

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЗВЕШИВАНИЯ НАХОДЯЩИХСЯ В ДВИЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ АВТО- И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Владислав Дмитриевич Рачков

Западно-сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер 2-й категории, тел. (383) 210-09-40, e-mail: ramdale@mail.ru

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, тел. (383) 361-07-46, e-mail: tissen.ksn@yandex.ru

Рассмотрен алгоритм обработки данных, полученных с тензометрических датчиков при динамическом взвешивании железнодорожного вагона или автомобиля, проезжающих через платформу весов, с помощью метода параметрической идентификации. Приведена модель колебательного звена второго порядка и показан способ идентификации ее коэффициентов с преобразованием к интегральному уравнению Вольтерры второго рода. Предложена идеализированная имитационная модель колебательного звена, позволяющая получить форму выходного сигнала в зависимости от ее коэффициентов и параметров входного сигнала. С использованием результатов имитационного моделирования показана эффективность применения предлагаемого алгоритма идентификации к определению параметров входного сигнала.

Ключевые слова: динамическая система, адаптивная фильтрация, динамическое взвешивание, уравнение Вольтерры

SOLVING THE PROBLEM OF ROAD AND RAIL TRANSPORT OBJECTS WEIGHING IN MOTION

Vladislav D. Rachkov

West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", 4, Dimitrova Prospect, Novosibirsk, 630004, Russia, Engineer of the 2nd category, phone: (383) 210-09-40, e-mail: ramdale@mail.ru

Victor M. Tissen

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plahotnogo St., Novosibirsk, 630004, Russia, Ph.D., phone: (383) 361-07-46, e-mail: tissen.ksn@yandex.ru

The algorithm for processing data obtained from strain gauges during dynamic weighing of a railway or auto car passing through the weighing platform using the parametric identification method is considered. The model of the second-order oscillatory circuit is presented and the method for identifying its coefficients with the transformation to the Volterra integral equation of the 2nd kind is shown. An idealized simulation model of the oscillatory link is proposed, which allows to obtain the output signal shape depending on its coefficients and the input signal parameters. Using the results of simulation modeling, the effectiveness of the proposed identification algorithm for determining the input signal parameters is shown.

Keywords: dynamic system, adaptive filtering, dynamic weighing, Volterra equation

Введение

Взвешивание движущихся объектов на весоизмерительных системах представляет собой сложную задачу из-за разнообразных динамических процессов, возникающих в данных системах при проведении измерений. Так, например, в случае использования тензометрической весоизмерительной системы сигналы, полученные с датчиков, являются зашумленными вследствие ошибок измерений и искаженными из-за возникновения внутренних деформаций и колебаний отдельных частей взвешиваемого объекта. В частности, при взвешивании железнодорожных вагонов источниками колебаний являются: жесткость рессор, неровность пути, овальность колес, выбоины в рельсах и колесах, ветровая нагрузка, колебания груза, жесткость и масса механической части весоизмерительной системы и другие механические воздействия. Эти колебания представляют собой низкочастотную периодическую помеху в диапазоне от 3 до 10 Гц, частота которой, главным образом, зависит от массы и других динамических свойств железнодорожного вагона или автомобиля, а не от конкретной конструкции весов. В тоже время, от жесткости и массы механической части весоизмерительной системы будет зависеть амплитуда такой помехи [4]. В результате в выходном сигнале будет присутствовать обширный спектр низкочастотных периодических помех в диапазоне частот от 3–10 Гц до нескольких КГц с амплитудами на уровне 5–10% относительно постоянной составляющей [1]. Основной задачей динамических измерений является сведение к минимуму влияния помех, что достигается за счет применения различных методов обработки измерительной информации. Из многообразия существующих методов обработки популярными являются математическое усреднение (интегрирование), фильтрация низких частот, Калмановская фильтрация, применение косинусных окон [2–5] и другие методы фильтрации.

Предлагаемый нами подход к решению задачи динамического взвешивания основан на знании динамических характеристик измерительных систем и программной постобработке данных экспериментальных измерений. Тестовые измерения при различных значениях взвешиваемой массы позволяют определить динамические характеристики весоизмерительной системы [6]. Использование интегрального уравнения Вольтерры для определения частоты среза шумовых и динамических искажений в выходном сигнале предоставляет возможность корректно решить задачу восстановления входного сигнала.

Методы и материалы

На рис. 1 в графическом виде приведены данные измерений, снятые с тензометрического датчика при прохождении через платформу весов железнодорожного состава. Данные для построения графика на рис. 1 предоставлены сотрудниками 10 отдела Западно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ».

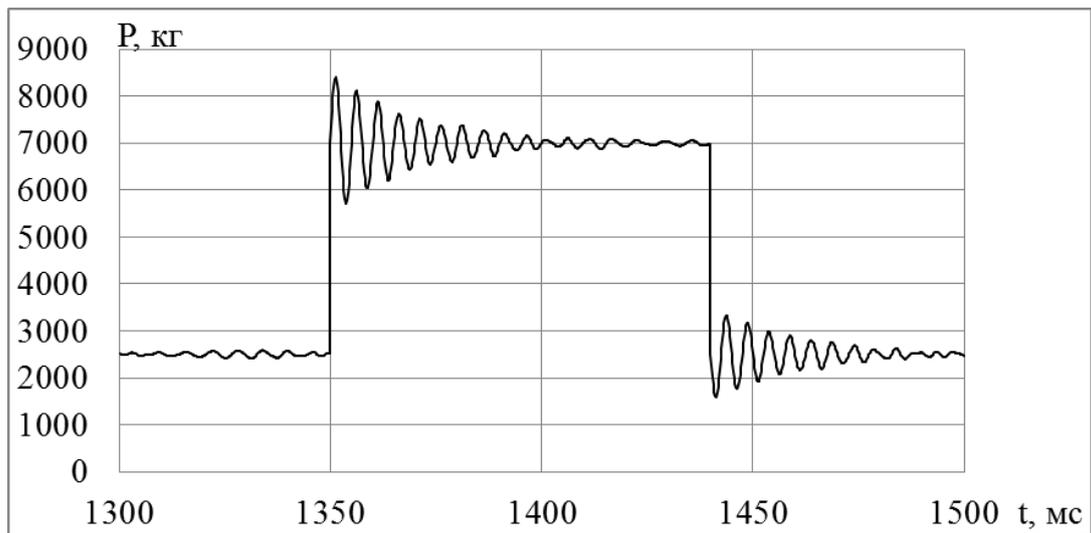


Рис. 1. Сигнал тензометрического датчика при наезде оси вагона на платформу весов

В идеальном случае приведенный на рис. 1 график должен иметь форму прямоугольного импульса с амплитудой, пропорциональной нагрузке на ось вагона. В реальности мы видим наложение на этот импульс низкочастотных затухающих колебаний вагона на рессорах и более высокочастотные колебания платформы весов. Следует отметить, что представленная на рис. 1 форма выходного сигнала получена для случая, когда время проезда оси вагона через платформу весов существенно превышает период основного низкочастотного колебания. На практике время проезда часто соизмеримо с периодом низкочастотных колебаний. При этом в измерительном сигнале будет представлена в явном виде мультипликативная неинформативная составляющая. Кроме того, инструментальные погрешности и различные внешние факторы приводят к появлению аддитивных шумов [7].

Для проведения процедуры фильтрации необходима точная математическая модель сигнала. Однако построение такой модели на практике затруднительно, поскольку в большинстве случаев заранее могут быть известны только приближенные характеристики сигнала и помехи. Поэтому для обеспечения требуемой точности необходимо уточнение параметров (подстройка) фильтра по результатам предварительной фильтрации с его адаптацией к входному воздействию.

Из известных методов обработки сигналов с тензометрических датчиков при динамическом взвешивании высокую точность показывают использование косинусных окон и различные модификации адаптивных методов. Так, по данным, приведенным в работе [8], при измерении веса движущихся объектов погрешность метода косинусных окон в лучшем случае составляет 0,2 %. Точность адаптивных методов зависит от выбранной модели фильтра и степени близости модели к данным измерений, которая определяется порядком алгоритма. Таким образом, по результатам обработки алгоритмом 12-го порядка в работе [9] полу-

чена относительная погрешность взвешивания на уровне 0,1%, что в два раза точнее метода косинусных окон. При этом точность стационарного взвешивания остается на несколько порядков выше. Очевидно, что повышение точности возможно за счет уменьшения инструментальных погрешностей и совершенствования алгоритмов идентификации. Разработка метода параметрической фильтрации на основе уравнения Вольтерры направлено на получение устойчивых решений. Рассмотрим основные его положения.

В общем случае математическую модель весоизмерительной системы можно представить линейным дифференциальным уравнением порядка n :

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = F(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – выходной сигнал, $F(t)$ – функция, зависящая от входного сигнала, a_0, a_1, \dots, a_n – постоянные коэффициенты. Процесс идентификации заключается в нахождении значений постоянных коэффициентов модели и восстановлении вида входного сигнала. В качестве модели, имитирующей картину колебаний на рис. 1, рассмотрим колебательное звено второго порядка:

$$y''(t) + 2\xi\omega_0 y'(t) + \omega_0^2 y(t) = x(t), \quad (2)$$

где $\xi < 1$ – коэффициент затухания, ω_0 – резонансная частота. В данном уравнении величины ξ и ω_0 зависят от массы измеряемого груза. В работе [10] уравнение (2) преобразовано к виду, в котором масса выступает в качестве одного из коэффициентов колебательного звена:

$$a(x - y) = My''(t) + by'(t). \quad (3)$$

Здесь M – масса измеряемого тела, a и b – коэффициенты упругости пружины и коэффициент демпфирования успокоителя, соответственно. Преобразуем уравнение (3) к виду, аналогичному уравнению (2):

$$y''(t) + \frac{b}{M} y'(t) + \frac{a}{M} y(t) = \frac{a}{M} x(t). \quad (4)$$

В уравнении (4) масса входит в состав коэффициентов как для входных, так и для выходных параметров модели колебательного звена, т. е. выражена в неявном виде. Это обстоятельство усложняет задачу оценивания входной величины по ее отклику, поскольку приводит к неустойчивости [11] и некорректным решениям рассматриваемой задачи. Для перевода уравнения (4) в уравнение, имеющее корректное решение, необходимо преобразовать его в интегральное уравнение Вольтерры 1-го рода [12]:

$$y(t) = \int_{t_0}^t K(t-\tau)x(\tau)d\tau, \quad (5)$$

где $K(t)$ – импульсная переходная функция динамической системы (ядро интегрального уравнения), τ – аргумент времени, а t_0 и t задают временной промежуток измерения. Однако решение уравнения (5) также является некорректной задачей, поскольку оно недостаточно устойчиво и требует дальнейших преобразований с целью достижения условий корректности.

Для формирования устойчивого решения задачи идентификации необходимо наложить на уравнение (5) дополнительное условие реализуемости: $K(t) = 0$ при $t < 0$. Получится интегральное уравнение 1-го рода вида:

$$\int_0^t x(t-\tau)K(\tau)d\tau = y(t), t \in [0, T]. \quad (6)$$

Если продифференцировать это уравнение по t и провести некоторые преобразования, то мы перейдем к уравнению Вольтерры 2-го рода [13]

$$K(t) + \frac{1}{x(0)} \int_0^t x'(t-\tau)K(\tau)d\tau = \frac{y'(t)}{x(0)}, t \in [0, T], \quad (7)$$

решение которого является корректной задачей, однако имеет свой ряд трудностей, связанных с погрешностями дифференцирования входного и выходного сигналов весоизмерительной системы.

Результаты

Для проведения эксперимента по динамическому взвешиванию в качестве модели колебаний груза на пружинном подвесе возьмем RLC–цепочку в электрической модели [14].

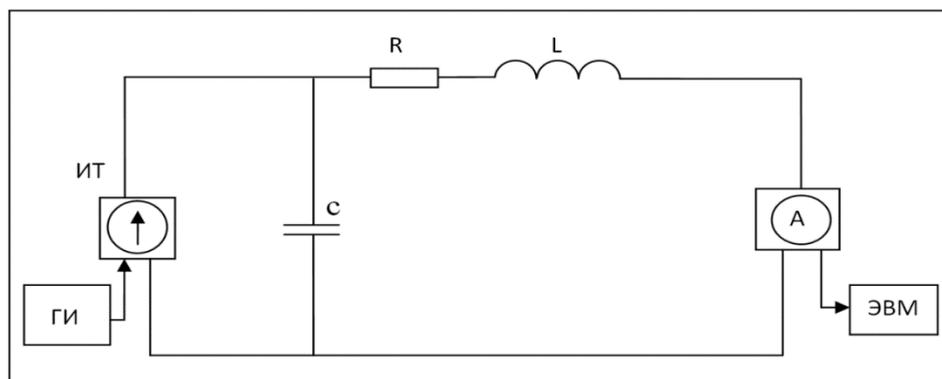


Рис. 2. RLC–модель колебательного звена 2-го порядка

Имитацией силы тяжести в приведенной на рис. 2 модели будет служить источник тока ИТ, массы груза – конденсатор C ; индуктивность L имитирует жесткость пружины, а резистор R – работу сил трения. Амперметр в цепи является аналогом тензометрического датчика. Подбор соотношения электрических и механических параметров выполнен, исходя из временных интервалов обеих систем, соответствующих периоду колебаний и времени затухания сигнала [15]. На рис. 3 приведены графики выходного сигнала с тензометрических датчиков (сплошная линия) и результат его обработки (прерывистая линия).

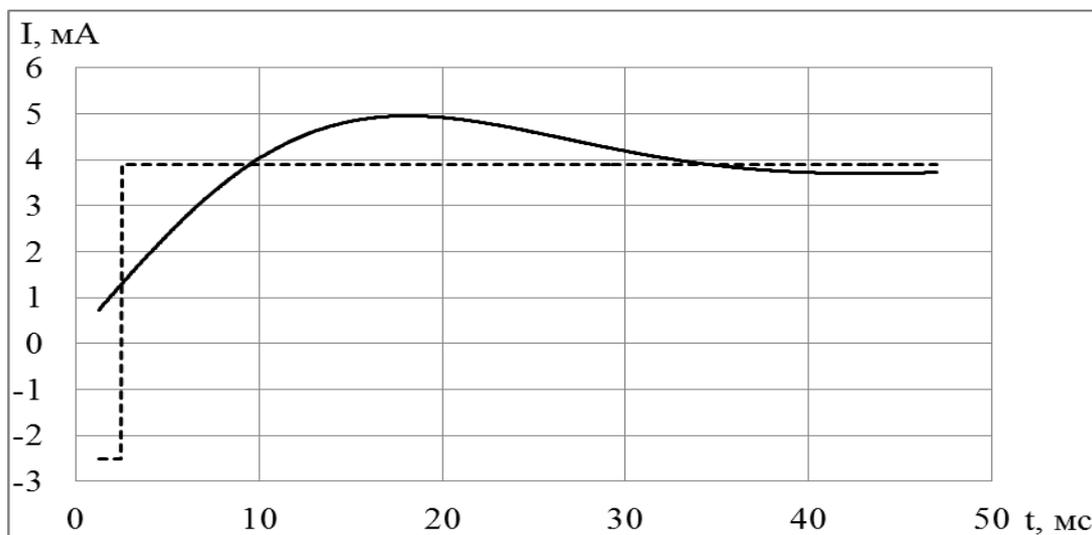


Рис. 3. График зависимости тока в модели (сплошная линия) и результат его обработки (прерывистая линия)

При анализе графиков выходного сигнала и восстановленного после его обработки входного сигнала видно, что применение рассмотренного в настоящей статье алгоритма идентификации позволяет без искажений восстановить информативную составляющую входного сигнала. При этом порядок алгоритма обработки определяется длиной линии задержки КИХ (конечная импульсная характеристика) фильтра.

Следует отметить, что приведенная на рис. 3 модель идеальна, она не учитывает такие всевозможные аддитивные шумы, как наводки, помехи и шум квантования. Для оценки погрешности определения массы, возникающей от перечисленных выше шумов и помех, разработаны различные алгоритмы, рассмотрение которых в рамках настоящей статьи практически невозможно из-за ограничений на ее объем.

Заключение

Проведенные эксперименты с электрической моделью колебательного звена второго порядка показали возможность обработки сигналов тензометрических датчиков весоизмерительных систем при измерении веса железнодорожных

вагонов и автомобильного транспорта методом параметрической идентификации. Преобразование дифференциального уравнения колебаний 2-го порядка к интегральному уравнению Вольтерры 2-го рода при заданных граничных условиях приводит к устойчивым решениям системы алгебраических уравнений. В результате решение этой системы становится корректным. Преимуществом данного метода является также возможность его применения при периодах помехи, больших длины выборки полезного сигнала. Недостаток метода в его относительно трудоемкой реализации, связанной с решением системы уравнений высокого порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айфичер Э., Б. Джервис. Цифровая обработка сигналов: Практический подход : пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. – 992 с.
2. Белокопытов Д. О., Шутеев Э. И. Определение постоянной составляющей сигналов методом адаптации. – НТЖ «Автоматика. Автоматизация. Электрические компоненты и системы». – № 2(22).– Херсон: ХНТУ, 2008.– С.157–163.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : уч. для вузов – СПб.: Питер, 2002.– 608 с.
4. Benesty J. Adaptive signal processing: applications to real-world problems / J. Benesty, Y. (Eds). Huang. – Berlin Heidelberg, New York: Springer–Verlag, 2003.– 356 p.
5. Сергиенко А. Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB // Математика в приложениях. – 2003.–№1(1).– С.18–28.
6. Рачков В. Д., Толстиков А. С. Формирование эквивалентного входного сигнала для идентификации параметров весоизмерительных систем. – Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства». – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2019.– С. 401–406.
7. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей : издание 2-е, переработ. и доп. –Л.: «Энергия», 1972. – 816 с.
8. Малахов В.П. Оценка вычислительной сложности адаптивных алгоритмов на основе метода наименьших квадратов // В.П. Малахов, В.С. Ситников, И.Д. Яковлева / Труды Одесского политехнического университета. – 2007. – Вып. 2(28) 1.– С.45–52.
9. Зеленский С. В. Некоторые особенности измерения веса движущихся объектов / С. В. Зеленский, В. А. Зеленский, В. В. Осколков – М.: РИА «Стандарты и качество». Мир Измерений.–2003.– №3. – С.175–183.
10. Теория автоматического управления. Ч. 1. / Под ред. А. В. Нетушила.– М.: Высшая школа, 1967. – 424 с.
11. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения, 4-е изд. –М., 1974, 331 с.
12. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев : Наукова думка, 1986.
13. Воскобойников Ю. Е. Устойчивые алгоритмы непараметрической идентификации динамических систем. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2019. – 160 с.
14. Борисов Ю. М. Электротехника. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
15. Кузьмичев Д. А., Радкевич И. А., Смирнов А. Д. «Автоматизация экспериментальных исследований». Учебное пособие – М.: Наука, 1983. – 392 с.

© В. Д. Рачков, В. М. Тиссен, 2021