

Подымало Дмитрий Константинович – Ульяновский государственный технический университет; e-mail: СИК_XXI@mail.ru; 432029, Ульяновск, а/я 10351, тел.: +79022452406; кафедра радиотехники, опто- и наноэлектроники; ведущий электроник.

Sergeev Viacheslav Andreevich – Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics; e-mail: ufire@mv.ru; 83, Ablukova street, ap. 177, Ulyanovsk, 432049, Russia; phone: 88422442996; director; dr. of eng. sc.

Tchertoriysky Alexey Arkadievich – e-mail: a-tchertor@yandex.ru; 30, Severny Venetc street, Ulyanovsk, Russia; phone: 88422467009; vice-director on science work; cand. of eng. sc.

Ershov Victor Vasilievich – Limited liability company «Sampol»; e-mail: sampol@mail.ru; 73, Olimpiyskaya street, Samara, 443051, Russia; phone/fax: 8846 9583512; director.

Podymalo Dmitry Konstantinovich – Ulyanovsk State Technical University; e-mail: СИК_XXI@mail.ru; 432029, Ulyanovsk, Russia, а/я 10351; phone: +79022452406; the chair of radioengineering, opto and nanoelectronics; leaing electronic.

УДК 621. 316

Е.И. Старченко, И.В. Бариллов

АРХИТЕКТУРА ТЕМПЕРАТУРНО-СТАБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ, НЕ СВЯЗАННЫХ С ШИРИНОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ КРЕМНИЯ*

Рассматривается возможность построения источников опорного напряжения (ИОН), выходное напряжение которых может относительно произвольно регулироваться и быть как выше, так и ниже ширины запрещенной зоны кремния. Для этих целей используется дифференциальный каскад, к одному из входов которого подключен источник напряжения с отрицательным температурным дрейфом, выполненным на диоде. В результате в одном плече дифференциального каскада формируется ток с отрицательным температурным дрейфом, в другом – с положительным. Для получения ИОН с положительным выходным напряжением необходимо использовать транзисторы p-n-p-типа или полевые транзисторы с каналом p-типа. Использование полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом и каналом p типа в дифференциальном каскаде позволяет, помимо всего прочего, достичь высокой радиационной стойкости. Полученные аналитические выражения и результаты моделирования показывают перспективность такого способа построения ИОН, еще не нашедшего широкого применения.

Источник опорного напряжения; дифференциальный каскад; температурный дрейф.

E.I. Starchenko, I.V. Barilov

TEMPERATURNO'S ARCHITECTURE OF THE STABLE VOLTAGE REFERENCE SUPPLY WHICH HAVE NOT BEEN CONNECTED TO WIDTH OF THE BANDGAP OF SILICON

The possibility of constructing a reference voltage source (RVS), output voltage can be adjusted with respect to arbitrarily and be both above and below the band gap of silicon. For this purpose is used a differential stage, to one input of which is connected with a voltage source a negative temperature drift formed on the diode. As a result, in one arm of a differential stage formed current with a negative temperature drift in the other – with a positive. For RVS with a positive output voltage necessary to use p-n-p transistors or FETs type p-channel type. Using FET

* Подготовлено в рамках Госзадания № 2014/38-2014 г. Минобрнауки РФ.

control yuschim p-n junction channel and p-type differential stage allows, among other things, to achieve high radiation resistance. The obtained analytical expressions and simulation results show the promise of this method for constructing RVS, has not been widely used.

Reference supply source; differential stage; temperature drift.

Введение. Как правило, температурно-стабильные источники опорного напряжения (ИОН) выполняются следующим образом. Известно, что напряжение база-эмиттер биполярного транзистора имеет отрицательный температурный дрейф. В то же время разность напряжений база-эмиттер двух транзисторов, работающих при разной плотности токов эмиттеров, имеет положительный температурный дрейф. Таким образом, суммируя напряжение база-эмиттер транзистора и напряжение, пропорциональное температурному дрейфу разности напряжений база-эмиттер, удалось создать температурно-стабильный элемент в интегральном исполнении. Этот принцип был положен в основу создания ИОН, получившего впоследствии название «диод Видлара» [1]. Выходное напряжение такого ИОН всегда было кратно ширине запрещенной зоны кремния. Дальнейшее развитие схемотехники температурно-стабильных ИОН привело к появлению большого числа ИОН, получивших название «ИОН на основе ширины запрещенной зоны кремния».

Попытки получить выходное напряжение ИОН, не кратное ширине запрещенной зоны кремния, привели к появлению схем, в которых выходное напряжение определялось делителем напряжения обратной связи [2], но в этом случае нельзя было получить выходное напряжение меньше ширины запрещенной зоны кремния. В тех случаях, когда от ИОН требовалось напряжение меньше ширины запрещенной зоны, оно, как правило, было меньше напряжения база-эмиттер транзистора [3].

В данной работе предложены способы построения ИОН, которые еще не получили широкого распространения, но позволяют получить выходное напряжение как больше, так и меньше ширины запрещенной зоны при относительно высокой температурной стабильности.

Способ построения ИОН с произвольным выходным напряжением предложен в [4]. Сущность этого способа заключается в том, что на резисторе суммируются токи с положительным температурным дрейфом (источник тока типа РТАТ) и отрицательным температурным дрейфом (источник тока типа СТАТ) (рис. 1).

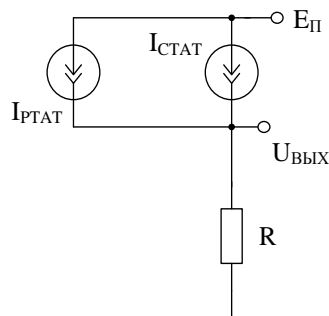


Рис. 1. Способ получения температурно-стабильного напряжения

В схеме ИОН (рис. 1) выходное напряжение определяется как

$$(I_P + I_C)R = U_0, \quad (1)$$

где I_P – ток, пропорциональный температуре; I_C – ток, обратно пропорциональный температуре.

Условие, при котором выходное напряжение имеет нулевой температурный дрейф, выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{\partial I_C}{\partial T} + \frac{\partial I_P}{\partial T} \right) R + \frac{\partial R}{\partial T} (I_C + I_P) = 0, \quad (2)$$

где R – сопротивление суммирующего тока резистора.

Условие (2) относительно легко выполняется, если сопротивление резистора R не зависит от температуры. В противном случае выходное напряжение при нулевом температурном дрейфе будет зависеть и от температурного дрейфа сопротивления резистора R . Кроме того, зачастую температурный дрейф источников тока зависит и от абсолютного значения токов, поэтому схемотехническая реализация такого ИОН достаточно сложна [4]. В частности, в [4] источник тока типа РТАТ выполнен на основе разности напряжения база-эмиттер двух транзисторов, а источник тока типа СТАТ – на основе напряжения база-эмиттер.

Свободны от указанных недостатков функциональные схемы, приведенные на рис. 2.

Для схемы на рис. 2,а выходное напряжение можно определить как

$$I_C R_1 + R_2 (I_P + I_C) = U_0. \quad (3)$$

В этом случае условие температурной стабильности выходного напряжения выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial I_C}{\partial T} = \frac{\partial I_P}{\partial T} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (4)$$

поскольку отношение двух резисторов, выполненных в едином технологическом цикле, практически не зависит от температуры.

Для схемы на рис. 2,б соответствующие выражения выглядят следующим образом:

$$I_P R_1 + R_2 (I_P + I_C) = U_0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_P}{\partial T} = \frac{\partial I_C}{\partial T} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6)$$

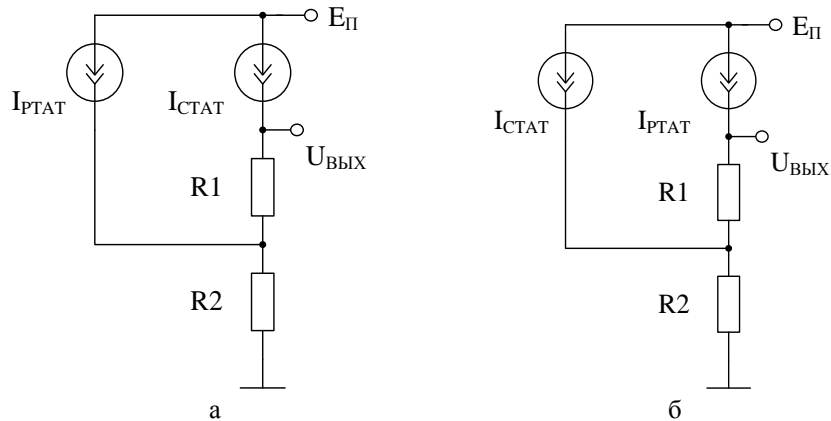


Рис. 2. Функциональные схемы предлагаемых ИОН

Выражения (4) и (6) показывают, что нет необходимости стремиться к тому, чтобы температурные дрейфы токов I_p и I_c были одинаковы по абсолютной величине – отличие температурных дрейфов компенсируется делителем напряжения на резисторах R1 и R2. Характерно, что, выходное напряжение ИОН можно изменять, изменяя сопротивления резисторов, но сохраняя их отношения.

Схемотехнические реализации функциональных схем ИОН, приведенных на рис. 2, представлены на рис. 3.

Особенностью схемы ИОН (рис. 3) является тот факт, что оба источника тока – типа СТАТ и типа РТАТ зависят только от напряжения база-эмиттер. Действительно, при фиксированном напряжении на базе транзистора VT4 температурный дрейф тока коллектора транзистора VT3 определяется напряжениями база-эмиттер транзисторов VT1 и VT2 в диодном включении и транзистора VT3. В частности, в данном включении температурный дрейф тока коллектора транзистора VT3 отрицательный. Но, поскольку при уменьшении тока коллектора транзистора VT3 ток коллектора транзистора VT4 должен возрасть (свойство дифференциального каскада), ток коллектора VT4 имеет положительный температурный дрейф.

Резистор R1 позволяет частично скомпенсировать составляющие второго порядка температурного дрейфа источников тока [5, 6]. Для того чтобы упростить анализ данных схем, в первом приближении положим, что сопротивление резистора $R_1 = 0$, напряжения база-эмиттер всех транзисторов также равны и $R_4 = R_5 = R_0$.

Тогда для контуров, включающих входы дифференциального каскада, можно записать:

$$\begin{cases} U_{БЭ} = I_1 R_0 + (I_1 + I_2) R_6, \\ U_{БЭ} = U_{СМ} - I_2 R_0 - (I_1 + I_2) R_6, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{БЭ}$ – напряжение база-эмиттер; $U_{СМ}$ – напряжение смещения на базе транзистора VT4; I_1, I_2 – соответствующие токи (см. рис. 3,а); R_0, R_6 – сопротивления резисторов в соответствии с позиционным обозначением.

Решая систему уравнений (5), находим:

$$I_3 = (I_1 + I_2) = \frac{U_{СМ}}{2R_6 + R_0}, \quad (6)$$

$$I_1 = \frac{U_{БЭ}}{R_0} - \frac{U_{СМ}}{(2R_6 + R_0)} \frac{R_6}{R_0}, \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{U_{СМ}}{(2R_6 + R_0)} \frac{R_6 + R_0}{R_0} - \frac{U_{БЭ}}{R_0}. \quad (8)$$

Дифференцируя (7) и (8) по температуре, увидим, что знак температурного дрейфа тока I_1 отрицательный, а тока I_2 – положительный. Следует сделать замечание в отношении температурного дрейфа напряжения $U_{СМ}$. Поскольку выполнить источник для напряжения смещения с нулевым температурным дрейфом затруднительно, достаточно, чтобы его температурный дрейф подчинялся условиям:

$$\left| \frac{\partial U_3}{\partial T} \right| > \left| \frac{\partial U_{СМ}}{\partial T} \right| \quad \text{или} \quad \frac{\partial U_{СМ}}{\partial T} \geq 0,$$

где U_3 – напряжение на базе транзистора VT3.

На рис. 3,б приведен возможный вариант реализации источника напряжения смещения, имеющего достаточно малый положительный температурный дрейф.

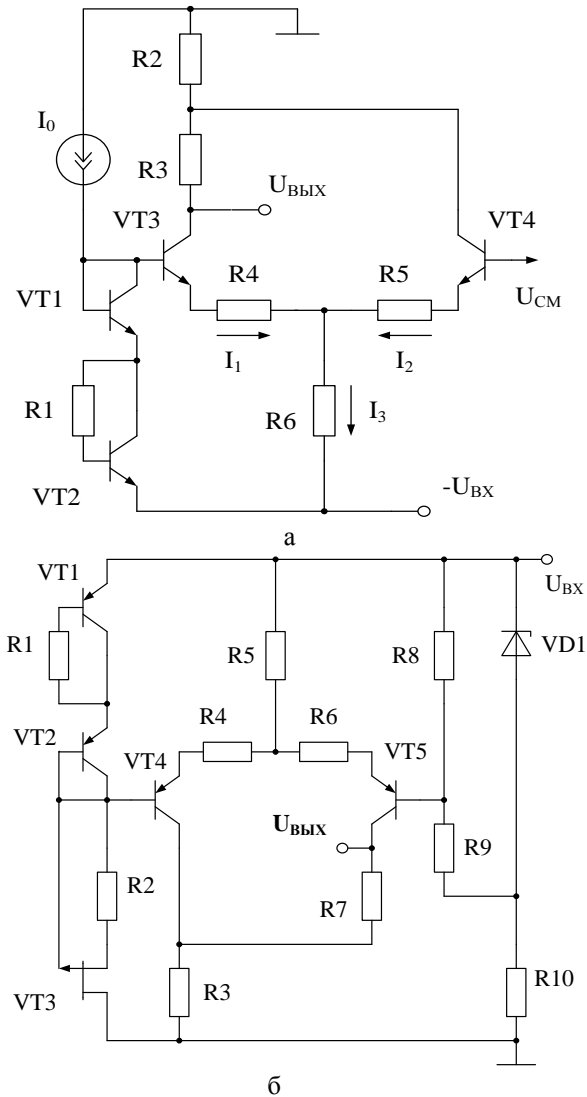


Рис. 3. Схемотехническая реализация ИОН отрицательной полярности (а) и положительной полярности (б)

Следует также отметить, что результирующий температурный дрейф токов I_1 и I_2 не может быть абсолютно одинаковым. Как правило, дрейф тока I_1 будет несколько больше, чем тока I_2 , что связано с разной крутизной преобразования напряжения U_3 в коллектор транзистора VT3 и VT4 соответственно [7, 8]. Тем не менее, варианты функциональных схем ИОН (см. рис. 2) предусматривают любое различие температурного дрейфа.

Результаты моделирования схемы ИОН см. рис. 3,а приведены на рис. 4, а схемы на рис. 3,б – на рис. 5.

Как показывают результаты моделирования, характеристики приводимых схем ИОН примерно одинаковы и их можно отнести к разряду прецизионных.

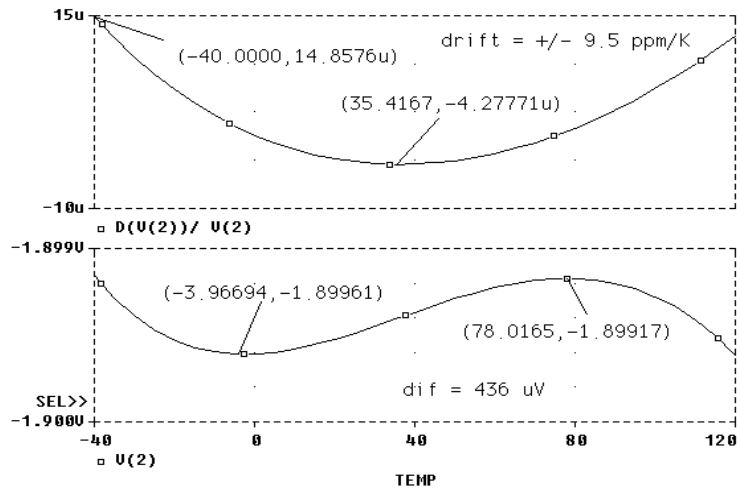


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения (нижний график) и относительного температурного дрейфа (верхний график) схемы ИОН (рис. 3,а)

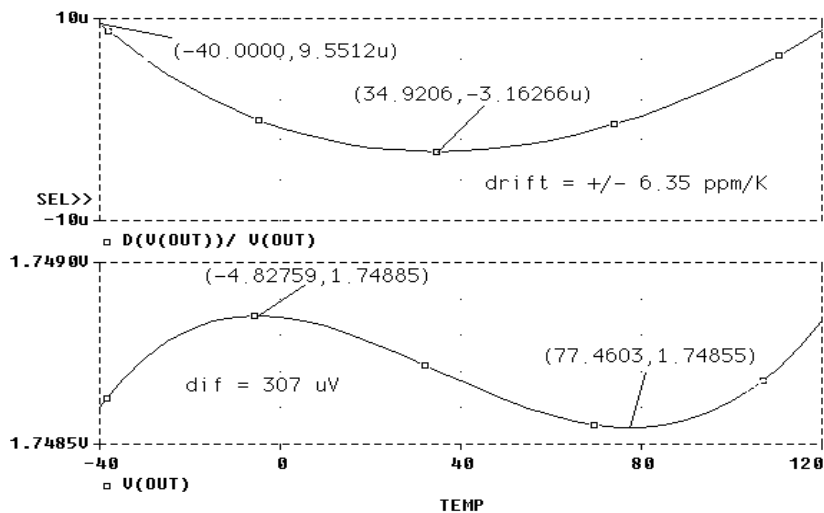


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения (нижний график) и относительного температурного дрейфа (верхний график) схемы ИОН (рис. 3,а)

Радиационно стойкий ИОН. Использование компонентов аналогового базового матричного кристалла АБМК [9] предоставляет разработчику достаточно редкую возможность применения полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и каналом р-типа. На рис. 6 представлена схема ИОН (в среде PSpice), использующая аналогичную архитектуру, но построенная на полевых транзисторах.

Анализ этой схемы достаточно сложен и позволяет получить окончательное решение только в численном виде, поэтому в данной работе приводятся только результаты моделирования (рис. 7). Следует отметить, что начальные рабочие точки полевых транзисторов (при комнатной температуре) выбираются в окрестности температурно-стабильной точки проходной характеристики [10].

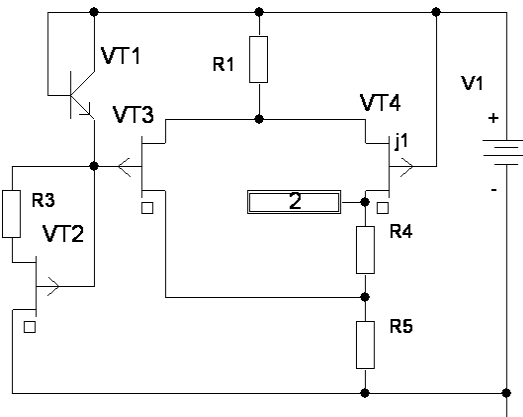


Рис. 6. Схема ИОН на основе полевых транзисторов

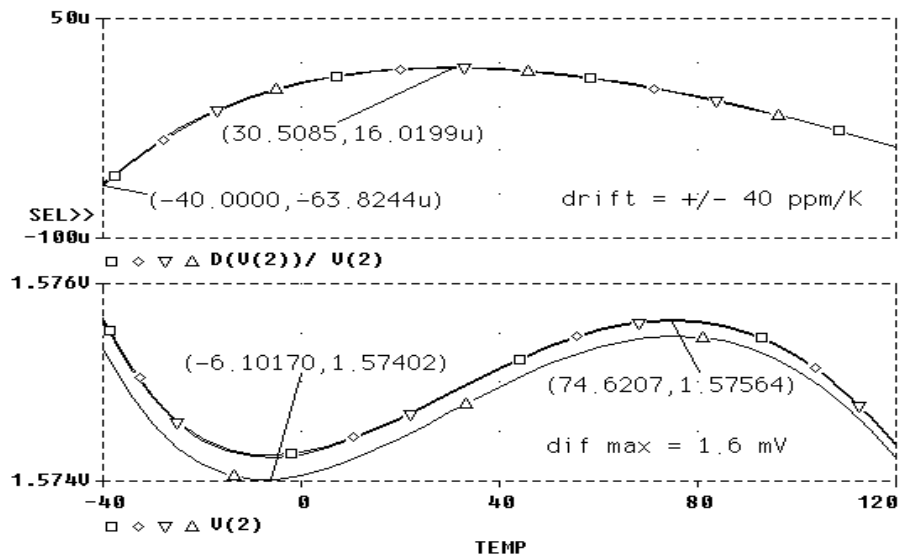


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения схемы ИОН (нижний график) и относительной температурной нестабильности (верхний график) при воздействии температуры и потока нейтронов ($\square - F=0$; $\diamond - F=10^{12} \text{ n/cm}^2$; $\nabla - F=10^{13} \text{ n/cm}^2$; $\nabla - F=10^{14} \text{ n/cm}^2$)

Отметим, что полевые транзисторы, находящиеся в составе АБМК, практически нечувствительны к радиационному воздействию, и вся радиационная нестабильность определяется биполярным транзистором VT1. В результате при одновременном воздействии температуры и потока нейтронов с плотностью вплоть до 10^{14} n/cm^2 (кривая Δ), выходное напряжение меняется всего на 1,6 мВ, а относительный температурный дрейф составляет $\pm 40 \text{ ppm/K}$. То, что в выходном напряжении ИОН доминирует составляющая температурной нестабильности третьего порядка, является «случайностью», обусловленной одновременным влиянием собственной зависимости тока стока дифференциального каскада от температуры [10].

Заключение. В работе рассмотрены схемотехнические приемы проектирования ИОН, выходное напряжение которых не связано с шириной запрещенной зоны кремния. Приводимые результаты моделирования показывают эффективность предлагаемого способа построения ИОН:

- ◆ простота схемотехнической реализации;
- ◆ высокая температурная стабильность;
- ◆ возможность использовать для выполнения дифференциального каскада полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом из компонентов АБМК. В этом случае будет также обеспечена и радиационная стойкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Widlar R.* New development is voltage regulators // *Journal of Solid-State Circuit.* – February 1971. – Vol. SC-6, № 2. – P. 2-7.
2. *Brokaw A.P.* Band-gap voltage reference with curvature correction / US patent No.: 4250445, Feb. 10, 1981.
3. *Ionel Gheorghe, Florinel G. Balteanu.* Low power bandgap circuit / US patent No. 6788041, Sep.7, 2004.
4. *Hung Chang Yu.* Low voltage supply bandgap reference circuit using PTAT and PTVBE current source /US patent № 6366071, Apr. 2, 2002.
5. *Старченко Е.И., Кузнецов П.С.* Источник опорного напряжения / Патент РФ № 2475807, МПК G05F 3/16. Оpubл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
6. *Старченко Е.И., Кузнецов П.С.* Способ компенсации квадратичных составляющих температурного дрейфа источников опорного напряжения // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012: Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2012. – С. 344 -349.
7. *Prokopenko N.N., Vudyakov P.S. and Serebryakov A.I.* Architecture of the Microwave Differential Operating Amplifiers with Paraphrase Output, in International Conference on Signals and Electronic Systems, 2010. – P. 165-168.
8. *Гавлицкий А.И., Малышев В.Г., Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И.* Двухканальный дифференциальный усилитель / Патент РФ № 2452078. Оpubл. 27.05.2012. Бюл. № 12.
9. *Дворников О.В., Чеховской В.А.* Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // *Chip News.* – 1999. – № 2. – С. 21-23.
10. *Достал И.* Операционные усилители: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – С. 60-66.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчичинский.

Старченко Евгений Иванович – Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет»; e-mail: Star@sssu.ru; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: 88636237222, доб. 21-51; кафедра информационных систем и радиотехники; профессор.

Бариллов Иван Васильевич – e-mail: Barilov@sssu.ru; тел.: 88636237222, доб. 20-61; кафедра информатики; к.т.н.; доцент.

Starchenko Evgeny Ivanovich – Institute of Service and Buisness (branch) Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Don State Technical University”; e-mail: Star@sssu.ru; 147, Shevchenko street, Shachty, 346500 Russia; phone: +78636237222, add. 21-51; the department of information systems and radio technical; professor.

Barilov Ivan Vasilyevich – e-mail: Barilov@sssu.ru; phone: +78636237222, add. 20-61; the department of informatics; cand. of eng. sc.; associate professor.