

УДК 519.711.3

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*В. Я. Карташов, Л. В. Карташова, С. С. Самойленко*

**STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF DYNAMIC OBJECTS IN REAL TIME**

*V. Ya. Kartashov, L. V. Kartashova, S. S. Samoilenko*

**Актуальность работы:** одной из основных задач технической кибернетики является задача адаптивного управления динамическими процессами в реальном масштабе времени. Существующие разработки по цифровым системам адаптивного управления предполагают, как правило, неизменную структуру этого процесса. Изменению, как правило, подлежат только параметры исследуемого процесса. Однако на практике наблюдается структурно-параметрическое изменение динамических процессов, определение которых в настоящее время недостаточно разработано и является актуальной проблемой повышения качества и эффективности цифровых систем адаптивного управления технологическими процессами. Область применения: управление непрерывными технологическими процессами (металлургия, химическая, газовая промышленность и т. п.).

**Цель работы:** алгоритмическое обеспечение решения задачи структурно-параметрической идентификации линейных динамических объектов в реальном времени по дискретным наблюдениям.

**Методы исследования:** структурно-параметрическая идентификация на основе принципов многократного квантования, эквивалентности, согласованного  $z$ -преобразования.

**Результаты:** алгоритм и его преимущества для решения задачи структурно-параметрической идентификации линейных динамических объектов в реальном времени по дискретным наблюдениям. Также представлен пример работы алгоритма, в котором рассмотрен апериодический объект первого порядка. Достоверность результатов обеспечивается строгостью применения математических методов, численным моделированием теоретических результатов.

**The urgency of the discussed:** the problem of adaptive control of dynamic processes in real time is one of the main tasks of technical cybernetics. The existing works on digital adaptive control assume a generally rigid structure of this process. As a rule, only the parameters of the investigated process are subject to change. In practice, however, structural and parametric changes of dynamic processes are observed, the definition of the processes is not well developed at present, which is an actual problem for improving the quality and efficiency of digital adaptive control of technological processes. The research concerns management of continuous technological processes (metallurgy, chemical, gas etc.).

**The main aim of the study** is to create the algorithmic solution of the problem of structurally-parametric identification of linear dynamic objects in real time on discrete observations.

**The methods used in the study:** structural and parametric identification based on the principles of multi-frequency quantization, equivalence, consistent  $z$ -transform.

**The results:** the algorithm and its advantages for solving the problem of structural parametric identification of linear dynamic objects in real time on discrete observations were defined. An example of the algorithm considering an aperiodic object of the first order is provided. The reliability of the results is ensured by rigorous application of mathematical methods and numerical simulation of the theoretical results.

**Ключевые слова:** многократное квантование, цифровые системы, период дискретизации, эквивалентность дискретных моделей.

**Keywords:** multi-frequency quantization, digital systems, sampling period, equivalence of discrete models.

Современные требования к развитию компьютерных систем управления и мониторинга предполагают повышение качества таких систем. При этом функциональные возможности систем автоматического управления с ЭВМ и их желаемые характеристики определяются тем объектом, для которого создается эта система. От уровня сложности технологического процесса, его многорежимного функционирования и перенастройки на разные условия работы свойства таких объектов существенно изменяются как в параметрическом, так и структурном плане.

В настоящее время применяются два основных способа управления такими объектами с параметрическими и структурными изменениями: адаптивный, робастный и их комбинация. Адаптивное управление предполагает использование идентификаторов параметрических и структурных характеристик объекта,

при этом одной из сложных и труднореализуемых проблем является разработка и настройка контура адаптации модели (особенно при структурно-параметрической идентификации) [1; 2; 6; 12]. Поэтому в последнее время применение адаптивного подхода существенно ограничено параметрической идентификацией, сложностью реализации и недостаточным воздействием контура адаптации модели.

В это время лишенным указанных недостатков оказалось робастное управление объектами с изменяющимися параметрами, что послужило причиной массового увлечения созданием таких систем даже на основе типовых аналоговых регуляторов с новыми подходами их настройки [1; 2]. Робастное управление обеспечивает управление технологическими и производственными объектами в условиях нормального функционирования и гарантирует приемлемое качество

во работы в условиях различных видов неопределенностей. В значительной степени проектирование систем робастного управления продвинуто в непрерывном случае, без должного применения и обоснования компьютерных возможностей и преимуществ [1].

В данной работе предлагается подход построения идентификаторов в структурах и алгоритмах систем адаптивного управления динамическими объектами на основе дробно-рациональной аппроксимации дискретных передаточных функций с использованием алгоритмов теории непрерывных дробей [5; 1]. Подход к решению задачи построения модели динамического объекта построен на использовании согласованного z-преобразования

$$z = e^{S * \Delta t}, \quad (1)$$

где осуществляется отображение непрерывного пространства  $s = x + j * y$  в дискретное  $z = u + j * v$ , ( $\Delta t$  – период дискретизации) удовлетворяющее требованиям [12]:

а) сохранения селективных свойств непрерывной системы;

б) сохранения свойства устойчивости непрерывной системы при переходе в устойчивую дискретную систему.

1я строка	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$	$\dots$	,	(3)
2я строка	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$\dots$	$y_n$	$\dots$		
3я строка	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\dots$	$\alpha_{1n}$	$\dots$		
	$\alpha_{20}$	$\alpha_{21}$	$\alpha_{22}$	$\dots$	$\alpha_{2n}$	$\dots$		
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$		
m-я строка	$\alpha_{m0}$	$\alpha_{m1}$	$\alpha_{m2}$	$\dots$	$\alpha_{mn}$	$\dots$		
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$		

в которой строки 1 и 2 состоят из измерений входной  $x(t)$  и выходной переменной, а последующие элементы матрицы вычисляются по соотношению:

$$\alpha_{mn} = \frac{\alpha_{m-2,n+1}}{\alpha_{m-2,0}} - \frac{\alpha_{m-1,n+1}}{\alpha_{m-1,0}}, \quad (4)$$

где  $m = 2, 3, 4, \dots$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;

$$\alpha_{-2,n} = x(n * \Delta t); \alpha_{-1,n} = y(n * \Delta t).$$

Для линеаризованных объектов конечного порядка  $N$ , эта матрица обладает свойством: элементы строки  $m = 2N$  (если  $x(t)$  – ступенчатая функция) становятся практически равными нулю, что является критерием останова вычислений. При этом элементы нулевого столбца определяют порядок и параметры дискретной передаточной функции (ДПФ), а с учетом интервала допустимых периодов дискретизации ( $\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max}$ ) в силу взаимно-однозначного соответствия получаем НПФ объекта.

В работах [3; 8] показано, что приведенный алгоритм позволяет определить континуальное множество эквивалентных непрерывному объекту ДПФ на всех

Исследование свойств согласованного z-преобразования позволило определить многие его свойства, в частности, определены условия взаимно-однозначного соответствия между z- и s-плоскостями, допустимых при этом вариаций значений периодов дискретизации  $\Delta t \in (\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ , определяемый свойствами линеаризованного объекта; условием структурно-параметрической (SP)-идентифицируемости: изменение периода дискретизации позволяет идентифицировать по известным нулям и полюсам ДПФ нули и полюса НПФ.

Применение теории непрерывных дробей позволило определять дискретную передаточную функцию по дискретным измерениям с периодом

$$\Delta t \in (\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max}) \quad [5; 7] \text{ для SJSO-объектов}$$

$$G_o(z, \Delta t) \triangleq \frac{Z(y, \Delta t)}{Z(x, \Delta t)} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} y(n\Delta t)z^{-n}}{\sum_{n=0}^{\infty} x(n\Delta t)z^{-n}} \quad (2)$$

с помощью модифицированного алгоритма В. Висковатова путем рекуррентного построения идентифицирующей матрицы:

$\Delta t \in (\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ . Бинарное отношение «быть моделью» со свойством эквивалентности путем вариации периода дискретизации определяет теоретическое обоснование и практическую значимость многократного квантования [4; 7; 9; 10].

Применяя вышеперечисленные положения, характерные для цифровых систем управления, в работе [10] были рассмотрены структурные особенности адаптивных систем управления. В данной работе, являющейся продолжением [10], приводится тестовое исследование алгоритмов текущей идентификации на основе эквивалентности и многократной дискретизации. Имитирующая система работы идентификаторов непрерывного линейного объекта задается своей передаточной функцией  $G(s)$ , цифровое устройство генерирует обобщенный ступенчатый сигнал [1; 2], по  $G(s)$  определяется детерминированная реакция объекта на ступенчатые воздействия (фильтрация в тесте не используется). Представим обобщенную графическую иллюстрацию модельного исследования.

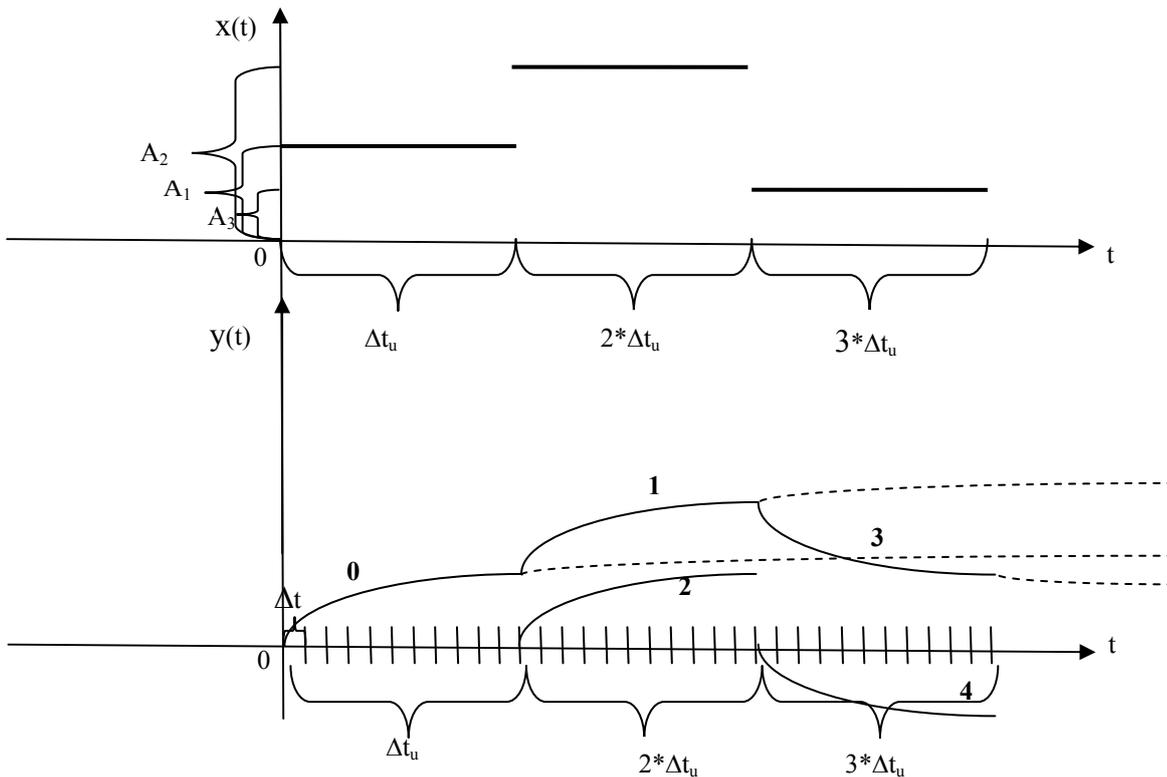


Рис. 1. Генерация исходных данных:  $x, y$  – вход и выход объекта;  $\Delta t_u$  – период дискретизации по управлению;  $\Delta t$  – период дискретизации по идентификации

**Общая схема решения задачи:**

1. задаются структура и параметры непрерывной модели; определяются величины  $\Delta t_u \gg \Delta t$  из интервала допустимых значений периодов дискретизации; определяются ДММ ( $\Delta t$ ) и ДММ ( $\Delta t_u$ );
2. сигнал **1** (рис. 1) представляет собой измеряемый реальный сигнал и является суммой сигналов **0** (рис. 1) и **2** (рис. 1);
3. из значений измеренного сигнала **1** (рис. 1) вычитаются значения сигнала **0** (рис. 1), который прогнозируется, используя модель за время  $\Delta t_u$ ;
4. из образованных значений после вычитания восстанавливается сигнал **2** (рис. 1), который сопоставляется с моделью сигнала **0** (рис. 1) и формируется вывод об изменении свойств объекта;

5. прогнозируется сигнал **1** (рис. 1) и по значениям в интервале  $[2 * \Delta t_u, 3 * \Delta t_u]$  определяется измеряемый выходной сигнал, найдя разность сигналов, определяются значения сигнала **4** (рис. 1), по которым восстанавливается модель на третьем интервале и т. д.

**Пример.** Рассмотрим апериодический объект первого порядка, у которого передаточная функция вида  $G_i(s) = \frac{k}{Ts + 1}$ ,  $i=1,2,3$ .

Для определенности считаем  $k = 1$ ,  $T = 3$ ,  $\Delta t_u = 3$  сек,  $\Delta t = 0.5$  сек, амплитуды входного воздействия по ступеням  $A_1=1, A_2=2, A_3=-1$ . Данные реакции объекта получены с помощью генератора.

Таким образом, на каждом интервале реакция объекта будет равна на интервале  $[0, 3]$  (таблица 1).

Таблица 1

t	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
u(t)	1	1	1	1	1	1	1
y(t)	0	0.1535	0.2835	0.3935	0.4866	0.5654	0.6321

На интервале  $[3, 6]$  (таблица 2).

Таблица 2

t	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
u(t)	2	2	2	2	2	2	2
y(t)	0.6321	0.8421	1.0199	1.1704	1.2977	1.4055	1.4968

На интервале [6, 9] (таблица 3).

Таблица 3

t	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
u(t)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
y(t)	1.4968	1.1135	0.7889	0.54143	0.2818	0.0851	-0.0814

С помощью метода SP-идентификации построим модель, с помощью которой можно вычислить значения выходного сигнала при неизменных входном воздействии и структуре модели.

Используя данные на интервале [0,3] (таблица 1), с помощью матрицы В. Висковатова (таблица 4) находим дискретную передаточную функцию объекта (ДПФ).

Таблица 4

1	1	1	1	1	1	1	...
0.1535	0.2835	0.3935	0.4866	0.5654	0.6321	...	
-0.8469	-1.5635	-2.17	-2.6834	-3.1179	...		
0.0008	0.0012	0.002	0.0019	...			

ДПФ имеет вид:  $G(z, 0.5) = \frac{0.1535 * z^{-1}}{1 - 0.8469 * z^{-1}}$ , тогда модель на этом участке будет иметь вид:

$$y^{pp}_2(n) = 0.8469 * y(n-1) + 0.1535 * x(n-1).$$

С помощью полученного разностного уравнения моделируем значения выходного сигнала объекта на следующем интервале [3, 6] (таблица 5).

Таблица 5

t	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
u(n)	1	1	1	1	1	1	1
$y^{pp}_2(n)$	0.6321	0.6888	0.7368	0.7775	0.812	0.8412	0.866

Так как реальные значения выходного сигнала объекта на интервале [3, 6] это результирующая (сумма двух) выходных сигналов (от предыдущей ступени на интервале [0, 3], в которой управляющее воздействие равнялось единице, и от этой на интервале [3, 6], в которой управляющее воздействие равняется двум),

то нужно из реальных значений вычесть полученные с помощью прогноза, а потом с помощью метода SP-идентификации найти ММ в форме передаточной функции.

Тогда получим выходной сигнал только 2-го воздействия (таблица 6).

Таблица 6

t	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
u(n)	1	1	1	1	1	1	1
$y^*_2(n)$	0	0.1524	0.2831	0.3929	0.4857	0.5643	0.6308

Примечание:  $y^*_2(n) = y_2(n) - y^{pp}_2(n)$ .

Далее строим идентифицирующую матрицу на основе данных из таблицы 6 (таблица 7).

Таблица 7

1	1	1	1	1	1	1	...
0.1524	0.2831	0.3929	0.4857	0.5643	0.6308	...	
-0.8576	-1.5781	-2.1870	-2.7028	-3.1391	...		
0.01752	0.0279	0.0425	...				

ДПФ имеет вид:  $G(z, 0.5) = \frac{0.1524 * z^{-1}}{1 - 0.85761 * z^{-1}}$ .

Относительная ошибка:

$$\varepsilon(1) = \frac{0.1535 - 0.1524}{0.1535} = 0.007;$$

$$\varepsilon(1) = \frac{0.8469 - 0.85761}{0.8469} = -0.013.$$

Разностное уравнение данной ДПФ примет вид:

$$y_2(n) = 0.85761 * y(n-1) + 0.1524 * x(n-1).$$

За исходные данные берем значения выходного сигнала на [3, 6] (таблица 2) и разностное уравнение в качестве модели для прогноза на следующий интервал [6, 9]. Также даны реальные значения объекта на отрезке [6, 9] (таблица 3).

Найдем идентифицирующую матрицу (таблица 8).

Таблица 8

2	2	2	2	2	2	2	2	...
0.6321	0.8421	0.0199	1.1704	1.2977	1.4055	1.4968	...	
-0.3322	-0.6135	-0.8516	-1.053	-1.2235	-1.2678	...		
-0.5146	-0.95	-1.3182	-1.63	-1.8939	...			
0.0007	0.0019	0.002	0.003	...				

Тогда ДПФ примет вид:

$$G(z, 0.5) = \frac{0.31605 - 0.1626 * z^{-1}}{1 - 0.8468 * z^{-1}}$$

Разностное уравнение имеет вид:

$$y^{mp}_3(n) = 0.8468 * y(n-1) + 0.31605 * x(n) - 0.1626 * x(n-1)$$

Проверка  $n=4$   $y^{mp}_3(4)=1.0088$ , тогда

$$\varepsilon_{отн} = \frac{1.0199 - 1.0088}{1.0199} = 0.01$$

С помощью ММ прогноза  $y^{mp}_3$  осуществим прогноз третьей ступени, получим таблицу 9.

Таблица 9

t	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
u(n)	2	2	2	2	2	2	2
$y^{mp}_3(n)$	1.4968	1.5633	1.6196	1.6673	1.7077	1.7419	1.7708

Теперь из данных значений вычтем значения, полученные в результате прогноза (таблица 10).

Таблица 10

t	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
u(n)	1	1	1	1	1	1	1
$-(y(n) - y^{mp}_3(n))/3$	0	0.15	0.2769	0.3843	0.4753	0.5523	0.6174
$y(n) - y^{mp}_3(n)$	0	-0.4498	-0.8307	-1.153	-1.4259	-1.6568	-1.8522

Найдем ММ в форме передаточной функции по данным таблицы 10.

Строим идентифицирующую матрицу (таблица 11).

Таблица 11

1	1	1	1	1	1	1	...
0.15	0.2769	0.3843	0.4753	0.5523	0.6174	...	
-0.846	-1.562	-2.1687	-2.682	-3.116	...		
-0.0003	-0.0015	-0.0015	-0.0012	...			

Получаем передаточную функцию в виде:

$$G(z, 0.5) = \frac{0.15 * z^{-1}}{1 - 0.846 * z^{-1}}$$

Относительная ошибка коэффициентов передаточных функций:

$$\varepsilon(1) = \frac{0.1535 - 0.15}{0.1535} = 0.02;$$

$$\varepsilon(1) = \frac{0.8469 - 0.846}{0.8469} = 0.001$$

За счет незначительных величин (<0.1) относительных ошибок на разных этапах исследования объекта можно сделать вывод, что объект не изменил свойств.

Представленный подход к решению задачи структурно-параметрической идентификации объектов в

режиме реального времени имеет ряд преимуществ, таких как:

1) для начала применения метода не требуется вся история функционирования объекта, что дает выигрыш как в скорости обработки данных, так и в размере памяти необходимой для их размещения;

2) повышается скорость принятия решения, что важно при возникновении критических ситуаций;

3) позволяет решить проблему адаптивного управления в режиме реального времени на опасных объектах, которые требуют чуткого и быстрого реагирования на изменения их свойств.

Данная работа имеет существенное значение для проектирования и функционирования систем автоматического управления и регулирования.

### Литература

1. Гудвин Г. К., Гребне С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2013. 911 с.
2. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых управлений. 2002. 832 с.
3. Карташов В. Я. Эквивалентность дискретных моделей – реальность? // Промышленные контроллеры и АСУ. М.: Научтехматиздат, 2006. № 8.
4. Карташов В. Я., Бехтгольд И. В. Применение многочастотного квантования в цифровых системах мониторинга и управления // Вестник КемГУ. 2012. № 4. Т. 2. С. 75 – 83.
5. Карташов В. Я., Гутова С. Г. Непрерывные дроби и их приложения к задачам технической кибернетики: учебное пособие. Кемерово: КемГУ, 2013. 138 с.
6. Карташов В. Я., Карташова Л. В., Махарева О. А., Сахнин Д. Ю., Хорошева Т. А. Идентифицирующая функция и её свойства // Материалы VII Всероссийской НПК АС 2009. Новокузнецк, 2009.
7. Карташов В. Я., Махарева О. А., Сахнин Д. Ю. Особенности многочастотного квантования в системах автоматизации // Сборник тезисов XIII Всероссийской НТП “Металлургия: технологии, управление, инновации, качество”. Новокузнецк, 2009.

8. Карташов В. Я., Махарева О. А., Сахнин Д. Ю. Особенности применения эквивалентных дискретных моделей в проектировании управляющих алгоритмов производственными процессами // Информационные технологии в проектировании и производстве. М., 2010. № 4.
9. Карташов В. Я., Самойленко С. С. Многочастотное квантование на основе структурно-параметрической идентификации динамических систем непрерывными дробями // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, 16 – 19 июня 2014 г.: Труды. [Электронный ресурс]. М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. 9616 с.
10. Карташов В. Я., Самойленко С. С. Особенности структурно-параметрической адаптации в цифровых системах мониторинга и управления // Вестник КемГУ. 2014. № 2. Т. 1. С. 70 – 77.
11. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 288 с.
12. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.

**Информация об авторах:**

**Карташов Владимир Яковлевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и технической кибернетики КемГУ, [v.kartashov.aik@gmail.com](mailto:v.kartashov.aik@gmail.com).

**Vladimir Ya. Kartashov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Research Automation and Technical Cybernetics, Kemerovo State University.

**Карташова Лидия Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента КемГУ, [kartashova\\_lv@mail.ru](mailto:kartashova_lv@mail.ru).

**Lydia V. Kartashova** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor at the Department of Management, Kemerovo State University.

**Самойленко Сергей Сергеевич** – аспирант кафедры автоматизации и технической кибернетики КемГУ, [myniserg@mail.ru](mailto:myniserg@mail.ru).

**Sergey S. Samoilenko** – post-graduate student at the Department of Research Automation and Technical Cybernetics, Kemerovo State University.

(**Научный руководитель – В. Я. Карташов**).

*Статья поступила в редколлегию 30.12.2014 г.*