

УДК 004.042

DOI: 10.30987/article_5c8b5cebac6217.27543313

Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ АУДИООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Рассмотрены вопросы повышения отношения «сигнал/шум» в телекоммуникациях аудиообмена. Исследованы характеристики речевых сигналов и акустических шумов. Рассмотрены вопросы создания адаптивных алгоритмов подавления акустических помех методами линейной фильтрации.

Ключевые слова: отношение «сигнал/акустическая помеха», речевые сигналы, телекоммуникационные системы, адаптивная фильтрация, спектральная функция, акустические помехи.

Yu.A. Kropotov, A.A. Belov, A.Yu. Proskuryakov

EFFECTIVENESS INCREASE IN AUDIO EXCHANGE TELECOMMUNICATION SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF EXTERNAL ACOUSTIC NOISE BY METHODS OF ADAPTIVE FILTERING

Signal processing in the telecommunication systems of audio-information exchange is conditioned on the requirement in the separation of useful speech acoustic information, in the increase of the verification of information perception by subscribers of a communication system, in the stability increase of telecommunication systems at the suppression of external acoustic interference and echo-signal compensations. Therefore during designing telecommunication systems, in particular, speakerphone systems (SS) operating under conditions of an active impact of external acoustic interference and echo-signals, there is specified a problem of the algorithm formation of efficient noise suppression for an essential "signal-noise" ratio support.

The investigation object is design methods of adaptive algorithms for speech signals processing and acoustic interference suppression at the expense of the controlled change of a rejection area in the range from 0 to 300...1000Hz depending on an interference situation.

Введение

Методы адаптивной фильтрации активно применяются в задаче повышения отношения «сигнал/помеха» [1-3]. При этом обработка сигналов в телекоммуникационных системах обмена аудиоинформацией обусловливается потребностью в выделении полезной речевой акустической информации, в повышении достоверности восприятия информации абонентами системы связи, в повышении устойчивости

The work aim is an investigation of the speech signals characteristics and acoustic noise of different nature and also problems consideration in the matter of an algorithm creation for adaptive filtering and suppression of external acoustic interference and echo-signals. At that the increase of the "signal-acoustic interference" ratio in the systems of audio-exchange telecommunications is carried out through the methods of adaptive filtering.

The results obtained in the course of the investigations of different acoustic interference suppression show that through the method of linear filtering in the system of telecommunications of speech information exchange it is possible to ensure the essential ratio $R_s/R_{ak.pom.} > 20$ dB and, accordingly, an essential syllabic legibility $S \geq 93\%$.

Key words: "signal-acoustic noise" ratio, speech signals, telecommunication signals, adaptive filtering, spectral function, acoustic noise.

телекоммуникационных систем при подавлении внешних акустических помех и компенсации эхо-сигналов. Для решения указанной задачи актуальным является исследование характеристик речевых сигналов и акустических шумов различной природы, а также рассмотрение вопросов создания алгоритмов адаптивной фильтрации и подавления внешних акустических шумовых помех и эхо-сигналов.

Теоретические положения

Известная математическая модель функции плотности вероятности $P(x_i)$ речевых сигналов, разработанная в [4], позволяет получить значения математическо-

$$\bar{x}_i = \sum_{i=-2^n+1}^{2^n-1} x_i P(x_i),$$

где x_i – отсчеты речевых сигналов, квантованные на $2n$ интервалах и нормированные относительно максимальных значений в виде $|\pm x_{max}|=1$ В. Тогда получаем значения $\bar{x}_i \approx 0$ и $\sigma^2 = 0,126$ Вт/Ом.

Соответственно уровень интенсивности звукового давления I относительно нулевого уровня интенсивности $I_0=10^{-12}$ Вт/м² определяется как

$$\frac{I}{I_0}(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{k\sigma^2}{S} 10^{12}, \quad (2)$$

где k – коэффициент направленности громкоговорящего устройства (при излучении в одном направлении принимается $k=2$); $S=4\pi R^2$ – площадь сферы; R – радиус сферы.

го ожидания \bar{x}_i и дисперсии σ^2 речевых сигналов в соответствии с выражениями [4; 5]

$$\sigma^2 = \sum_{i=-(2^n-1)}^{2^n-1} x_i^2 P(x_i), \quad (1)$$

Тогда относительная интенсивность акустического речевого сигнала I_p , вычисляемая с помощью выражения (2) имеет следующее значение:

$$\frac{I_p}{I_0}(\text{дБ}) = 103 \text{ дБ}$$

при $\sigma^2 = 0,126$ Вт, $k=2$, $R=1$ м.

Относительные интенсивности для различных акустических шумов и помех вычисляют, используя значения математического ожидания и дисперсии различных видов акустических помех, определенные по формулам (1), в которых применена математическая модель функции плотности вероятности акустических помех [6]. Значения относительных интенсивностей для различных акустических сигналов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные интенсивности для различных акустических сигналов

Вид сигнала	P, Вт	$\frac{I}{I_0}$, дБ	$\frac{P_c}{P_{ш}}$, дБ
Речевой сигнал	0,126	103	–
Шум квантования	$0,5 \cdot 10^{-5}$	59	44
Акустические помехи (ОСТ В4 Г0.005.004)	$3,5 \cdot 10^{-4}$	85	18
Шум моря	0,0687	90,4	12,6
Шум ветра	0,0953	91,8	11,2
Шум в машинном отделении	0,111	92,5	10,5

Из табл. 1 видно, что при наличии акустических помех, таких как шум моря, шум ветра, шум в машинном отделении, $P_c/P_{ак.пом.}$ находится в пределах 10,5...18 дБ. При таких отношениях «сигнал/помеха» слоговая разборчивость может понижаться до 65 % для случая передачи русской речи. Достоверный прием абонентом переданной речевой информации в таких условиях существенно затрудняется.

Согласно исследованиям [6; 7], для корректного приема речевого сообщения, передаваемого по зашумленному каналу, требуется обеспечить отношение $P_c/P_{ак.пом.}$ не менее 20 дБ. Поэтому при проектировании систем телекоммуникаций, в частности систем ГГС, работающих в условиях воздействия внешних акустических шумовых помех, ставится задача создания алгоритмов эффективного подавления указанных помех для обеспечения

необходимого отношения $P_c/P_{ак.ном.} \geq 20$ дБ.

Исследования спектральных функций речевых сигналов и внешних шумовых помех [6] показали, что спектр наиболее распространенных помех – внешних акустических шумов смещен относительно спектра речевых сигналов в низкочастотную область. Это позволяет предполагать, что для повышения отношения $P_c/P_{ак.ном.}$ можно применять методы линейной фильтрации. Другой фактор, позволяющий применять линейную фильтрацию для подавления акустических шумов, - это возможность увеличения области режекции в диапазоне от $F = 0$ Гц до $F_n = 300...1000$ Гц [6-8]. Из исследований видно, что при увеличении нижней границы воспроизводимых частот до $F=1000$ Гц величина S практически не изменяется, принимает значение не менее 94 %, что является допустимым.

Таким образом, перечисленные факторы позволяют рассмотреть возможность проектирования адаптивных алгоритмов обработки речевых сигналов и подавления акустических помех за счет управляемого изменения области режекции в интервале от 0 до 300...1000 Гц (в зависимости от помеховой обстановки) [8; 10].

Рассмотрим в качестве модели адаптивной фильтрации полосовой фильтр прямоугольной формы с плавающим низкочастотным срезом F_n в АЧХ канала, изменяя F_n в пределах $0 \leq F_n \leq F_6$, где F_6 – фиксированный высокочастотный срез

АЧХ фильтра. АЧХ полосового фильтра $K(f)$ задается в виде

$$K(f) = \begin{cases} 1 & \text{при } F_n \leq f \leq F_6; \\ 0 & \text{при других } f, \end{cases}$$

где $0 \leq F_n \leq F_6$; $F_6 = 6000$ Гц.

При известной спектральной функции речевого сигнала $G(f)$ P_c на выходе полосового фильтра определяется как

$$P_c = \int_{F_n}^{F_6} K^2(f) G(f) df = \int_{F_n}^{F_6} G(f) df,$$

где вторая часть выражения переписана в соответствии с $K^2(f) = 1$ в пределах интегрирования от F_n до F_6 .

Изменяя F_n в пределах $0 \leq F_n \leq F_6$, получаем зависимость P_c от значения частоты низкочастотного среза F_n АЧХ канала. Запишем спектральную функцию энергетического спектра речевого сигнала в виде

$$G(\Delta f \cdot l) = \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{k-1} R(kT) e^{-j2\pi \Delta f \cdot l \cdot kT},$$

где $\Delta f = \frac{F_0}{N}$ - интервал дискретизации спектральной функции по частоте; N - число отсчетов речевого сигнала на конечном интервале; l - номер частотной дискретной составляющей отсчета спектральной функции (находится в пределах $0 < l < N - 1$); $R(kT)$ - АКФ речевого сигнала (представляется сеточной функцией в табл. 2 для одной из реализаций речевого сигнала).

Таблица 2

Сеточная функция АКФ речевого сигнала

kh, kl	k0=0	k1=7	k2=25	k3=54	k4=93	k5=130
R(kh)	R(k0)=0,126	R(k1)=0,115	R(k2)=0,037	R(k3)=-0,048	R(k4)=-0,016	R(k5)=-0,025
kh, kl	k6=182	k7=182	k8=228	k9=245	k10=253	
R(kh)	R(k6)=0,026	R(k7)=0,008	R(k8)=-0,003	R(k9)=-0,001	R(k10)=0	

Математическая модель АКФ речевого сигнала представляется аппроксимацией интерполяционным многочленом Лагранжа десятого порядка в виде

$$R(k) = \sum_{k=0}^{H=10} R(k_h) \prod_{\substack{\ell=0 \\ \ell \neq h}}^{H=10} \frac{k - k_\ell}{k_h - k_\ell},$$

где k – текущая задержка кратная периоду дискретизации T ; kh – задержка в узле с

номером h ; ℓ – текущие задержки остальных узлов при $\ell \neq h$.

Аналогично вычисляется мощность акустических помех $P_{\text{ак.пом.}}$:

$$P_{\text{ак.пом.}} = \int_{F_n}^{F_n} G_{\Pi}(f) df.$$

Спектральная функция $G_{\Pi}(\Delta f)$ акустического шума имеет вид

$$G_{\Pi}(\Delta f \cdot \ell) = \sum_{\ell=0}^{N-1} \sum_{K=0}^{K-1} R_{\Pi}(kT) \ell^{-j2\pi\Delta f \cdot \ell \cdot kT},$$

где $R_{\Pi}(kT)$ – АКФ помехи (представляется также ее аппроксимацией интерполяционным многочленом Лагранжа).

Результаты экспериментальных исследований

Процесс фильтрации спектральных функций речевого сигнала $G(f)$ и помехи $G_{\Pi}(f)$ и, соответственно, изменения отношения $P_c/P_{\text{ш}}$ в зависимости от изменения F_n в пределах $300 \leq F_n \leq 1000$ Гц проиллюстрирован на рис. 1. Хорошо видно, что площадь подынтегральной функции $G_{\Pi}(f)$, соответ-

ствующая $P_{\text{ак.пом.}}$, уменьшается быстрее при изменении F_n от 300 до 1000 Гц, чем площадь подынтегральной функции $G(f)$. Рис. 1 показывает, что основная энергия спектральной функции $G(f)$ остается в пределах от 0 до F_n , то есть вне полосы пропускания фильтра прямоугольной формы.

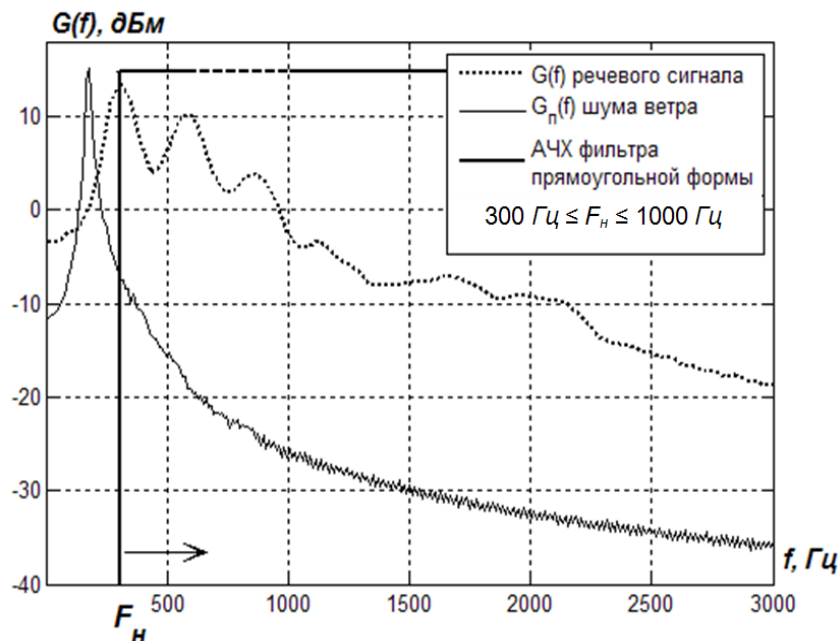


Рис. 1. Иллюстрация модели фильтрации спектральных функций речевого сигнала $G(f)$ и помехи $G_{\Pi}(f)$ в зависимости от изменения значения F_n

Таким образом, отношение значений P_c и $P_{\text{ак.пом.}}$ на выходе фильтра прямоугольной формы показывает зависимость степени подавления акустических шумов относительно речевых сигналов от величины области режекции от 0 до F_n в АЧХ тракта [8; 9]. В дискретном случае представления спектральных функций получим отношение $P_c / P_{\text{ак.пом.}}$ в виде

$$\frac{P_c}{P_{\text{ак.пом.}}} = \frac{\sum_{\ell_n}^{\ell_n} G(\ell \cdot \Delta f)}{\sum_{\ell_n}^{\ell_n} G_{\Pi}(\ell \cdot \Delta f)},$$

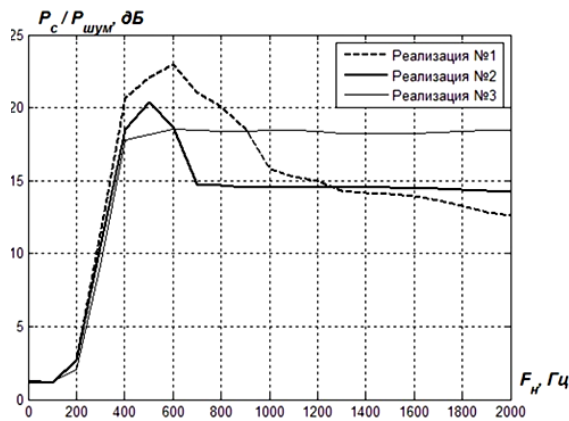
где $\Delta f = \frac{F_d}{N}$ – интервал дискретизации спектральной функции по частоте;

$\ell_H = \frac{F_H}{\Delta f}$ - номер частотного интервала для низкочастотного среза АЧХ F_H . При длительности интервала анализа $\tau_{\text{сегм}}$ число отсчетов в интервале анализа $N = \frac{\tau_{\text{сегм}}}{T}$.

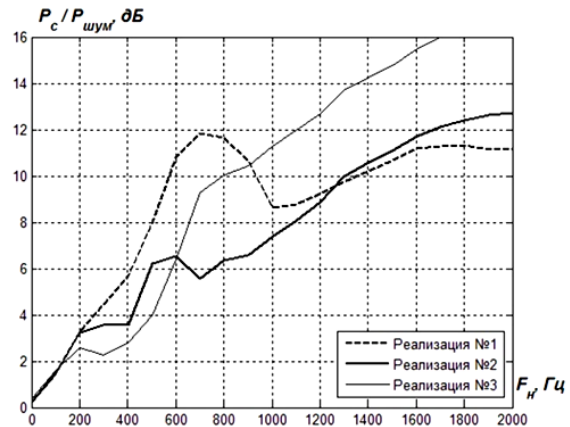
Таким образом, изменяя ℓ_H в выражении для $P_c/P_{\text{ак.пом}}$, получим функцию изменения этого отношения на выходе фильтра прямоугольной формы в зависи-

мости от ширины области подавления, которая находится в пределах от 0 до $F_H = \ell_H \cdot \Delta f$.

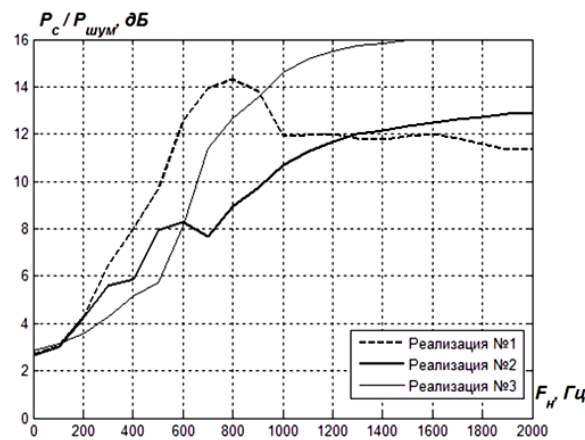
Полученные результаты исследований влияния изменения F_H на $P_c/P_{\text{ак.пом}}$ при фиксированной $F_c=6000$ Гц представлены на рис. 2. В исследованиях рассмотрены случаи для трех различных реализаций речевых сигналов относительно различных внешних шумовых помех.



а. Шум ветра



б. Шум в машинном отделении



в. Шум моря

Рис. 2. Зависимость отношения $P_c/P_{\text{ак.пом}}$ на выходе фильтра прямоугольной формы от значения F_H (при фиксированном значении $F_c=6000$ Гц)

Заключение

Из графиков на рис. 2 видно, что внешние акустические помехи вида «шум ветра», если установить $F_H = 500$ Гц, подавляются на 17...23 дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум в машинном отделении» и при $F_H = 700...1000$ Гц такой акустический шум подавляется до 12 дБ. При воздействии акустической помехи вида «шум моря» при $F_H = 800...1000$ Гц данная помеха подавля-

ется на 11...15 дБ. Полученные результаты исследований подавления акустических шумов показывают, что методом линейной фильтрации можно обеспечить в телекоммуникационной системе обмена речевой информацией необходимое отношение $P_c/P_{\text{ак.пом}} > 20$ дБ и, соответственно, необходимую слоговую разборчивость $S \geq 93$ % [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катковник, В.Я. Методы алгоритмической оптимизации / В.Я. Катковник // Методы исследования нелинейных систем автоматического управления. – М.: Наука, 1975. – 448 с.
 2. Вапник, В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
 3. Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancelation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. – 642 p.
 4. Кропотов, Ю.А. Исследование статистических характеристик оцифрованных сигналов систем телекоммуникаций аудиообмена / Ю.А. Кропотов, А.А. Белов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 4. – С. 150-157.
 5. Быков, А.А. Модель закона распределения вероятности амплитуд сигналов в базе экспоненциальных функций системы / А.А. Быков, Ю.А. Кропотов // Проектирование и технология электронных средств. – 2007. – № 2. – С. 30-34.
 6. Кропотов, Ю.А. Методы проектирования алгоритмов обработки информации телекоммуникационных систем аудиообмена: монография / Ю.А. Кропотов, А.А. Парамонов. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 226 с.
 7. Кропотов, Ю.А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции / Ю.А. Кропотов, А.А. Быков // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 1. – № 1. – С. 60-65.
 8. Кропотов, Ю.А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов / Ю.А. Кропотов // Вопросы радиоэлектроники. – 2010. – Т. 1. – № 1. – С. 57-60.
 9. Kropotov, Y.A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis / Y.A. Kropotov, V.A. Ermolaev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Proceedings, 2015. – Access mode: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7147109/>.
 10. Кропотов, Ю.А. Методы проектирования телекоммуникационных информационно-управляющих систем аудиообмена в сложной помеховой обстановке / Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков, А.А. Колпаков // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 165-183.
1. Katkovnik, V.Ya. Methods of algorithmic optimization / V.Ya. Katkovnik // *Investigation Methods of Automatic Control Non-Linear Systems*. – М.: Science, 1975. – pp. 448.
 2. Vapnik, V.N. *Dependences Recovery on Empirical Data* / V.N. Vapnik. – М.: Science, 1979. – pp. 448.
 3. Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancelation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2006. – 642 p.
 4. Kropotov, Yu.A. Digitized signal statistical characteristics investigation of audio exchange telecommunication systems / Yu.A. Kropotov, A.A. Belov // *Systems of Control, Communications and Safety*. – 2015. – No.4. – pp. 150-157.
 5. Bykov, A.A. Model of law of signal amplitude probability distribution in basis of system exponential functions / A.A. Bykov, Yu.A. Kropotov // *Design and Technology of Electronic Means*. – 2007. – No.2. – pp. 30-34.
 6. Kropotov, Yu.A. *Design Methods of Algorithms for Information Processing of Audio-Exchange Telecommunication Systems*: monograph / Yu.A. Kropotov, A.A. Paramonov. – М.-Berlin: DirectMedia, 2015. – pp. 226.
 7. Kropotov, Yu.A. Algorithm for acoustic noise and lumped interference suppression with formant distribution of rejection bands / Yu.A. Kropotov, A.A. Bykov // *Matters of Radio Electronics*. – 2010. – Vol.1. – pp. 60-65.
 8. Kropotov, Yu.A. Algorithm for computation of rejection channel signal control in multi-channel system of acoustic signal transmission / Yu.A. Kropotov // *Matters of Radio Electronics*. – 2010. – Vol.1. – pp. 57-60.
 9. Kropotov, Y.A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis / Y.A. Kropotov, V.A. Ermolaev // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Proceedings, 2015. – Access mode: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7147109/>.
 10. Kropotov, Yu.A. Methods for designing telecommunication information-control systems of audio exchange in complex interference situation / Yu. A. Kropotov, A.A. Belov, A.Yu. Proskuryakov, A.A. Kolpakov // *Systems of Control, Communications and Safety*. – 2015. – No.2. – pp. 165-183.

Статья поступила в редакцию 20.12.18.

Рецензент: д.т.н., доцент Владимирского государственного университета им. Столетовых Орлов А.А.

Статья принята к публикации 18.02.19.

Сведения об авторах:

Кропотов Юрий Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроника и вычислительная техника»

Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Тел. (49234) 77-2-72, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Белов Алексей Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника»

Kropotov Yury Anatolievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. “Electronics and End Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Belov Alexey Anatolievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Electronics and End Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stole-

Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Проскуряков Александр Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

tovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Proskuryakov Alexander Yurievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Electronics and End Computer Engineering”, Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.