

УДК 621.372

Н.О. ТУЛЯКОВА

Сумской государственной университет, Украина

**ПРИМЕНЕНИЕ "РАСТУЩЕГО НА МЕСТЕ" КИХ-ГИБРИДНОГО МЕДИАННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ТРЕНДА ЭКГ**

*Рассмотрена задача устранения скачкообразного тренда изолинии электрокардиографических сигналов, возникающего вследствие движения пациента. Предложено использование "Растущего на месте" алгоритма класса КИХ-гибридных медианных фильтров для удаления нелинейных искажений данного вида. Исследование применения алгоритма на модельных и реальных данных показывает устранение сложных артефактов движения большой амплитуды и длительности в реальном времени без существенных искажений информационного сигнала.*

**Ключевые слова:** автоматическая коррекция тренда ЭКГ сигналов, артефакты движения, КИХ-гибридные медианные фильтры.

**Введение**

В электрокардиографических системах одним из главных требований автоматической обработки данных является коррекция изоэлектрической линии, тренд которой может существенно исказить низкочастотные (НЧ) параметры электрокардиографического сигнала (ЭКГ), в частности, смещение и форму ST-сегмента, патологические изменения R-зубца, которые являются диагностическими признаками заболеваний сердечно-сосудистой системы [1]. Требование устранения тренда ЭКГ особенно важно в системах длительной регистрации биомедицинских сигналов, предназначенных для проведения функциональных проб под нагрузкой, в холтеровских мониторах, где тренд изолинии неизбежно присутствует [2].

Для удаления НЧ тренда ЭКГ хорошо зарекомендовали себя линейные фильтры высоких частот с коррекцией фазово-частотной характеристики, которые устраняют медленные колебания изоэлектрической линии, вызванные дрейфом напряжения поляризации электродов вследствие изменения электро кожного сопротивления в течение времени [2]. В то же время изменения потенциала поляризации электродов, зачастую, могут быть вызваны смещением электродов при движении пациента. Такие артефакты представляют собой скачкообразные изменения сигнала большой амплитуды и длительности (step-like artifacts) [3]. Устранение их без значительных искажений ЭКГ линейными фильтрами не возможно, поскольку помехи данного рода имеют широкий, изменяющийся случайным образом спектр частот, пересекающийся со спектром информационного сигнала, и нелинейный – скачкообразный характер [2, 3]. Применение адаптивных фильтров для удаления в био-

медицинских сигналах артефактов движения также затруднительно, в связи с чрезвычайно большой вариабельностью их свойств [3, 4]. В связи с этим, существует задача исследования применения нелинейных устойчивых алгоритмов фильтрации для устранения нелинейного тренда ЭКГ.

**1. Алгоритм "Растущего на месте" КИХ-гибридного медианного фильтра**

Рассмотрим алгоритм нелинейного "Растущего на месте" КИХ-гибридного медианного фильтра (РМКГМФ) - In-Place Growing FIR Median Hybrid Filter [5, 6], относящегося к классу КИХ-гибридных медианных фильтров (КГМФ). Рекурсивный алгоритм РМКГМФ предложен с целью улучшения свойств каскадных КГМФ и успешно используется в задачах выделения тренда сигналов [5, 6].

Выражение, описывающее сигнал на выходе стандартного КГМФ (СКГМФ) имеет вид

$$y(n) = \text{MED}(\Phi_L(x(n)), \Phi_C(x(n)), \Phi_R(x(n))), \quad (1)$$

где  $\Phi_L(x(n))$ ,  $\Phi_R(x(n))$  – выходные значения двух идентичных КИХ-субфильтров для обработки отсчетов, находящихся до (слева от) и после (справа от) центрального отсчета  $x(n)$ ;  $\Phi_C(x(n)) = x(n)$  – значение входного сигнала, соответствующее центральному положению скользящего окна размером  $N$ .

Очевидно, что при больших размерах КИХ-субапертур фильтра им обеспечивается лучшее подавление гауссовского шума на однородных участках, однако при обработке окрестностей резких перепадов свойство хорошо сохранять точку перепада утрачивается. Данный недостаток обусловлен тем,

что по мере того, как центральное положение скользящего окна фильтра достигает перепада, начиная с расстояния  $K+1$  отсчетов от точки разрыва производной, где  $K$ -размер КИХ-субапертур фильтра, различие между выходными сигналами  $\Phi_L(x(n))$  и  $\Phi_R(x(n))$  начинает резко возрастать, и становится максимальным, когда центр окна соответствует точке перепада. Таким образом, вероятность выбора в результате медианной операции в качестве выходного сигнала в (1) значения  $n$ -го отсчета на входе фильтра  $\Phi_C(x(n))=x(n)$  по мере приближения скользящего окна к точке перепада увеличивается, и фильтр утрачивает способность подавлять шум вследствие применения линейных (усредняющих) операций. Избежать данного недостатка замедленной операции  $\Phi_C(x(n))=x(n)$  невозможно, поскольку она гарантирует сохранение точки разрыва производной и, соответственно, высокие динамические свойства данных нелинейных фильтров в области резких перепадов.

Степень подавления шума непосредственно вблизи точки перепада может быть улучшена, благодаря использованию схемы каскадной фильтрации сигнала несколькими фильтрами  $F_{N1}, F_{N2}, \dots, F_{Nmax}$  [5]. Шум непосредственно вблизи точки разрыва производной подавляется фильтрами с малыми размерами окна, а наибольший размер апертуры  $N_{max}$  определяется длительностью стабильной точки фильтра - сигнала, который в отсутствии помех полностью сохраняется на выходе нелинейного фильтра: при использовании КГМФ исходя из априорной информации о длительности перепадов, которые необходимо сохранять при обработке [5, 6].

Сигнал на выходе РМКГМФ, включающего  $N \times M$  КИХ-субапертур, описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} y_0(n) &= x(n); \\ y_j(n) &= \text{MED} \left[ \Phi_{jL}(x(n)), \dots, y_{j-1}(n), \dots, \right. \\ &\quad \left. \Phi_{jN}(x(n)) \right]; \\ y(n) &= y_M(n), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Phi_{ij}$  – выходные значения КИХ-субфильтров;  $j=1, \dots, M$  – уровень фильтрации;  $i=1, \dots, N$  – индекс субапертуры фильтра;

С каждым следующим уровнем фильтрации  $j$  размер субапертур фильтра увеличивается.

Для простоты рассмотрим рассмотрим РМКГМФ (2) с размером скользящего окна  $N=3$ , описываемый следующим выражением:

$$y_j(n) = \text{MED} \left[ \Phi_{jL}(x(n)), y_{j-1}(n), \Phi_{jR}(x(n)) \right],$$

где индексы L ("слева от") и R ("справа от") означают положение субфильтров  $\Phi_{jL}$  и  $\Phi_{jR}$  относительно центрального элемента окна, соответствующего текущему  $n$ -му значению рассчитываемого выходного сигнала  $y(n)$ .

КИХ-субапертуры  $\Phi_{jL}$  и  $\Phi_{jR}$  – это НЧ фильтры, отслеживающие медленные изменения (тренд) значений входного сигнала, причем размер субапертур растет с увеличением номера уровня фильтрации  $j$ . В простейшем случае  $\Phi_{jL}$  и  $\Phi_{jR}$  – идентичные линейные усредняющие (КИХ) фильтры. Тогда, во временной области РМКГМФ описывается выражением

$$\begin{aligned} y_0(n) &= x(n); \\ y_j &= \text{MED} \left[ \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^{K_j} x(n-i), y_{j-1}(n), \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^{K_j} x(n+i) \right]; \\ y(n) &= y_M(n), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $K_j > K_{j-1}$  - размер субапертур фильтра,

$j=1, \dots, M$  - уровень фильтрации сигнала.

Пример простой трехуровневой структуры РМКГМФ (3) при  $N=M=3$  и  $K_1=1, K_2=2, K_3=3$  приведен на рис. 1, где  $Z^{-1}$  – означает задержку обработки в один отсчет,  $N=2K_M+1$  – общий размер скользящего окна фильтра (на последнем уровне фильтрации). Отметим, что размер КИХ-субапертур  $K_j$  РМКГМФ с каждым уровнем может возрастать с большим шагом, чем показано на рис. 1 [6].

Допустим, окно РМКГМФ достигает окрестности зашумленного перепада. Вблизи точки перепада шум подавляется КИХ-субапертурами малого размера на начальных стадиях  $M$ -уровневой фильтрации (рис. 1). Обработка окрестности перепада КИХ-субапертурами большего размера не оказывает влияния на значение выходного сигнала, так как вблизи точки перепада различие между выходными значениями КИХ-субапертур  $\Phi_{jL}$  и  $\Phi_{jR}$  велико, и в результате медианной операции на выход поступает центральный элемент упорядоченных в окне фильтра значений.

Таким образом, динамическая ошибка и дисперсия остаточных флуктуаций на выходе фильтра оказывается меньше, чем при использовании СКГМФ (1) с КИХ-субапертурами  $\Phi_{jL}$  и  $\Phi_{jR}$ , соответствующими максимальной субапертуре  $K_M$  РМКГМФ (3). Использование в структуре РМКГМФ на последних стадиях многоуровневой фильтрации КИХ-субапертур большого размера необходимо в целях обеспечения высокой степени подавления шума на однородных участках.

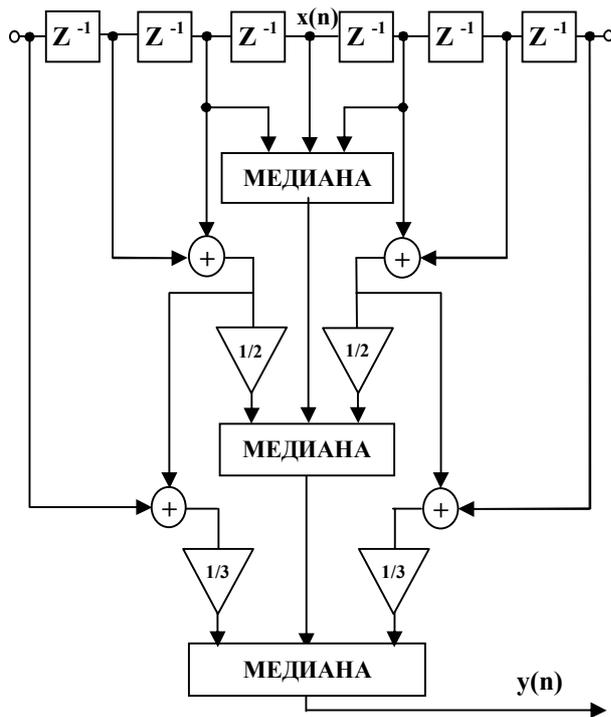


Рис. 1. Схема трехуровневого РМКГМФ с увеличивающимися усредняющими КИХ-субапertureми размером  $K_1=1$ ,  $K_2=2$ ,  $K_3=3$

В случае каскадной схемы фильтрации с увеличением размера апerture на каждом следующем этапе обработки в большей степени сглаживаются резкие изменения сигнала и, следовательно, увеличивается общая динамическая ошибка на выходе алгоритма фильтрации. Будучи единой структурой, РМКГМФ позволяет избежать этого недостатка, кроме того, им обеспечивается большее подавление шума непосредственно вблизи точки резкого перепада в сравнении с аналогичным каскадным фильтром [6].

Для улучшения свойств РМКГМФ (3) [6]: лучшего сохранения сигналов вида пик и перепад и достижения большей степени подавления шума в окрестности перепада в алгоритме (2) помимо усредняющих КИХ-субапertureм 0-го порядка вводятся экстраполирующие КИХ-субапertureмы 1-го порядка, выходные значения которых находятся усреднением  $K$  отсчетов с весовыми коэффициентами, рассчитываемыми как

$$h(i) = \frac{4K - 6i + 2}{K(K-1)}, \quad i = 1, \dots, K,$$

где  $K$  – размер субапertureмы фильтра.

Значения КИХ-коэффициентов  $h(i)$  определяются, исходя из критерия минимума мощности белого шума на выходе КИХ-фильтра для линейно изменяющегося сигнала [7].

Выходной сигнал на  $j$ -м уровне применения алгоритма РМКГМФ (3) с использованием экстраполирующих КИХ-субапertureм 0-го и 1-го порядков описывается следующим выражением:

$$y_j = \text{MED} \left[ \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^K h(i)x(n-i), \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^K x(n-i); \right. \\ \left. y_{j-1}(n), \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^K x(n+i), \frac{1}{K_j} \sum_{i=1}^K h(i)x(n+i) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, идея РМКГМФ заключается в эмуляции каскадной фильтрации сигнала КГМФ с увеличивающимся размером окна посредством многоуровневой повторной обработки сигнала в одном окне фильтра.

Размер субапertureмы фильтра с каждым уровнем повторной фильтрации увеличивается, и общий размер апertureмы фильтра "растет" относительно своего центрального положения. Шум непосредственно вблизи точки перепада подавляется КИХ-субапertureмами малого размера на начальных уровнях фильтрации, а наибольший размер субапertureмы, и, соответственно, общий размер скользящего окна фильтра определяется, исходя из априорной информации о приблизительной длительности тренда, который необходимо выделять при обработке.

## 2. Результаты исследования

Применение РМКГМФ (4) для выделения тренда ЭКС исследовалось на модели суммарного сигнала ЭКГ и тестового воздействия вида "резкий" и "наклонный" перепад, моделирующего нелинейные "ступенькоподобные" искажения изолинии сигнала, возникающие при движении пациента (рис. 2, а) [3, 4]. На выход поступает сигнал (рис. 2, в), полученный вычитанием из исходного сигнала (рис. 2, а) соответствующих отсчетов на выходе РМКГМФ (рис. 2, б).

Как видим, РМКГМ достаточно эффективно выделяет "ступенькоподобный" сигнал, моделирующий артефакт движения большой амплитуды и длительности (рис. 2). Искажения, вносимые в ЭКС в результате применения рассмотренного алгоритма нелинейной фильтрации, не значительны. Только непосредственно вблизи точки резкого перепада наблюдается небольшой неинформационный всплеск значений (рис. 2, в), который может быть легко устранен простыми пороговыми методами.

Применение описанного алгоритма фильтрации класса КГМФ на реальных ЭКС для удаления сложных артефактов движения большой амплитуды и длительности показано на рис. 3.

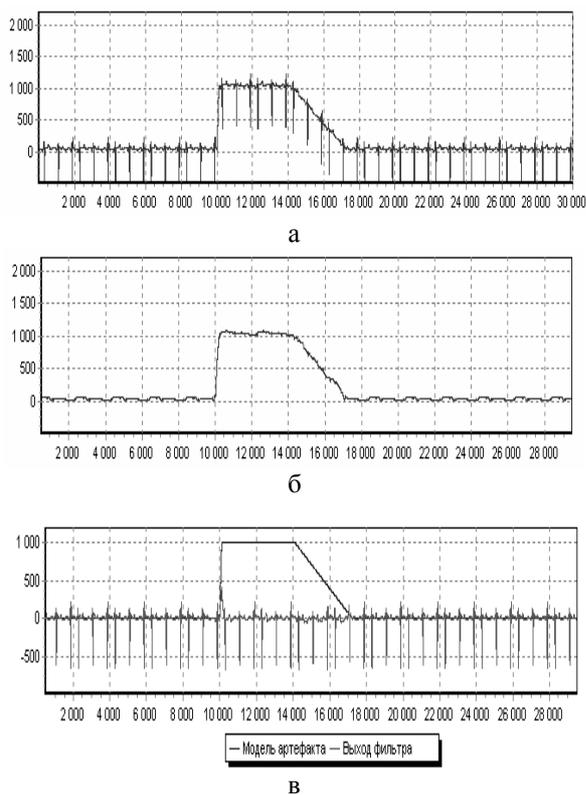


Рис. 2 Применение РМКГМФ на тестовых данных:  
 а – исходный сигнал: суммарный сигнал ЭКГС, регистрируемого с частотой дискретизации 800 Гц, и "ступенькоподобного" артефакта;  
 б – сигнал на выходе РМКГМФ (размер окна  $N=2001$ );  
 в – сигнал на выходе алгоритма и модель артефакта

Результаты исследования применения фильтра на реальных данных показали следующее.

Рассмотренный алгоритм устойчиво функционирует для широкого диапазона изменения его апертуры и строгой зависимости между размером окна фильтра и длительностью перепада, выделяемым им при обработке, нет.

Таким образом, для оптимального выбора размера скользящего окна фильтра и эффективного функционирования алгоритма вообще достаточны лишь априорные знания о приблизительной длительности нелинейного (скачкообразного) тренда, который необходимо выделять при обработке.

Обработка сигнала может проводиться в реальном времени с задержкой отсчетов выходного сигнала  $N/2$ , где  $N$  – размер скользящего окна фильтра, общая задержка обработки (начало получения отсчетов выходного сигнала относительно входа)  $N$ .

Эффективность удаления нелинейного тренда улучшается при использовании фильтра дважды.

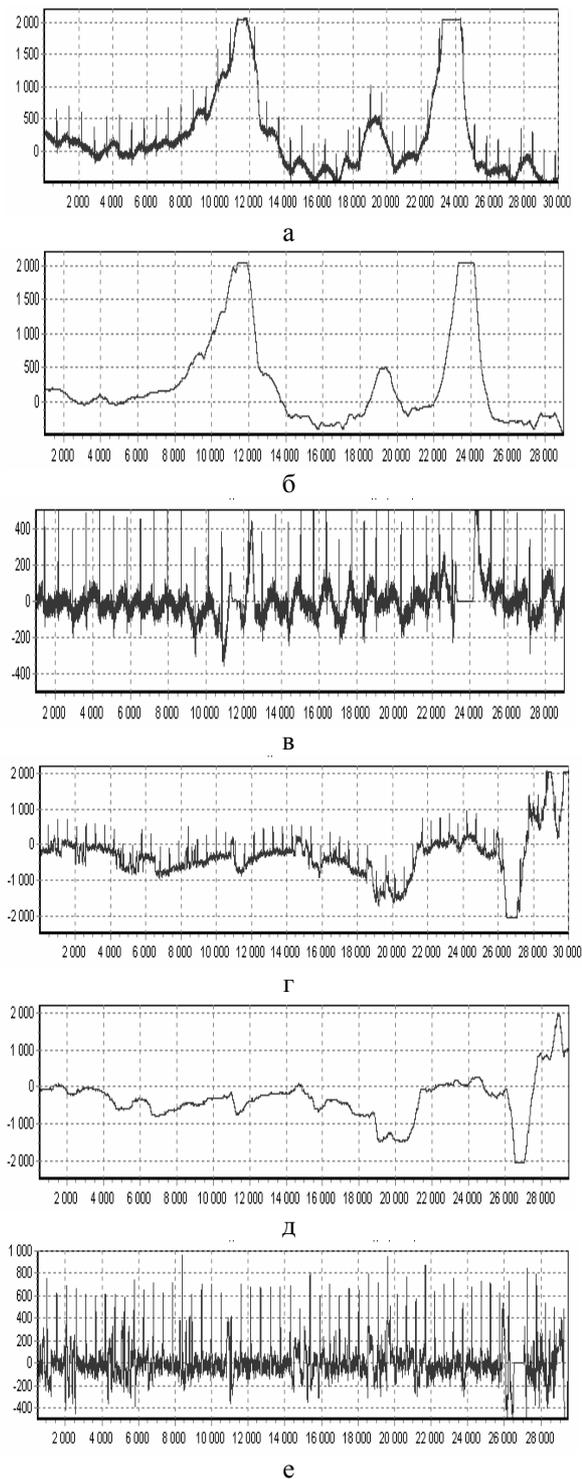


Рис. 3 Применение РМКГМФ на реальных ЭКС, искаженных нелинейным трендом изолинии:  
 а – исходный сигнал; б – сигнал на выходе РМКГМФ (окно  $N=2001$ ); в – сигнал, полученный вычитанием из исходного сигнала (а) соответствующих отсчетов на выходе РМКГМФ (б); г – исходный сигнал; д – сигнал на выходе РМКГМФ ( $N=2001$ ); е – сигнал, полученный вычитанием из исходного сигнала (г) соответствующих отсчетов на выходе РМКГМФ (д)

## Заключення

Таким образом, рассмотренный "Растущий на месте" КИХ-гибридный медианный алгоритм нелинейной фильтрации позволяет производить автоматическую коррекцию нелинейного тренда изоэлектрической линии ЭКС, возникающего вследствие случайных скачкообразных изменений потенциала поляризации электродов при движении пациента во время длительной регистрации сигнала.

Использование рассмотренного алгоритма для удаления нелинейных искажений изоэлектрической линии ЭКС позволяет преодолеть недостатки линейных и адаптивных фильтров, которые заключаются в их практической неприменимости для устранения скачкообразных артефактов движения большой амплитуды и длительности в связи с широким, случайным и априорно неизвестным спектром помех данного рода и большой вариабельностью их свойств.

Применение описанного алгоритма для удаления нелинейного тренда ЭКС позволяет достаточно успешно решить поставленную задачу, не внося при этом больших искажений в информационный сигнал.

## Литература

1. *Болезни сердечно-сосудистой системы / Под ред. Е. Браунвальда и др. - Внутренние болезни. Книга 5, Москва: Медицина, 1995. - 448 с.*
2. *Попов А.Ю. Дискретизация и алгоритмы цифровой фильтрации электрокардиограммы / А.Ю. Попов, В.Ф. Кравченко // Электромагнитные волны и электронные системы. - 1999. - Т. 4, №5. - С. 74-93.*
3. *Varri A. Algorithms and Systems for the Analysis of Long-Term Physiological Signals: Thesis for the degree of Doctor of Technology / Alpo Varri. - Tampere University of Technology. May, 1992. - 60 p.*
4. *Біомедичні сигнали та їх обробка / под ред. В.Г. Абакумова та ін. - Киев: БЕК+, 1997. - 352 с.*
5. *Astola J. Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering. / J. Astola, P. Kuosmanen. - USA: CRC Press LLC, 1997. - 276 p.*
6. *Wichman R. FIR-Median Hybrid Filters with Excellent Transient Response in Noisy Conditions / R. Wichman, J. Astola, P. Heinonen, Y. Neuvo // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. - 1990. - V. 38, No 12. - P. 2108-2116.*
7. *Heinonen P. Median type filters with predictive FIR substructures / P. Heinonen, Y. Neuvo // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. - 1988. - V. 36, No. 6 - P. 892-899.*

Поступила в редакцию 18.06.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. 504 В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## ЗАСТОСУВАННЯ "ЗРОСТАЮЧОГО НА МІСЦІ" КИХ-ГІБРИДНОГО МЕДІАННОГО ФІЛЬТРУ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ТРЕНДУ ЕКГ

*Н.О. Тулякова*

Розглянута задача видалення стрибкоподібного тренду ізолінії електрокардіографічних сигналів, спричиненого рухами пацієнта. Запропоновано використання "Зростаючого на місці" алгоритму класу КИХ-гібридних медіанних фільтрів для видалення нелінійних спотворень даного виду. Дослідження застосування алгоритму на модельних та реальних даних показує видалення складних артефактів рухів великої амплітуди та тривалості у реальному часі без істотних спотворень інформаційного сигналу.

**Ключові слова:** автоматична корекція тренду ЕКГ сигналів, артефакти рухів, КИХ-гібридні медіанні фільтри.

## APPLICATION OF IN-PLACE GROWING FIR HYBRID MEDIAN FILTER FOR REMOVAL OF NONLINEAR TREND IN ECG

*N.O. Tulyakova*

A task of removing a step-like baseline trend in ECG signals that arise due to patient movements is considered. It is proposed to apply In-place growing algorithm of FIR-hybrid median filter for removal of nonlinear distortions of aforementioned class. Study of this algorithm application to model and real data demonstrate removal of complex movement artifacts with large amplitude and duration in real time without introducing sufficient distortions into information signal.

**Key words:** automatic trend correction in ECG signals, movement artifacts. FIR-hybrid median filters.

**Тулякова Наталия Олеговна** – старший преподаватель кафедры информатики, Сумской государственной университет, Сумы, Украина, e-mail: tulyakova@id.sumdu.edu.ua.