результат двукратного интегрирования. В отличие от дифференцирования, которое приводит к росту шумовой составляющей сигнала, операция интегрирования может быть осуществлена с высокой точностью. Однако несмотря на то, что интегрирование ускорения для определения скорости и перемещения кажется простым решением, существует проблема, существенно влияющая на получаемые результаты – наличие в результатах интегрирования произвольных постоянных, вызывающих смещение вычисленных значений от истинных. Удалить это смещение можно, задавая начальное значение искомой функции, но на практике оно в большинстве случаев заранее неизвестно. Поэтому необходима разработка способов восстановления исходной функции по значениям ее второй производной, не зависящих от заданных начальных значений.

Существуют два пути создания численных интеграторов: интегрирование во временнóй области и в частотной. Способ численного интегрирования стационарных функций (т. е. таких, вероятностные характеристики которых не зависят от начала отсчета) во временнóй области описан в статье [4]. В данной статье рассмотрен другой подход к решению поставленной задачи – восстановление значений перемещений выбранной точки по известным значениям ее ускорений, выполняемое в частотной области.

Теоретическое обоснование. Интегрирование в частотной области основано на применении преобразования Фурье. Данный подход является традиционным аппаратом, применяемым при обработке стационарных функций (сигналов).

Будем считать, что имеется процесс $\ddot{x}(t)$, представляющий собой ускорения некоторой точки в зависимости от времени t. Скорость $\dot{x}(t)$ и перемещение $x(t)$ этой точки вычисляются путем интегрирования ускорения $\ddot{x}(t)$ следующим образом:

$$\dot{x}(t) = \int_{t_0}^{t} \ddot{x}(\tau)d\tau + \dot{x}(t_0),$$
$$x(t) = \int_{t_0}^{t}\left(\int_{t_0}^{\tau} \ddot{x}(\tau)d\tau\right)dt + \dot{x}(t_0)t + x(t_0)\;) \qquad (1)$$

где $\dot{x}(t_0)$ и $x(t_0)$ – соответственно значения скорости и перемещения в начальный момент времени t_0.

Применяя к выражениям (1) преобразование Фурье, можно вычислить оценку скорости $\dot{x}(t)$ по формуле

$$\dot{x}(t) = \Phi^{-1}\big(\mathrm{G}(s)\Phi(\ddot{x}(t))\big) + p_1(t)\,, \qquad (2)$$

где s – оператор Лапласа; Φ и Φ^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно; $\mathrm{G}(s) = 1/s$ – передаточная функция интегрирования; p_1 – смещение, определяемое начальными условиями.

Оценка перемещения $x(t)$ по известным значениям скорости вычисляется аналогично:

$$x(t) = \Phi^{-1}\big(\mathbf{G}(s)\Phi(\dot{x}(t))\big) + p_2(t)\,, \qquad (3)$$

где p_2 – смещение, определяемое начальными условиями.

Оценка перемещения по известным значениям ускорения определяется следующим образом:

$$x(t) = \Phi^{-1}\big(\mathrm{H}(s)\Phi(\ddot{x}(t))\big) + p_3(t)\,, \qquad (4)$$

где $\mathrm{H}(s) = 1/s^2$ – передаточная функция двойного интегрирования; p_3 – смещение.

Как видно, в каждом из выражений (2) – (4) присутствует некоторый тренд – p_1, p_2 или p_3. Согласно [5] наилучшим способом удаления тренда является применение алгоритмов фильтрации низких частот, заключающихся в удалении из спектра полученного процесса составляющих с частотами ниже заданной $f_н$ путем обнуления соответствующих коэффициентов Фурье.

Таким образом, алгоритм численного определения перемещений заданной точки механической системы по известным значениям ее ускорений должен включать в себя следующие шаги: задание значений ускорений как временно́го ряда; переход в частотную область с помощью преобразования Фурье; вычисление коэффициентов Фурье результирующего процесса с применением формул (2) – (4); фильтрацию; формирование значений перемещений как временно́го ряда с помощью обратного преобразования Фурье.

Апробация предложенного подхода. Прежде всего применение описанного способа определения перемещений некоторой точки по известным значениям ее ускорений было протестировано на примере гармонической функции. Для ускорений, заданных такой функцией, легко получить аналитические выражения первой и второй первообразных (т. е. значений скорости и перемещения), которые используются для оценки результатов численного решения. Результаты определения значений перемещения $x(t_i)$ по заданным таблично значениям ускорений $\ddot{x}(t_i)$ в точках $t_i = \Delta t \cdot (i-1)$, $i = \overline{1, N}$ (Δt – произвольно заданное постоянное значение шага по времени) показали наличие в полученном процессе квадратичного тренда. Применение низкочастотной фильтрации с параметром $f_н$=1 Гц (т. е. удаление из спектра процесса составляющих с частотами менее 1 Гц) позволило приблизить результаты расчетов к истинным значениям перемещений, вычисленным аналитически. При этом практически во всем рассматриваемом временно́м диапазоне за исключением небольших областей вблизи его границ имела место высокая степень точности решения.

Более интересным с точки зрения практического применения является определение перемещений заданной точки механической системы по известным значениям ее ускорений, имеющим случайный характер. Тестирование предложенного алгоритма для случайных функций с широким спектральным составом было выполнено на примере записей ускорений и перемещений, полученных при проведении эксперимента, в котором одновременно фиксировались процессы ускорений и перемещений заданной точки механической системы.

Результаты определения перемещений заданной точки по формуле (4) до и после проведения низкочастотной фильтрации с параметром $f_н$=1 Гц для реализации длиной 5000 точек с шагом $\Delta t = 0{,}01$ с представлены на рис. 1 (линии 1 и 2 соответственно). Также здесь приведены перемещения, известные априори (линия 3). Чтобы визуально оценить степень близости графиков перемещений, вычисленных путем численного интегрирования ускорений и полученных в эксперименте, на рис. 2 в увеличенном масштабе приведена область, в которой отличия между ними наибольшие.

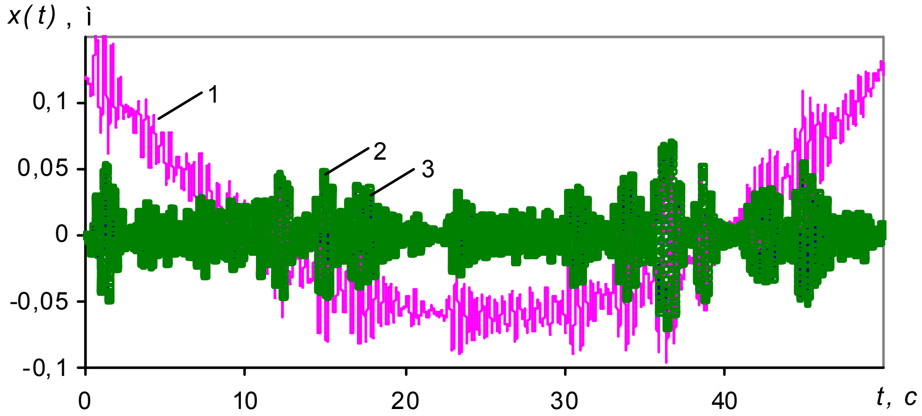

Рис. 1

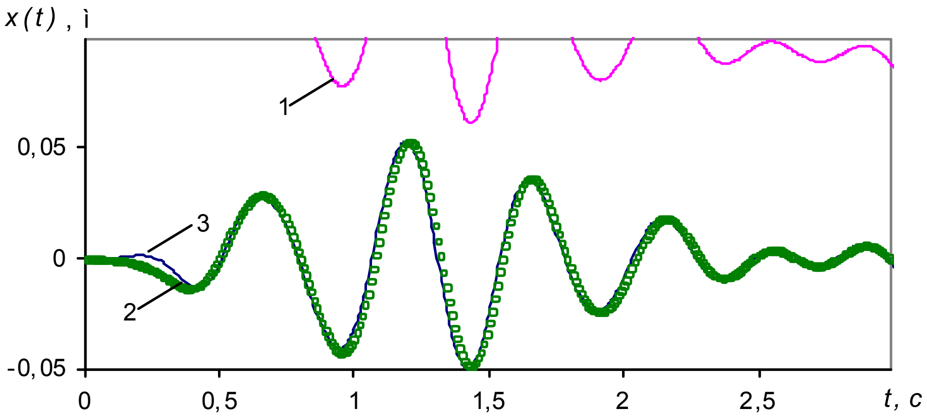

Рис. 2

Приведенные рисунки наглядно показывают, что при двукратном интегрировании случайной функции в частотной области в результатах расчета присутствует квадратичный тренд, который может быть удален путем фильтрации низких частот. Полученные при этом значения перемещений с высокой точностью совпадают с экспериментальными записями практически во всем рассмотренном временно́м диапазоне за исключением небольшой области (длиной около 1 % от полной длины реализации) вблизи его границ.

В отдельных случаях интегрирования в частотной области случайных функций с широким спектральным составом, например, когда рассматриваются достаточно короткие записи процессов, погрешность вычислений может привести к появлению в результатах расчетов высокочастотной составляющей, которой нет в записях реальных перемещений. Поэтому для повышения точности при интегрировании необходимо применение не низкочастотной, а полосовой фильтрации, т. е. удаления из спектра полученного процесса составляющих с частотами f, удовлетворяющими условию $f_н \le f \le f_в$. Пример результатов такого расчета графически представлен на рис. 3 (приведен фрагмент графика в масштабе, позволяющем увидеть наличие высокочастотных колебаний). В качестве исходных данных здесь использован отрезок длиной 500 точек рассмотренной выше записи ускорений, фильтрация проведена с параметрами $f_н$ =1 Гц, $f_в$ =50 Гц. Так же, как и на рис. 1 и 2, линией 2 показаны результаты интегрирования с низкочастотной фильтрацией, а линией 3 – экспериментальные записи перемещений. Линия 4 соответствует результатам расчетов с полосовой фильтрацией.

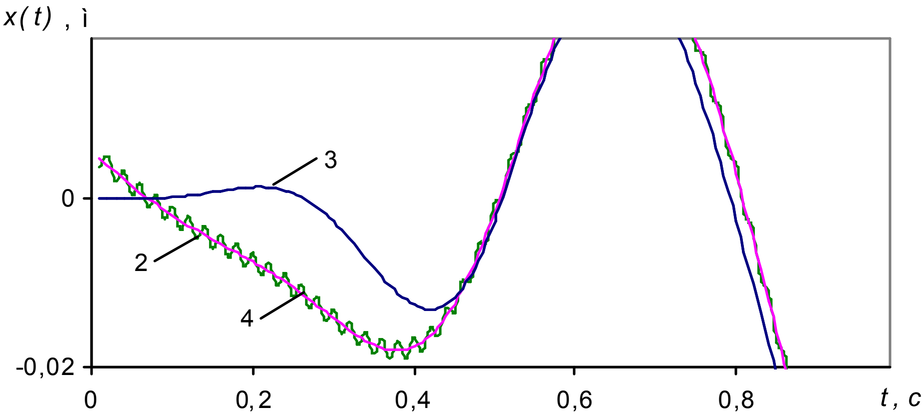

Рис. 3

Таким образом, на примерах гармонической и случайной функций показано, что применение двукратного интегрирования в частотной области в сочетании с полосовой фильтрацией позволяет с высокой точностью вычислить перемещения заданной точки механической системы по записям ускорений этой точки. Данный подход может быть использован для определения вертикальных неровностей железнодорожного пути по записям ускорений буксовых узлов.

Отметим также следующее обстоятельство. Известно [2, 6], что по записям вагона-путеизмерителя вертикальная неровность пути восстанавливается достаточно точно в диапазоне длин волн L от 0,9 м до 54 м за исключением окрестностей точек разрыва частотной характеристики, используемой для перехода от записей путеизмерителя к фактическим неровностям пути. Такие разрывы имеют место при частотах, соответствующих длинам волн, кратным базе измерительной тележки b = 2,7 м. В частотной области это означает, что, например, при скорости движения V = 80 км/ч корректно будут отображаться неровности в частотных диапазонах от 0,4 Гц до 7,8 Гц, от 8,7 Гц до 16,0 Гц и от 16,9 Гц до 24,2 Гц (поскольку частота f определяется соотношением $f = V / L$). При интегрировании записей ускорений буксовых узлов в частотной области с применением полосовой фильтрации появляется возможность определять более короткие неровности пути (например, при скорости 80 км/ч верхняя граница полосы фильтрации 50 Гц соответствует минимальной длине неровности 0,4 м), а также не определяемые по показаниям путеизмерителя неровности, длина волны которых кратна b.

Выводы. Предложен и протестирован способ двукратного интегрирования в частотной области в сочетании с полосовой фильтрацией результатов. При наличии корректной информации о скорости движения данный способ может быть использован для определения вертикальных неровностей железнодорожного пути по записям ускорений буксовых узлов грузового вагона. При этом не только обеспечивается высокая точность получаемых значений, но и может быть расширен диапазон длин неровностей, которые определяются корректно, по сравнению с использованием записей показаний вагона-путеизмерителя.

1. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП-0267: Затв. наказом Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. / М-во інфраструктури України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління колійного господарства; Розроб. Рибкін В. В., Патласов О. М. К.: Поліграфсервіс, 2012. 46 с.
2. *Ушкалов В. Ф., Лапина Л. Г., Мащенко И. А.* Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов. Залізничний транспорт України. 2012. №1. С. 38–41.
3. *Рибкін В. В., Сисин М. П.* Знаходження вертикальної нерівності залізничної колії за даними вагона-колієвимірника. Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. 2003. Вып. 2. С. 24–30.
4. *Лапина Л. Г.* Численное восстановление стационарной функции по значениям ее производной для исследования движения механических систем. Техническая механика. 2013. № 3. С. 57–62.
5. *Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. Москва: Мир, 1982. 428 с.
6. *Коган А. Я., Левинзон М. А., Малинский С. В., Певзнер В. О.* Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов. Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 1. С. 39–43.

Получено 27.03.2019,
в окончательном варианте 29.05.2019