

УДК 681.513.6

Д.О. Белокопытов,  
Э.И. Шутеев, канд. техн. наук

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗВЕШИВАНИИ

**Аннотация.** Рассмотрен способ обработки данных, полученных с тензометрических датчиков при динамическом взвешивании таких объектов, как груз на подвесе, автомобиль или железнодорожный состав, проезжающий через платформу весов, методом их адаптивной идентификации. Приведено аналитическое изложение метода адаптивной идентификации, позволяющего получить согласованную модель исследуемой динамической системы. Изложены результаты, полученные в процессе физического моделирования.

**Ключевые слова:** динамическая система, адаптивная фильтрация, динамическое взвешивание, аддитивный шум, мультипликативный шум.

D.O. Bilokopytov,  
E.I. Shuteev, Ph.D

### DYNAMIC WEIGHTING BY USING ADAPTIVE IDENTIFICATION

**Abstract.** The adaptive identification method for processing a data obtained from strain gauges as result of dynamic weighing objects, such as load on the suspension, car or train passing through the weighing platform. The analytical method of adaptive identification, which allows to obtain a consistent model of the dynamical system under study. Reflected in the obtained results of physical modeling.

**Keywords:** dynamical system, adaptive filtering, dynamic weighing, additive noise, multiplicative noise.

Д.О. Білокопитов,  
Е.І. Шутеев, к-т техн. наук

### ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПІД ЧАС ДИНАМІЧНОГО ЗВАЖУВАННЯ

**Анотація.** Розглянуто спосіб обробки даних, отриманих з тензометричних датчиків під час динамічного зважування таких об'єктів, як вантаж на підвісі, автомобіль або потяг, який проїжджає через платформу терез, методом адаптивної їх ідентифікації. Наведено аналітичне викладення методу адаптивної ідентифікації, що дає змогу отримати узгоджену модель досліджуваної динамічної системи. Викладено результати, отримані в процесі фізичного моделювання.

**Ключові слова:** динамічна система, адаптивна фільтрація, динамічне зважування, аддитивний шум, мультипликативний шум.

**Введение.** При взвешивании движущихся объектов на тензометрических весах проблема повышения точности взвешивания обусловлена динамическими процессами в весоизмерительной системе. Электромеханическая часть весоизмерительной системы состоит из движущегося объекта, весовой платформы и тензометрических датчиков. Сигналы, полученные с тензометрических датчиков, являются зашумленными или искаженными, что в большинстве случаев не позволяет получить результат с требуемой точностью. Искажение связано с внутренними деформациями и колебаниями отдельных частей взвешиваемого объекта, а зашумление является следствием инструментальных погрешностей, различных наводок и шумов.

Источниками упомянутых колебаний при динамическом взвешивании ж/д вагонов являются: жесткость рессор, неровность

пути, овальность колес, выбоины в рельсах и колесах, ветровая нагрузка, колебания груза и т. д. Эти колебания представляет собой низкочастотную периодическую помеху, диапазон которой 3–10 Гц. Частотный диапазон этой помехи, не зависит от конкретной конструкции весов, а зависит в основном от динамических свойств железнодорожных вагонов или автомобиля. Тем не менее, амплитуда такой помехи зависит от жесткости и массы механической части весоизмерительной системы [4].

В динамических весах, весоизмерительная система которых строится на четырех силоизмерительных преобразователях, амплитуда помехи достигает 5–10 % от постоянной составляющей, пропорциональной массе вагона, в то время как на весах, построенных на одном силоизмерительном преобразователе, амплитуда помехи достигает 10–20 % [4].

© Белокопытов Д.О., Шутеев Э.И., 2012

На рис. 1 приведен реальный сигнал, снятый с тензометрического датчика при прохождении через платформу весов железнодорожного состава. В идеальном случае характеристика должна представлять собой прямоугольный импульс с амплитудой, пропорциональной нагрузке на ось вагона. Однако полученная характеристика – это затухающие гармонические колебания самого вагона на рессорах и более высокочастотные колебания платформы весов.

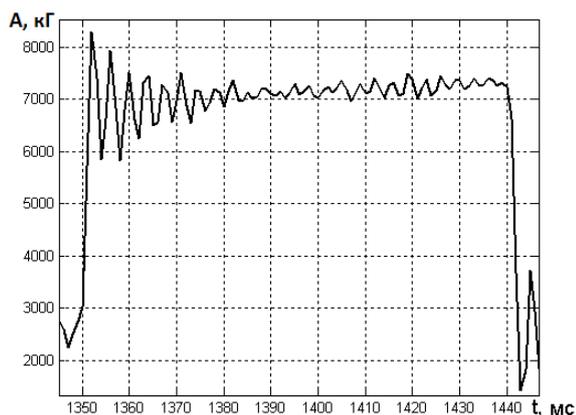


Рис. 1. Сигнал тензометрического датчика при наезде оси вагона на платформу весов

Известны методы обработки сигналов с тензометрических датчиков при динамическом взвешивании: математическое усреднение (интегрирование), фильтрация низких частот, применение косинусных окон [4].

При фильтрации [1, 7, 8] необходимо точно знать либо то, что требуется получить, либо то, что требуется удалить из сигнала. Однако когда речь идет о динамических системах заранее, предположить что-либо точно нельзя, поскольку определены только общие черты сигнала и помехи. Поэтому, применяя фильтрацию к динамическим системам, в большинстве случаев для получения результата с ожидаемой точностью возникает необходимость подстройки фильтра в процессе фильтрации, т.е. его адаптации к входному воздействию.

Наилучшую точность дает использование косинусных окон, при измерении веса движущихся объектов погрешность составляет порядка 0,2 % при условии, что длина серии выборок превышает период помехи. В свою очередь, длина серии выборок зависит от скорости движения объекта через весовую

платформу. Точность стационарного взвешивания на несколько порядков выше, следовательно, актуальной является задача повышения точности получения параметров динамических систем взвешивания при сохранении достаточно высокой скорости движения объектов.

В статье рассматривается возможность и различные аспекты применения адаптивной идентификации при динамическом взвешивании для повышения точности определения веса. Результатом использования метода адаптивной идентификации динамических систем является согласованная по параметрам и структуре модель весоизмерительной системы, позволяющая сформировать исковую информативную составляющую сигнала.

**Анализ сигналов динамических систем.** При определении какого-либо параметра динамической системы, в измерительном сигнале информативная составляющая не будет представлена в явном виде. Динамика системы вносит в мультипликативную часть сигнала неинформативную составляющую. Кроме того, в результате инструментальной погрешности измерения и воздействия на исследуемый объект различных внешних факторов, в сигнале присутствуют аддитивные шумы. На рис.2 приведена структура сигнала динамической системы и выделены пунктирной линией составляющие, используемые при его обработке известными методами.

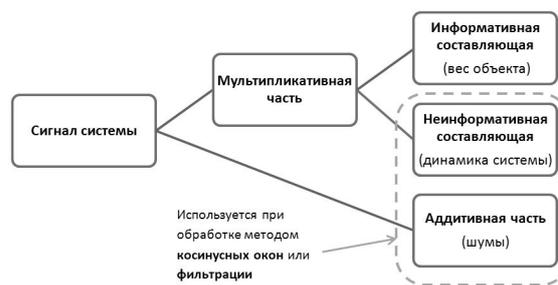


Рис. 2. Использование структуры сигнала динамической системы при обработке известными методами

Чтобы более точно получить информативную составляющую сигнала, необходимо свести к минимуму влияние неинформативной составляющей мультипликативной части и удалить из сигнала аддитивные шумы.

Методы удаления аддитивной части достаточно изучены и схожи для систем различных классов и типов. Это всевозможное улучшение аппаратных средств: помехозащищенность, увеличение разрядности АЦП и обрабатываемых данных [1, 7, 8].

Выделения из сигнала информативной составляющей мультипликативной части - это сложная теоретическая задача, решаемая на практике принципиально различными методами. При построении динамических весоизмерительных систем, такая задача является весьма актуальной, решить ее можно используя описанный далее метод адаптивной идентификации [2, 8].

На рис. 3 приведена структура сигнала динамической системы и выделены пунктирной линией составляющие, используемые при его обработке методом адаптивной идентификации. Существенное отличие предложенного метода от применяемых ранее, в том, что на основе полученной в процессе идентификации согласованной модели весоизмерительной системы формируется информативная составляющая сигнала. Для получения согласованной модели исходной системы используются все составляющие сигнала (рис. 3). Существующие методы, основанные на фильтрации или косинусных окнах, вырезают с определенной точностью из исходного сигнала все лишнее, при этом обработка ведется по частотным характеристикам мультипликативной динамики системы и аддитивных шумов (рис. 2).



Рис. 3. Использование структуры сигнала динамической системы при обработке методом адаптивной идентификации

Рассмотрим метод адаптивной идентификации и целесообразность его применения к обработке данных динамического взвешивания.

**Описание метода адаптивной идентификации.** На рис.4 приведена структурная схема адаптивной идентификации систем.

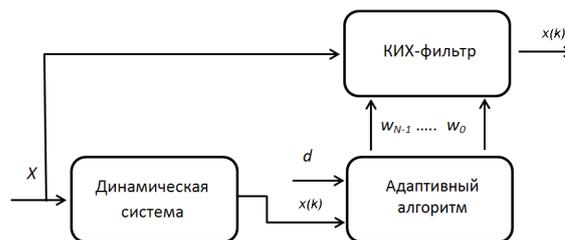


Рис. 4. Структурная схема адаптивной идентификации систем

При последовательно включенном адаптивном фильтре (рис.4) происходит обратная идентификация системы, т.е. по выходному воздействию адаптивный фильтр идентифицирует исходную систему. После окончания процесса адаптации адаптивный фильтр будет являться моделью исходной динамической системы в форме разностного уравнения. Используя коэффициенты адаптивного фильтра, получим КИХ-фильтр. Так как полученный КИХ-фильтр является моделью исходной динамической системы, то подав на его вход исходное воздействие  $X$ , на выходе получим зашумленный сигнал  $x(k)$ .

Для работы адаптивного фильтра необходим образцовый сигнал. Учитывая, что на интервале измерения информативная составляющая сигнала неизменна, в качестве образцового сигнала, можно использовать константу  $d$ . Сделав такую замену, необходимо понимать, что вместо модели исходной системы адаптивный фильтр сформирует так называемую согласованную модель, пропорциональную исходной. Следовательно, теперь, подав на вход этой модели образцовый сигнал  $d$ , на выходе получим исходное воздействие  $X$  (рис. 5).

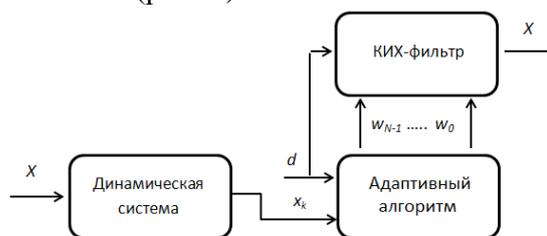


Рис. 5. Структурная схема получения результата методом адаптивной идентификации

Информативная составляющая  $X$ , являющаяся на интервале измерения константой, исходя из разностного уравнения, описывающего согласованную модель системы, вычисляется по формуле КИХ-фильтра

$$X = \frac{1}{\sum_{i=0}^{N-1} w(i)d} . \quad (1)$$

В основе изложенного метода лежит алгоритм адаптации. Существует большое число различных адаптивных алгоритмов, каждый из которых наиболее оптимален для решения тех или иных задач [5]. Для решения поставленной проблемы наиболее хорошо подходит детерминированная задача оптимизации, опирающаяся на фильтр Винера. Сформулируем задачу адаптивного алгоритма так: необходимо отыскать такие коэффициенты фильтра  $w$ , чтобы норма ошибки воспроизведения образцового сигнала была минимальной:

$$J(w) = \sum_{k=0}^{K-1} |e(k)|^2 \rightarrow \min , \quad (2)$$

где  $e(k)$  – ошибка воспроизведения образцового сигнала

$$e(k) = d(k) - y(k) , \quad (3)$$

$d(k)$  – отсчеты образцового сигнала,

$y(k)$  – выходной сигнал адаптивного фильтра

$$y(k) = \mathbf{u}^T(k) \mathbf{w} ; \quad (4)$$

$\mathbf{u}(k)$  – вектор–столбец входных отсчетов

$$\mathbf{u}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N)]^T , \quad (5)$$

$\mathbf{w}$  – вектор–столбец весовых коэффициентов

$$\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_N]^T . \quad (6)$$

Перейдя к матричной записи вдоль координаты  $k$  и после соответствующих подстановок преобразовав выражения, получим формулу для оптимального решения

$$\mathbf{w} = (\mathbf{U}\mathbf{U}^T)^{-1} \mathbf{U}\mathbf{d} , \quad (7)$$

где  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), \dots, \mathbf{u}(K-1)]$ ,

$\mathbf{U}\mathbf{U}^T$  – ковариационная матрица содержимого линий задержки сигнала [6].

Полученные по формуле (7) весовые коэффициенты фильтра используем при подстановки в формулу (1), а в качестве образцового сигнала для упрощения  $d$  берем единичный сигнал. Выбранный адаптивный алгоритм является наиболее простым с точки зрения построения математической модели,

кроме него есть и другие адаптивные алгоритмы, подходящие для решения данной задачи. Например, применение адаптивного алгоритма Калмана при динамическом взвешивании рассмотрено нами в работе [2].

#### Моделирование изложенного метода.

Предложенный в работе метод адаптивной идентификации составляющих сигналов динамических систем опробуем на электрической модели [3], поскольку электрические динамические системы доступны к моделированию, просты к пониманию специалистам электротехнических специальностей и весьма распространены в современной технике и быту.

Если проводить аналогию между электрической и механической системами, то электрическая емкость соответствует массе, индуктивность – жесткости, электрическое сопротивление – потерям на трение, напряжение – скорости, а электрический ток – механической силе. Аналогично заменяются и все остальные электрические величины механическими [3]. Также электрические законы и формулы по своей сути вполне соответствуют механическим, да и не только механическим, а повторяются во всех областях физики, в экономике, природе и т.д. Следовательно, методы применимые к моделям электрических систем, будут применимы и к системам других видов.

Исходя из практической задачи динамического взвешивания, в качестве исследуемой модели возьмем груз на пружинном подвесе, заменяемый RLC-цепочкой в электрической модели [3]. Источник тока будет имитировать силу тяжести, конденсатор – массу, индуктивность – жесткость пружины, резистор – трение. А амперметр в цепи индуктивности соответствует тензومترическому датчику, измеряющему вес. Подбор соотношения электрических и механических параметров провели исходя из временных интервалов, присущим обеим системам, а именно: период колебаний и постоянная времени затухания.

Для моделирования интерес представляют системы 2-го и 4-го порядков, так как груз на подвесе является системой 2-го порядка, а динамическое взвешивание катящихся объектов в грубом приближении –

системой 4-го порядка. На рис. 6 приведена RLC-модель 2-го порядка, построенная в пакете математического моделирования.

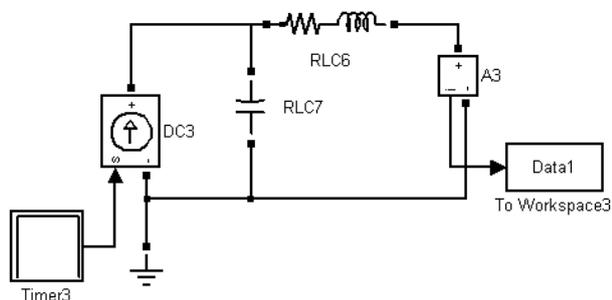


Рис. 6. RLC- модель 2-го порядка

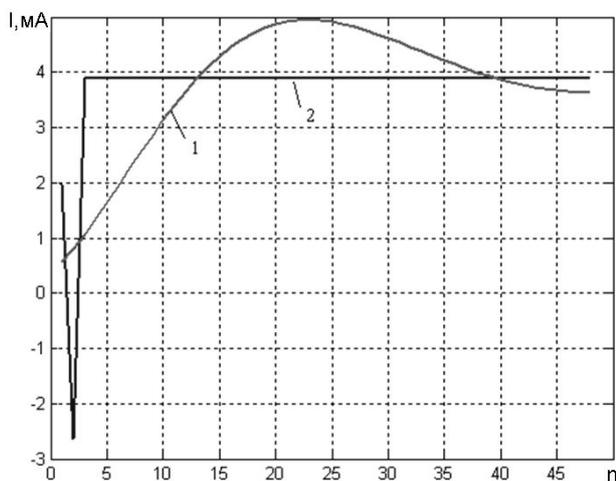


Рис. 7. График зависимости тока в модели от номера выборки: 1 – измеренное значение, 2 – результат обработки методом адаптивной идентификации (порядок алгоритма  $N=3$ )

Как видно из рис. 7, на котором изображен график зависимости тока в модели от номера выборки и результат его обработки, метод адаптивной идентификации позволяет точно восстановить информативную составляющую сигнала. Порядком алгоритма обработки является длина линии задержки КИХ-фильтра, по этой причине порядок алгоритма на единицу больше порядка соответствующей ему модели динамической системы.

Приведенная на рис. 6 модель идеальна, она не учитывает такие всевозможные аддитивные шумы, как наводки, помехи и шум квантования. Введение таких шумов в модель может неоднозначно повлиять на ре-

зультат вычислений. Однако, положительный эффект будет в том, что незначительное изменение выборок за счет аддитивных шумов сделает ковариационную матрицу менее вырожденной. А это, в свою очередь, позволит использовать адаптивные алгоритмы больших порядков, превышающих порядок исследуемой системы. Использование алгоритмов завышенных порядков недопустимо для систем без аддитивных шумов из-за плохой обусловленности в таких случаях ковариационной матрицы.

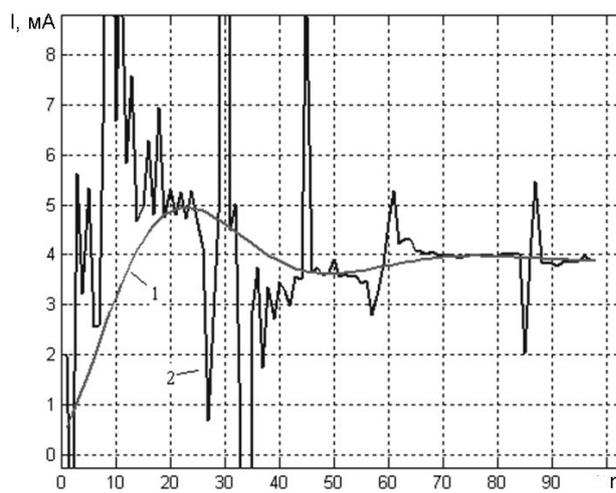


Рис. 8. График зависимости тока в модели от номера выборки: 1 – измеренное значение, 2 – результат обработки (порядок алгоритма  $N=3$ )

Введем в исследуемые электрические модели аддитивный белый шум, уровень которого находится в диапазоне  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ , что составляет примерно 0,01 % от полезного сигнала. На рис.8 приведен график зависимости тока в модели 2-го порядка с шумом и результат его обработки алгоритмом 3-го порядка.

Как видно из рис.8, применение к модели 2-го порядка с шумами алгоритма 3-го порядка не дает достоверного результата. На рис. 9 приведены результаты обработки этих же данных алгоритмом 12-го порядка; рассчитав относительную погрешность, можно сделать вывод, что после незначительной коррекции или усреднения результат вычислений будет укладываться в заданные пределы точности 0,1 %.

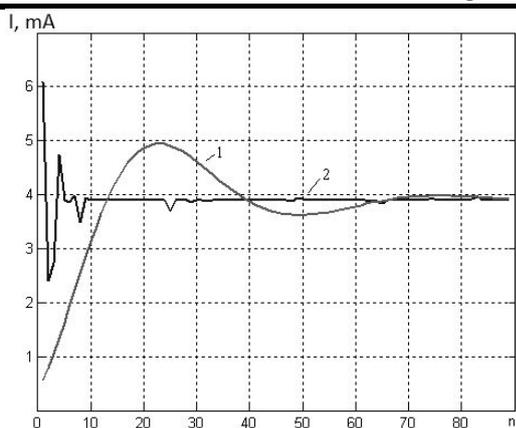


Рис. 9. График зависимости тока в модели от номера выборки: 1 – измеренное значение, 2 – результат обработки (порядок алгоритма  $N=12$ )

Так как реальные системы обладают аддитивными шумами, да и к тому же не всегда достаточно точно известен их порядок, можно сделать вывод, что применение алгоритма адаптивной идентификации, порядок которого в несколько раз превышает предполагаемый порядок такой системы, позволит получить результат с требуемой точностью.

**Апробация метода на физической модели.** На рис.10 показан экспериментальный стенд для определения массы подвешенного на резиновом жгуте груза.

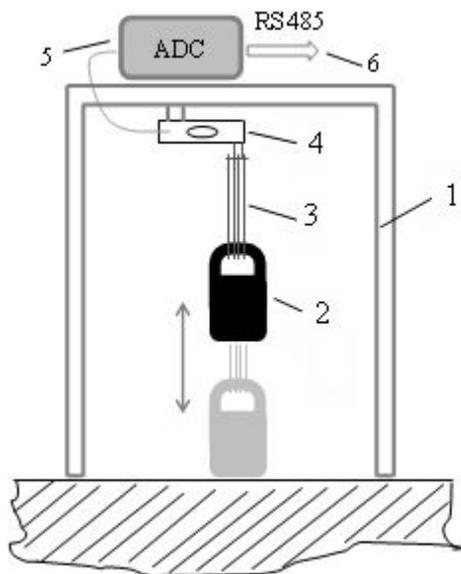


Рис. 10. Экспериментальный стенд для определения массы колеблющегося груза: 1 – рама; 2 – гиря; 3 – резиновый подвес; 4 – тензометрический датчик; 5 – аналогово-цифровой блок; 6 – последовательный интерфейс

При вертикальном колебании данную установку можно рассматривать как динамическую систему 2-го порядка.

В качестве АЦП используется готовый промышленный модуль AED9101B (рис.11) фирмы HBM, Germany. Модуль оснащен последовательным интерфейсом RS485. Данные с интерфейса RS485 через USB преобразователь подаются для дальнейшей обработки на компьютер.



Рис. 11. Базовое устройство AED9101B

Полученный с тензометрического датчика сигнал и результаты его обработки показаны на рис. 12 и 13 соответственно. На рис.13 изображена зависимость относительной погрешности результатов вычислений по методу адаптивной идентификации от порядка фильтра и для сравнения приведен результат полученные с помощью косинусного окна. Порядок фильтра изменялся в диапазоне от 10 до 120. Исходя из порядка, количество обрабатываемых выборок бралось вдвое больше, чтобы полностью заполнить матрицу линий задержки фильтра.

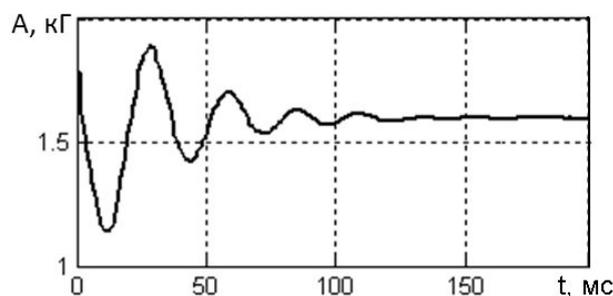


Рис. 12. Сигнал, полученный с тензометрического датчика

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что метод адаптации дал результат с точностью порядка 0,01 %. И как видно из графиков зависимости относительной погрешности от порядка фильтра рис. 13 превзошел метод косинусных окон вдвое.

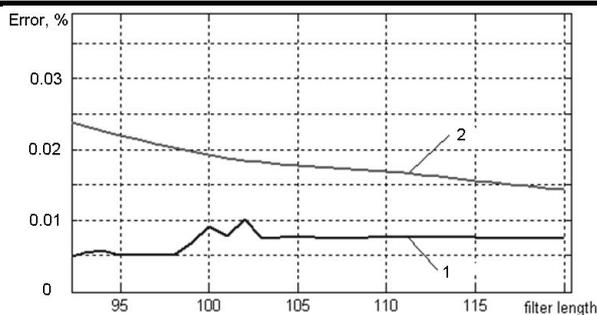


Рис. 13. Относительная погрешность обработки данных:

- 1 – методом адаптивной идентификации,  
 2 – косинусным окном

По аналогии с проведенным экспериментом была собрана модель динамических автомобильных весов (рис. 14).

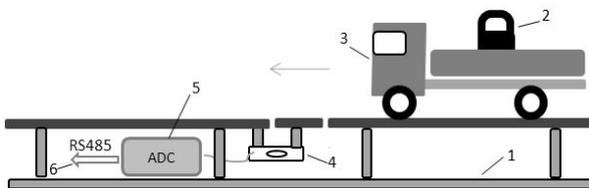


Рис. 14. Экспериментальный стенд для определения массы катящегося объекта:

- 1 – рама; 2 – гиря; 3 – модель грузовика;  
 4 – тензометрический датчик; 5 – аналогово-цифровой блок;  
 6 – последовательный интерфейс

На рис. 15 показаны сигналы с датчика при проезде модели автомобиля. Каждый из приведенных сигналов характеризуется своей скоростью проезда модели автомобиля, от верхнего к нижнему сигналу скорость увеличивается.

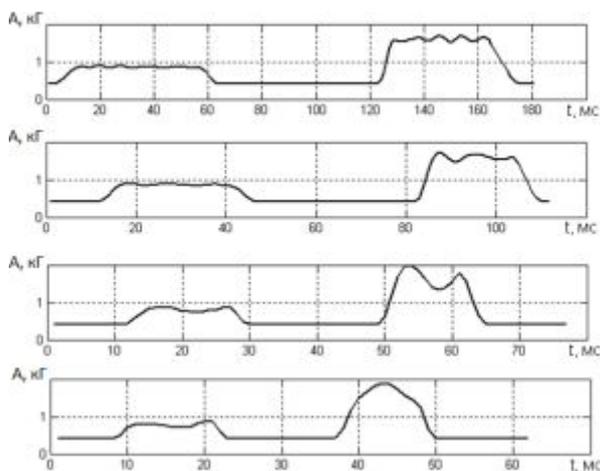


Рис. 15. Графики взвешивания модели автомобиля в динамике

Обработав приведенные сигналы, получили результат с относительной погрешностью в диапазоне от 0,1 до 16 %. Очевидно, что часть экспериментов была проведена при более благоприятных для обработки условиях. Исходя из теории метода, для снижения относительной погрешности результата в данном эксперименте необходимо увеличить частоту дискретизации, однако этого не позволила сделать используемая аппаратура.

**Выводы.** По проведенным экспериментам с электрическими и физическими моделями была изучена возможность обработки сигналов тензометрических датчиков весоизмерительных систем методом адаптивной идентификации.

Преимуществом данного метода является возможность его применения при периодах помехи, больших длины выборки полезного сигнала. Погрешность метода адаптации при моделировании составляет порядка 0,1%, что в несколько раз меньше погрешности метода косинусных окон для этих же моделей. При моделировании параметры были заданы таким образом, чтобы модели имитировали наихудшие из возможных для реальной системы условия.

Недостаток метода в его относительно трудоемкой реализации, связанной с решением системы уравнений высокого порядка. Хотя при современных скоростях обработки данных во многих случаях его трудоемкость не будет существенным недостатком и не скажется на времени получения конечного результата.

#### Список использованной литературы

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: Практический подход: пер. с англ/ Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2008. – 992 с.
2. Белокопытов Д.О. Определение постоянной составляющей сигналов методом адаптации / Д.О. Белокопытов, Э.И. Шутеев // НТЖ «Автоматика. Автоматизация. Электрические компоненты и системы», Херсонского национального технического университета. – № 2(22). – 2008. – С.157–163.
3. 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.

4. Зеленский С.В. Некоторые особенности измерения веса движущихся объектов / С.В. Зеленский, В.А. Зеленский, В.В. Осолков – М.: РИА «Стандарты и качество» Мир Измерений. – 2003. – № 3. – С.175-183.

5. 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.

6. Сергиенко А.Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB // Математика в приложениях. – 2003. – № 1(1). – С.18–28.

7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: уч. для вузов / А.Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

8. 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. Malakhov V.P., Sitnikov V.S., Yakovleva I.D. Evaluation of computational complexity of adaptive algorithms based on the method of least squares / Proceedings of the Odessa Polytechnic University/ – 2007. – Vol.2(28)1. – P.45–52 [in Russian].

6. Sergienko A.B. Algorithms for adaptive filtering: an implementation in MATLAB // Mathematics in the application. – 2003. – № 1(1). – P.18–28 [in Russian].

7. Sergienko A.B. Digital Signal Processing: uch. for schools. – St.Peter: – 2002, – 608 p. [in Russian].

8. Benesty J., Huang Y. (Eds). Adaptive signal processing: applications to real-world problems. – Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2003. – 356 p. [in English].

Получено 22.02.2012

### References

1. Ayficher E. , Jervis B. Digital processing of signals: A Practical Approach: transl.with English. – Moscow: Publ. house "Wilyam", 2008. – 992 p. [in Russian].

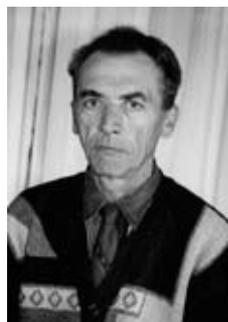
2. Belokopytov D.O., Shuteev E. I. Determination of constant component signal byadapting STJ "Automation. Automation. The electrical components and systems " Kherson National Technical University. – № 2 (22). – 2008. – P.157–163 [in Russian].

3. Borisov Y.M., Lipatov D.N. , Zorin Y. N. Electrical Engineering. Textbook for high schools nick. 2nd ed., Reservant. and add. – Moscow: Enorgoatomizdat, 1985. – 552 p. [in Russian].

4. Zelensky S.V., Zelensky V.A., Oscolkov V.V. Some singularities weight measurements of moving objects. –Moscow: RIA "Standards and Quality". The World of Measurements. – 2003. – № 3. – P.175-183 [in Russian].



Белокопытов  
Дмитрий Олегович,  
ассистент каф. компьютерных систем  
Одесск. нац. политехн. ун-та,  
т. (+38048) 770-31-62  
E-mail: blkptv@rambler.ru



Шутеев  
Эдуард Иванович,  
канд. техн. наук, доцент  
каф. компьютерных систем  
Одесск. нац. политехн. ун-та