

А.О. Коломеец, В.С. Выплавень

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
ЛИНЕЙНОЙ СВЕРТКОЙ И ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА

Приведены результаты сравнительного анализа временных параметров алгоритмов фильтрации сигналов тензометрического контроля железнодорожного подвижного состава. Фильтрация исходных сигналов проводилась двумя способами: алгоритмом линейной свертки и фильтром Калмана. Способы фильтрации реализованы на языке программирования С# и встроены в специализированное программное обеспечение в виде динамически подключаемой библиотеки. После реализации проведены исследования длительности обработки одинаковых наборов данных обоими алгоритмами. Построены зависимости временных параметров обработки от количества данных для каждого алгоритма.

*Ключевые слова:* деформации, свертка, фильтр Калмана, контроль колес в движении, дефект поверхности катания.

A.O. Kolomeets, V.S. Vyplaven'

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TIME PARAMETERS  
FOR THE STRAIN GAUGE SIGNAL PROCESSING METHODS:  
LINEAR CONVOLUTION AND KALMAN FILTER

The article describes comparative analysis results of the signal filtering algorithms time parameters for the railway rolling stock strain gauge control. Signal filtering was carried out by two algorithms: linear convolution and Kalman filter. Filtering methods implemented in the C# programming language as a dynamic link library and built into the specialized software. After that, signal processing time for both algorithms have been tested on the equivalent data sets. The depending between processing time and amount of data parameters were built for each algorithm.

*Keywords:* deformation, linear convolution, Kalman filter, wheels control in motion, defects in the running surface.

*Введение*

Анализ сигналов неразрушающего контроля опасных производственных объектов имеет большое значение при решении широкого спектра технических задач. Одним из этапов анализа является выявление информативных параметров на основе поступающей входной информации. Тензометрический метод контроля опасных производственных объектов используется для измерения напряжений в металлических конструкциях и объектах при воздействии на них статических и динамических сил [9]. Одним из примеров использования тензометрического метода контроля является измерение деформаций рельса при движении по нему железнодорожного подвижного состава [2]. Таким способом производятся контроль поверхности катания колес грузовых вагонов и выявление на ней опасных дефектов. Анализ сигналов тензометрического контроля поверхности ката-

Коломеец А.О., Выплавень В.С. Сравнительный анализ временных параметров...

ния колес грузовых вагонов производится после прохождения состава по измерительному участку. В основу алгоритмов обработки заложены методы спектрального и корреляционного анализа [4]. Так как такие методы являются периодическими (оконными), то существует проблема со временем обработки сигналов и количеством вычислительных ресурсов, необходимых для анализа. В работе исследуются возможности применения метода фильтрации Калмана для анализа информативных параметров сигналов тензометрического контроля.

### Методы измерений

Измерение деформаций шейки рельса проводилось с помощью проволочных тензорезисторов (тензодатчиков) (рис. 1). Тензодатчики устанавливались симметрично на обеих сторонах шейки рельса (рис. 2). Центр базы тензодатчиков находился на уровне нейтральной линии шейки на высоте 120 мм от подошвы рельса. При проезде по измерительному участку колесных пар подвижного состава происходило деформирование рельса. Деформации регистрировались тензодатчиками, установленными в семи сечениях рельса. На основе зарегистрированных сигналов вычислялись симметричные деформации.

Сигнал симметричных деформаций шейки рельса, зарегистрированный на одной паре датчиков, вычислялся по методу Шлюмпфа [6], который описывается выражением (1):

$$D_k = \frac{(D_k^{in} + p^{in}) + (D_k^{out} + p^{out})}{2}, \quad (1)$$

где  $D_k^{in}$  – сигнал деформаций, зарегистрированный с датчиков, установленных с внутренней стороны шейки рельса, отн. ед.;  $D_k^{out}$  – сигнал деформаций, зарегистрированный с датчиков, установленных с наружной стороны шейки рельса, отн. ед.;  $p^{in}$ ,  $p^{out}$  – погрешность измерений датчиков, установленных соответственно с внутренней и наружной стороны шейки рельса, отн. ед.;  $k$  – номер отсчета данных.

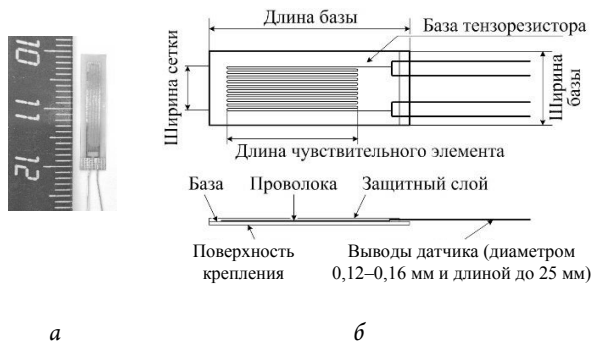


Рис. 1. Проволочный тензодатчик:  
а – фотография; б – конструкция

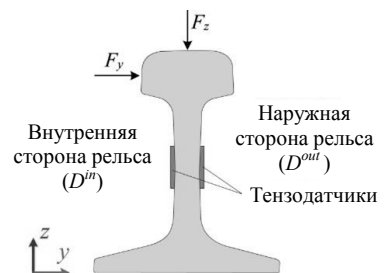
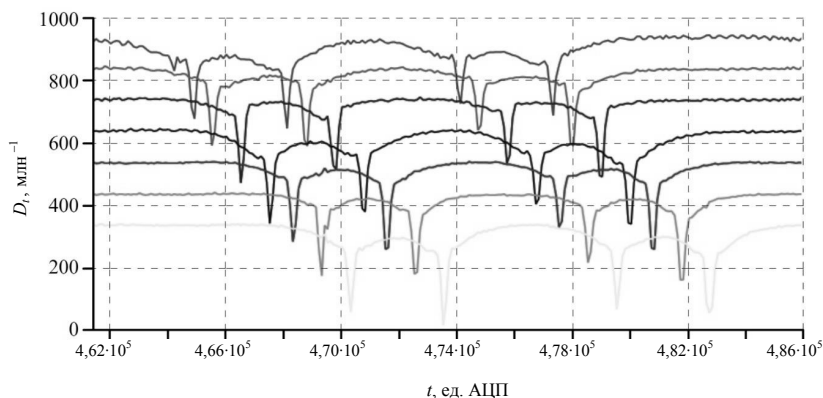


Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков на шейке рельса

На рисунке 3 показан фрагмент зависимости (сигналы) симметричных деформаций от времени при проезде четырех колесных пар по всему измерительному участку. По сигналам симметричных деформаций в специализированном программном обеспечении [7] происходит поиск и вычисление информативных параметров взаимодействия колес и рельсов. По амплитудным параметрам вычисляется сила воздействия каждого колеса на

рельс, а по временным – линейные параметры дефектов поверхности катания (при наличии). Ассоциация дефекта поверхности катания с реальным колесом производится по порядковому номеру колесной пары. Номера колесных пар определяются с помощью порогового метода. Вычисление информативных параметров дефектов поверхности катания (амплитудных и временных) производится с помощью специализированных алгоритмов, описанных в работе [1].

В результате опытной эксплуатации выявлено, что сигналы симметричных деформаций содержат помехи разной природы. Поэтому перед вычислением информативных параметров необходимо получить полезный сигнал с низким уровнем помех.



**Рис. 3.** Зависимость сигналов симметричных деформаций от времени при проезде подвижного состава по диагностическому участку

В специализированном программном обеспечении [7] первичная фильтрация сигналов осуществляется с помощью алгоритма линейной свертки. В общем виде алгоритм линейной свертки сигналов тензометрического контроля описывается выражением (2):

$$C_i = \sum_{j=1}^T \frac{D_{i+j} E_j}{T}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – значение сигнала, полученное после операции свертки, отн. ед.;  $D_{i+j}$  – исходное значение сигнала, млн<sup>-1</sup>;  $E_j$  – значение эталонной функции, отн. ед.;  $T$  – период эталонной функции, с.

В качестве эталонной функции выбран один период тригонометрической функции косинус [5]. Функция косинус наилучшим образом коррелировала с сигналом локальных деформаций, создаваемых при проезде колеса над чувствительной зоной тензодатчиков. Эталонная функция, по которой проводилась свертка, представлена выражением (3):

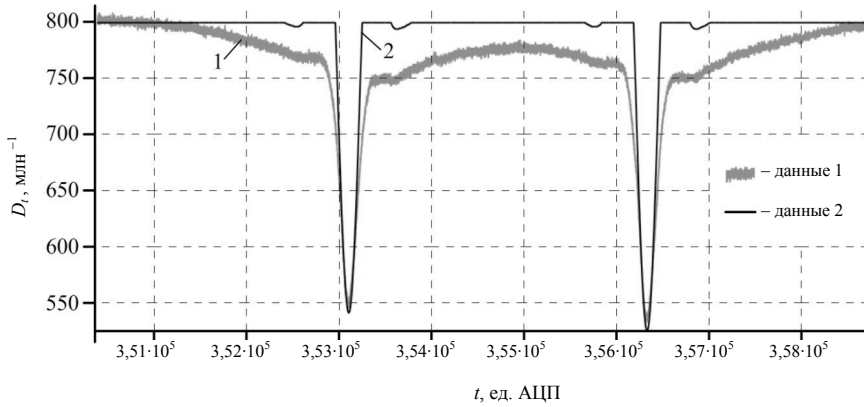
$$E_j = \cos \frac{2\pi j}{Tf}, \quad (3)$$

где  $j = \overline{1, m}$  для  $m = Tf$ ;  $f$  – частота квантования АЦП, Гц.

Алгоритм линейной свертки заключается в последовательном перемножении значений исходного сигнала на значения эталонной функции и суммировании результатов произ-

Коломеец А.О., Выплавень В.С. Сравнительный анализ временных параметров...

ведения для получения значения результирующей функции свертки. Результат работы алгоритма линейной свертки приведен на рисунке 4.



**Рис. 4.** Зависимость симметричных деформаций от времени до (1) и после (2) фильтрации линейной сверткой

На графиках (см. рис. 4) видно, что полезная высокочастотная составляющая сигнала выделяется из общего сигнала и в последующем служит для определения порядкового номера колесной пары. Неинформативные компоненты сигнала (меньше заданного минимального уровня) приводятся к нулевому значению. Ввиду большого количества исходных данных проведение фильтрации требует значительных затрат вычислительных и временных ресурсов, поэтому дальнейшая работа была направлена на рассмотрение возможности применения других методов фильтрации.

#### Фильтрация по методу Калмана

Одним из первых исследованных методов являлся метод Калмана. Рассмотрим особенности фильтрации сигнала симметричных деформаций шейки рельса согласно этому методу. При фильтрации сигнала по данному методу используются динамические свойства системы, данные управляющего воздействия и массив измерений величины для формирования оптимальной оценки состояния. При вычислении текущего значения искомой величины ( $k$ ) алгоритм Калмана производит два действия. На первом производится предсказание следующего ( $k + 1$ ) значения величины с учетом погрешности  $p$ . Следующим действием алгоритм производит корректировку предсказанного значения с учетом неточности измерения [3].

В общем виде для сигнала симметричных деформаций  $D_k$  первое действие алгоритма (предсказание), состоящее из предсказания состояния системы и ошибки ковариации, описывается выражениями (4.1)–(4.2) соответственно:

$$\hat{D}_k^- = F\hat{D}_{k-1} + B_{k-1}, \quad (4.1)$$

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q, \quad (4.2)$$

где  $\hat{D}_k^-$  – предсказанное значение симметричных деформаций в текущий момент времени, отн. ед.;  $P_k^-$  – предсказанное значение ошибки ковариации.

На следующем шаге (корректировка) алгоритм производит вычисление усиления Калмана (*Kalman Gain*), обновление оценки с учетом измерения и обновление ошибки ковариации. Эти шаги описываются выражениями (5.1)–(5.3) соответственно:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}, \quad (5.1)$$

$$\hat{D}_k = \hat{D}_k^- + K_k (D_k - H \hat{D}_k^-), \quad (5.2)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-. \quad (5.3)$$

где  $K_k$  – усиление Калмана, отн. ед.;  $H$  – матрица измерений, отражающая отношение измерений и состояний измерительной системы;  $R$  – ковариация шума измерения;  $\hat{D}_k$  – амплитуда симметричных деформаций в текущий момент времени, отн. ед.;  $I$  – матрица идентичности.

Выражения (4.1)–(4.2) и (5.1)–(5.3) описывают фильтрацию по методу Калмана для многомерного сигнала. В нашем случае сигнал симметричных деформаций представляет одномерный набор данных. Поэтому матрицы вырождаются в скалярные величины, предсказанное состояние системы и ошибку ковариации можно описать выражениями (6.1)–(6.2) соответственно:

$$\hat{D}_k^- = F \hat{D}_{k-1} + B_{k-1}, \quad (6.1)$$

$$P_k^- = F P_{k-1}^- F + Q. \quad (6.2)$$

А процесс вычисления усиления Калмана, обновление оценки с учетом измерения и обновление ошибки ковариации можно описать выражениями (7.1)–(7.3) соответственно:

$$K_k = P_k^- H (H P_k^- H + R)^{-1}, \quad (7.1)$$

$$\hat{D}_k = \hat{D}_k^- + K_k (D_k - H \hat{D}_k^-), \quad (7.2)$$

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^-. \quad (7.3)$$

Для применения фильтра Калмана к сигналу симметричных деформаций шейки рельса необходимо описать матрицы (значения) переменных, описывающих динамику системы и измерений  $F$ ,  $B$  и  $H$ .

Матрица  $F$  – это параметр, описывающий динамику системы, в случае с измерением деформаций рельса это могут быть коэффициенты, учитывающие влияние внешней среды на измерения. При экспериментах использовалась измерительная тензометрическая система, которая при каждом новом эксперименте проводила автокалибровку аппаратной части и установку нуля измерений. Фактически получается, что состояния системы при определении предсказания следующего значения не менялись, поэтому динамика системы принята за скалярную величину, равную единице.

Матрица  $B$  – это параметр, определяющий значение управляющего воздействия на систему измерений. Процесс измерений проходил в автономном режиме, поэтому считается, что управляющее воздействие на систему отсутствует и значение  $B$  принято за скалярную величину, равную нулю.

Матрица  $H$  – это параметр, определяющий отношение между измерениями и состоянием системы, он характеризует модель датчиков, которые служат для регистрации деформаций шейки рельса. Данный параметр принят за единичную матрицу (для ска-

Коломеец А.О., Выплавень В.С. Сравнительный анализ временных параметров...

лярных значений параметр равен единице) для его дальнейшей корректировки с целью достижения необходимого результата фильтрации сигнала.

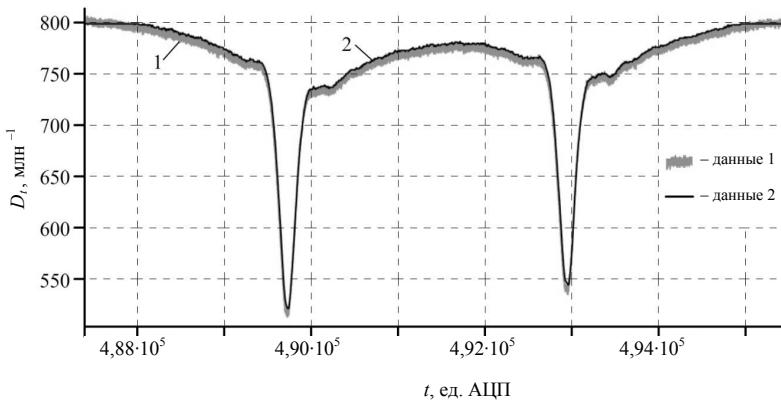
Далее необходимо определить параметры, отвечающие за сглаживание сигнала  $R$  и  $Q$ .

Матрица  $Q$  – это параметр, описывающий ковариацию шума процесса. Как для матрицы  $H$ , значение этого параметра определяется эмпирическим путем и принимается постоянным на протяжении всего процесса фильтрации. Основное требование для этого параметра – удовлетворительное влияние на работу фильтра.

Матрица  $R$  – это параметр, который, как и  $Q$ , является ковариационной матрицей. Он описывает ошибки измерительной системы, т.е. погрешность приборов. Значение этого параметра определяется экспериментально.

Ключевыми параметрами для настройки фильтра являются  $Q$  и  $R$ . Степень сглаживания исходного сигнала зависит от их отношения. Если  $Q \ll R$ , то степень сглаживания увеличивается, иначе при стремлении значения  $Q$  к значению  $R$  отфильтрованный сигнал приближается к исходному.

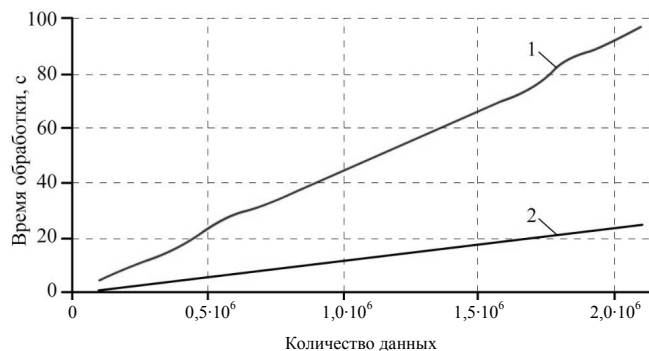
Алгоритм фильтрации по методу Калмана реализован в виде специализированного программного обеспечения. На рисунке 5 приведен аналогичный фрагмент исходных данных (рис. 5-1) с наложением отфильтрованного методом Калмана сигнала (рис. 5-2).



**Рис. 5.** Зависимость симметричных деформаций от времени до (1) и после (2) фильтрации методом Калмана

С целью оценки быстродействия проводились исследования временных параметров работы обоих алгоритмов. В специализированном программном обеспечении устанавливался счетчик времени выполнения операций. Время фиксировалось только при выполнении фильтрации исходного сигнала, временные параметры других алгоритмов не исследовались. За нулевой момент времени принималась операция подачи исходных данных на вход алгоритма, окончанием отсчета считалось выполнение последней операции и вывода сообщения об окончании фильтрации.

При исследовании на вход обоих алгоритмов подавались одинаковые наборы данных. Проведено не менее десяти измерений для каждого алгоритма. По результатам исследований построены зависимости времени работы каждого алгоритма от набора количества данных. Результаты экспериментов представлены на рисунке 6.



**Рис. 6.** Зависимость времени работы алгоритма от количества данных при анализе линейной сверткой (1) и фильтром Калмана (2)

Анализ результатов показал, что быстродействие алгоритма Калмана отличается в 3,4 раза от времени работы алгоритма линейной свертки. Такой эффект объясняется тем, что алгоритм линейной свертки основан на «оконной» фильтрации и быстродействие зависит от ширины «окна», а фильтр Калмана в своей реализации использует лишь текущее и предыдущее состояние системы, поэтому количество итераций зависит только от объема данных. Программный алгоритм фильтрации симметричных деформаций методом Калмана реализован в виде динамически подключаемой библиотеки DLL (англ. *Dynamic Link Library*). Библиотека является исполняемой программой, на нее получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [8].

#### Заключение

В результате анализа временных параметров обработки сигналов описанными алгоритмами установлено, что фильтр Калмана является более производительным. Быстродействие фильтра Калмана отличается от быстродействия алгоритма линейной свертки в 3,4 раза. Разработанная в ходе исследования динамически подключаемая библиотека входит в состав специализированного программного обеспечения. Дальнейшее направление исследований – это применение метода Калмана для обнаружения в сигналах симметричных деформаций локальных информативных параметров от дефектов поверхности катания железнодорожных колес.

#### Литература

1. Бехер С.А., Коломеец А.О., Степанова Л.Н., Кочетков А.С. Разработка алгоритмов определения информативных параметров сигналов с тензодатчиков для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2014. Вып. 30. С. 129–136.
2. Бехер С.А., Кочетков А.С. Использование тензометрического метода для определения технического состояния ходовых частей вагона в движении // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2007. Вып. 17. С. 143–148.
3. Калинин А.Г. Анализ эффективности фильтра Калмана для систем безопасности автомобиля при различных моделях движения // Вестник Московского энергетического института. 2017. № 3. С. 51–55.

Коломеец А.О., Выплавень В.С. Сравнительный анализ временных параметров...

4. Козинев И.А., Почивалов С.Г., Топчий П.Н. Метод корреляционного распознавания наблюдаемых объектов по многоспектральным данным // Т-Comm: телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 6. С. 38–41.
5. Коломеец А.О. Методика обработки первичных сигналов с тензодатчиков при контроле колес грузовых вагонов в движении // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сборник тезисов VIII Российской научно-технической конференции (Екатеринбург, 26–30 мая 2014 г.). Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2014. С. 131–132.
6. Коссов В.С., Лунин А.А., Князев Д.А., Тимаков М.В. Применение конечно-элементного анализа для совершенствования метода Шлюмпфа с целью снижения погрешности измерения боковой составляющей силы от взаимодействия колес подвижного состава и рельсов // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 4 (58). С. 57–62.
7. Свидетельство 2015613124 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Определение параметров дефектов поверхности катания колес и динамических характеристик подвижного состава по сигналам тензометрической системы / Бехер С.А. и др.; заявитель и правообладатель СГУПС; заявл. 07.11.14; опубл. 20.04.15, Реестр программ для ЭВМ.
8. Свидетельство 2019615340 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Анализ сигналов тензометрического контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении на основе адаптивного фильтра Калмана / Выплавень В.С., Коломеец А.О.; заявитель, правообладатель СГУПС; заявл. 15.04.19; опубл. 24.04.19, Реестр программ для ЭВМ.
9. Хайбуллина Л.В. Методы и средства контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2015. № 4 (4). С. 39–47.

### Literatura

1. Bekher S.A., Kolomeets A.O., Stepanova L.N., Kochetkov A.S. Razrabotka algoritmov opredeleniya informativnykh parametrov signalov s tenzodatchikov dlya kontrolya poverkhnosti kataniya koles gruzovykh vagonov v dvizhenii // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2014. Vyp. 30. S. 129–136.
2. Bekher S.A., Kochetkov A.S. Ispol'zovanie tenzometricheskogo metoda dlya opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya khodovykh chastej vagona v dvizhenii // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2007. Vyp. 17. S. 143–148.
3. Kalinin A.G. Analiz effektivnosti fil'tra Kalmana dlya sistem bezopasnosti avtomobilya pri razlichnykh modelyakh dvizheniya // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. 2017. № 3. S. 51–55.
4. Kozinov I.A., Pochivalov S.G., Topchij P.N. Metod korrelyatsionnogo raspoznavaniya nablyudaemykh ob'ektov po mnogosppektral'nym dannym // T-Comm: telekommunikatsii i transport. 2013. Т. 7, № 6. С. 38–41.
5. Kolomeets A.O. Metodika obrabotki pervichnykh signalov s tenzodatchikov pri kontrole koles gruzovykh vagonov v dvizhenii // Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstruksij: sbornik tezisov VIII Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Ekaterinburg, 26–30 maya 2014 g.). Ekaterinburg: IMASH UrO RAN, 2014. S. 131–132.
6. Kossov V.S., Lunin A.A., Knyazev D.A., Timakov M.V. Primenenie konechno-elementnogo analiza dlya sovershenstvovaniya metoda Shlyumpfa s tsel'yu snizheniya pogreshnosti izmereniya bokovoj sostavlyayushchej sily ot vzaimodejstviya koles podvizhnogo sostava i rel'sov // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2016. № 4 (58). S. 57–62.



7. Svidetel'stvo 2015613124 Rossijskaya Federatsiya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM. Opredelenie parametrov defektov poverkhnosti kataniya koles i dinamicheskikh kharakteristik podvizhnogo sostava po signalam tenzometricheskoj sistemy / Bekher S.A. i dr.; zayavitel' i pravoobladatel' SGUPS; zayavl. 07.11.14; opubl. 20.04.15, Reestr programm dlya EVM.

8. Svidetel'stvo 2019615340 Rossijskaya Federatsiya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM. Analiz signalov tenzometricheskogo kontrolya poverkhnosti kataniya koles gruzovykh vagonov v dvizhenii na osnove adaptivnogo fil'tra Kalmana / Vyplaven' V.S., Kolomeets A.O.; zayavitel', pravoobladatel' SGUPS; zayavl. 15.04.19; opubl. 24.04.19, Reestr programm dlya EVM.

9. *Khajbullina L.V.* Metody i sredstva kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruksij opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov neftegazovoj otrasli // Vestnik mladogo uchenogo UGNTU. 2015. № 4 (4). S. 39–47.

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.182

УДК 004.67

С.В. Букунов, О.В. Букунова

РАЗРАБОТКА БИЗНЕС-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
И АНАЛИЗА ДАННЫХ ПО ФИНАНСОВЫМ РЫНКАМ  
С ПОМОЩЬЮ ЯЗЫКА R

Разработано бизнес-приложение, позволяющее визуализировать динамику цен на биржевые финансовые активы и проводить базовый технический и статистический анализ. Приложение реализовано в популярной статистической среде R.

*Ключевые слова:* финансовые рынки, функциональное программирование, язык R, визуализация, технический анализ, статистический анализ, наука о данных.

S.V. Bukunov, O.V. Bukunova

DEVELOPMENT OF A BUSINESS APPLICATION FOR EVALUATION  
AND ANALYSIS OF THE FINANCIAL MARKETS  
DATA USING R LANGUAGE

A business application has developed that allows for a market stock prices visualization and basic technical and statistical analysis realization. The application has implemented in the popular R statistical environment.

*Keywords:* financial markets, functional programming, R language, visualization, technical analysis, statistical analysis, Data Science.

*Введение*

Исследование данных является одной из наиболее актуальных проблем современности. Это связано с тем, что объемы обрабатываемой в настоящее время информации колоссальны и продолжают расти. Поиск закономерностей, прогнозирование и модели-