

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ УЗКОПОЛОСНЫХ КАНАЛОВ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИГНАЛОВ С ВНУТРИИМПУЛЬСНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Ананьев А. В.¹, Безуглов Д. А.², Юхнов В. И.²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: sasha303_75@mail.ru.

²Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», 344016, г. Ростов-на-Дону, ул. Варфоломеева, 215, e-mail: bezuglovda@mail.ru

В настоящее время по-прежнему существует интерес к узкополосным системам связи, в том числе КВ-диапазона, поэтому актуальность повышения их качества работы не вызывает сомнений. Известны различные способы повышения помехоустойчивости, к одному из которых следует отнести внесение избыточности в спектр передаваемого сообщения. Одним из вариантов расширения спектра является передача дискретных сообщений сигналами с линейной частотной внутриимпульсной модуляцией. Однако существующие одновременно ограничения по ширине канала и минимальной скорости передачи не позволяют применять сигналы с базой более 10. В то же время оптимальная обработка таких сигналов дает большой уровень побочных выбросов сжатых сигналов (боковых лепестков), борьба с которыми заключается в повышении порога срабатывания устройств обработки информационных последовательностей, что практически исключает выигрыш в отношении сигнал/шум при использовании сигналов с малыми базами. Известные способы снижения уровня боковых лепестков оказываются недостаточно эффективными или неоправданно ресурсоемкими. Поэтому в работе осуществлена разработка способов формирования и обработки сигналов с внутриимпульсной нелинейной частотной модуляцией для узкополосных каналов радиосвязи, реализующих в целом способ снижения уровня боковых лепестков сжатых сигналов, обеспечивающий существенное приближение к потенциальной помехоустойчивости, достигаемой за счет применения методов расширения спектра.

Ключевые слова: помехоустойчивость, обработка сигналов, боковые лепестки.

INCREASE OF INTERFERENCE IMMUNITY OF NARROW-BAND CHANNELS OF THE RADIO SERVICE ON THE BASIS OF APPLICATION OF SIGNALS WITH INTRAIMPULSE FREQUENCY MODULATION

Ananjev A. V.¹, Bezuglov D. A.², Juchnov V. I.²

¹Military educational center of science Military - Air Forces «Military - Air Academy of professor N.E.Zhukovsky and JU.A.Gagarin» (Voronezh). E-mail: sasha303_75@mail.ru.

²Russia, Rostov institute of technology of service and tourism (branch) of Federal public budgetary educational institution of the higher professional education «Southern Russian state university of economy and service», 344016, Rostov-on-Don, Varfolomeyev St. 215, e-mail: bezuglovda@mail.ru

Now still there is an interest to narrow-band communication systems, including the short-wave band, therefore the urgency of increase of their quality of operation does not cause doubts. Various methods of increase of interference immunity are known, of which it is necessary to carry depositing of redundancy in a spectrum of the transmittable message to one. One of variants of the extension of a spectrum is transmission of the discrete messages by signals with the linear frequency intrapulse modulation. However restrictions existing simultaneously on width of the channel and minimum transmission rate do not allow to apply signals with time-bandwidth product more than 10. At the same time optimal handling of such signals gives the big level of side bursts of compressed signals (sidelobes) struggle with which consists in increase of a threshold of actuating of processing devices of information sequences that practically eliminates a scoring in the relation a signal-to-noise ratio at usage of signals with small bases. Known methods of lowering of level of coma lobes appear insufficiently effective or is unjustified resource-demanding. Therefore in scientific publication development of methods of formation and signal processing with intrapulse non-linear frequency modulation for the narrow-band channels of a radio communication implementing as a whole a method of lowering of level of sidelobes of compressed signals, providing essential approach to the potential interference immunity reached at the expense of application of

methods of the extension of a spectrum is carried out.

Keywords: interference immunity, signal processing, sidelobes.

В настоящее время в интересах повышения помехоустойчивости каналов радиосвязи находят широкое применение методы расширения спектра. К одному из таких методов следует отнести передачу информации на основе применения внутриимпульсной линейной частотной модуляции (ЛЧМ). Известны зарубежные стандарты радиосвязи [12] и технические решения по построению приемопередающих устройств для СВЧ диапазона радиосвязи [4] с использованием ЛЧМ-сигналов. В УКВ диапазоне известно применение ЛЧМ в качестве несущей [3]. Применение передачи информации сигналами с внутриимпульсной ЧМ в узкополосных каналах радиосвязи с целью повышения помехоустойчивости возможно только с небольшими базами, так как существуют одновременно ограничения по ширине полосы рабочих частот каналов связи [3] интервалом 12 кГц и необходимость поддержания относительно высоких скоростей передачи информации 600–1200 бит/сек, что не позволяет обеспечить базу сигнала более 10. Известно, что эффект повышения помехоустойчивости за счет применения методов расширения спектра пропорционален базе сигнала, однако при оптимальной обработке возникает необходимость снижения уровня боковых лепестков (УБЛ) сжатых ЛЧМ сигналов, которые снижают реальную помехоустойчивость каналов, при этом влияние боковых лепестков на помехоустойчивость при малых базах выражено еще сильнее, чем при больших. Вопросам снижения уровня боковых лепестков сжатого импульса посвящено много работ в области радиолокации (работы Вакмана Д. Е., Кнышева И. П., Кочемасова В. Н., Белова Л. А., Оконечникова В. С., Кука Ч., Бернфельда М., Родионова В. В., Рукавишников В. М., Филонова Ю. В., Фурмана Я. А., Кревецкого А. В. и др.). Однако рассмотренные в этих работах технические решения относятся к широкополосным сигналам с большими базами, требуют существенных аппаратных затрат и ведут к увеличению длительности сжатого импульса, а следовательно, к снижению эффекта повышения.

Поэтому целью работы является повышение помехоустойчивости узкополосных каналов радиосвязи на основе применения НЧМ сигналов с малой базой и разработки эффективного способа снижения уровня боковых лепестков сжатых импульсов.

Анализ известных работ, посвященных снижению УБЛ сжатых импульсов, позволяет выделить следующие методы: формирование нелинейно частотно модулированных сигналов; весовая обработка принимаемых ЛЧМ сигналов (проводится как во временной, так и в частотной области); обработка амплитудного спектра принимаемых ЛЧМ сигналов скорректированными весовыми функциями.

В работе предлагается метод снижения УБЛ, основанный на формировании сигналов

с нелинейной частотной модуляцией (НЧМ) и их обработке в устройствах с оптимальными (в смысле максимума отношения уровня основного лепестка к уровню боковых лепестков при минимальном расширении основного) частотными характеристиками.

Наиболее близким к предлагаемому в работе методу является метод обратных пульсаций [5], основанный на весовой обработке в частотной области скорректированной весовой функцией сжатого сигнала на выходе коррелятора, дающей гарантированный уровень боковых лепестков сжатого ЛЧМ-сигнала (например, окно Хемминга, Наталла, Чебышева и др.). Закон обработки амплитудного спектра сигнала при этом находится как отношение известной весовой функции к огибающей амплитудного спектра сигнала

$$F(\omega) = \frac{W(\omega)}{S_1(\omega)}, \quad (1)$$

где $W(\omega)$ - весовая функция, реализующая известное взвешивающее окно; $S_1(\omega)$ - огибающая амплитудного спектра исходного ЛЧМ – сигнала, после амплитудно – частотной коррекции ЛЧМ – сигнал сжимается в устройстве сжатия (например, дисперсионной линии задержки). Недостатком этого способа является расширение основного лепестка и, как следствие, снижение отношения сигнал/шум. В работе предлагается способ снижения УБЛ включающий расширение сжатого импульса, заключающийся в определении законов обработки амплитудного спектра сигнала $F(\omega)$ и фазового спектра $\Psi(\omega)$ сигнала.

1. Формирование сигналов с внутриимпульсной нелинейной частотной модуляцией

Существуют различные варианты законов нелинейной частотной модуляции [1, 2, 6, 10, 11, 14, 13], однако они не эффективны по тем или иным причинам для сигналов с малой базой. Поэтому в работе предложен гармонический закон НЧМ и определены его оптимальные параметры:

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t + \Delta\omega \sin \Omega t, \quad (2)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – начальная круговая частота, f_0 – начальная линейная частота, $\beta = \frac{\omega_0}{t_u}$ – скорость изменения круговой частоты, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая девиация частоты, $\Delta\omega$ – величина максимального приращения к закону изменения частоты, Ω – частота изменения закона внутриимпульсной модуляции. При изменении частоты в соответствии (2) и положительной скорости β фаза будет изменяться по закону:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2} - \frac{\Delta\omega}{\Omega} \cos \Omega t \quad (3)$$

Приняв, $m = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$, перепишем выражение (3):

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2} - m \cos \Omega t \quad (4)$$

При изменении фазы сигнала в соответствии с (4) импульс с НЧМ будет описываться выражением:

$$S(t) = \begin{cases} S_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\beta t^2}{2} - m \cos \Omega t\right), & 0 > t > t_u \\ 0, & t_u > t \end{cases} \quad (5)$$

Варьируя частотой закона НЧМ Ω и величиной максимального приращения по отношению к линейному закону изменения несущей частоты $\Delta\omega$, можно максимизировать отношение максимума основного лепестка автокорреляционной функции НЧМ-сигнала к уровню боковых лепестков при допустимом расширении основного лепестка $t_{u0дон}$.

$$\max_{\Omega, \Delta\omega} \frac{\int_{-t_u/2}^{-t_u/2} S(t)S(t-\tau) dt}{\max(S_{бок})} \quad (6)$$

Решение задачи (6) осуществлено в два этапа. На первом этапе была установлена частота Ω закона НЧМ, а на втором определена величина максимального приращения к закону изменения частоты $\Delta\omega$. На рисунке 1 представлено частное решение задачи (6).

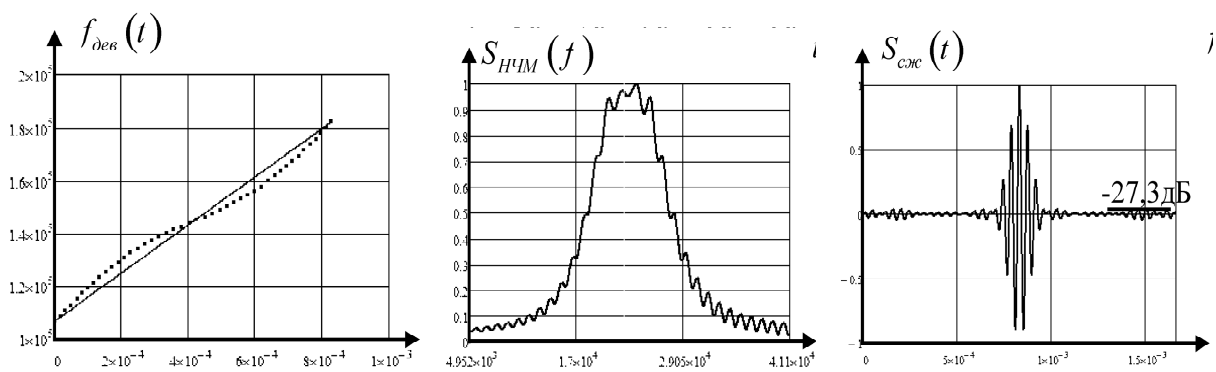


Рисунок 1. Закон НЧМ (а), спектр НЧМ (б), АКФ сжатого НЧМ сигнала (в)

Установлено, что к снижению уровня боковых лепестков приводит частота НЧМ (рисунок 1а) равная $\Omega = 2\pi / t_u$, в то время как другие варианты искажают спектр и существенно увеличивают ширину сжатого импульса, что соответствует источнику [2].

На втором этапе для сигнала с НЧМ численными способами были определены зависимости $S_{бок}(m)$ и относительного расширения основного лепестка

$$D(m) = \frac{t_{u_0 НЧМ}}{t_{u_0 ЛЧМ}} \quad (7)$$

для различных значений базы B . На рисунке 2 представлены зависимости $S_{бок}(m)$, $D(m)$ в % по основанию основного лепестка сжатого сигнала и по уровню 0.5 для базы $B=10$.

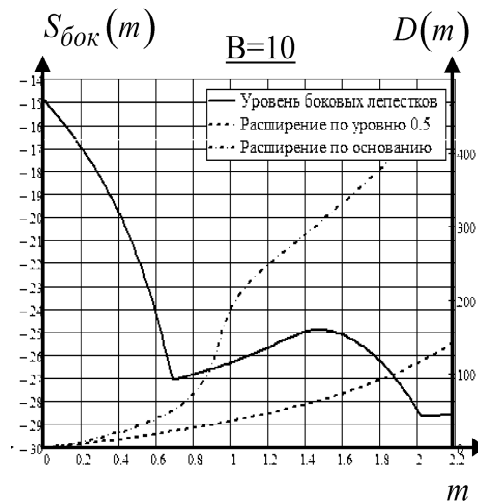


Рисунок 2. Зависимости уровня боковых лепестков и ширины основного лепестка от m

Полученные графики позволяют сделать следующие выводы: зависимость УБЛ от величины m нелинейная и экстремальные точки; существует первый локальный экстремум, в пределах которого отсутствует резкое увеличение ширины основного лепестка, особенно по основанию; для различных значений B сигналов с НЧМ локальные экстремумы зависимости $S_{бок}(m)$ имеют различные координаты. Нетрудно видеть, что при $m=0.7$ УБЛ минимален, а расширение основного по уровню 0,5 не превосходит 25 %. Оптимизация глубины модуляции m в законе НЧМ (4) позволяет скруглить спектр (рисунок 1б) и снизить УБЛ до 25-28 дБ (рисунок 1в). Для формирования сигналов с НЧМ был разработан способ формирования на основе фазовой модуляции [8] и устройство его реализующее [7].

2. Обработка сигналов с внутриимпульсной НЧМ

В работе предлагается способ обработки НЧМ на основе определения оптимальных характеристик устройств обработки по требуемой форме выходного импульса. Способ разработан на основе источника [9].

На *первом этапе* выходной импульс задается в виде гауссова импульса соответствующего основному лепестку автокорреляционной функции НЧМ сигнала:

$$s_2(t) = e^{-\alpha(t_u-t)^2} \cos(2\pi f_0 t), \quad (8)$$

где f_0 – центральная частота сигнала. Для определения требуемого коэффициента α в законе Гаусса осуществляется аппроксимация основного лепестка АКФ НЧМ сигнала.

На **втором этапе** определяется требуемый закон АЧХ устройства обработки

$$F(\omega) = \left| \frac{S_2(j\omega)}{S_1(j\omega)} \right| = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} s_2(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) e^{-j\omega t} dt} \right|, \quad (9)$$

где $S_1(j\omega)$ – комплексный спектр сигнала с НЧМ, $S_2(j\omega)$ – комплексный спектр на выходе.

На **третьем этапе** определяется требуемый закон фазочастотной характеристики

$$\Psi(\omega) = -\arg \left(\frac{S_2(j, \omega)}{S_1(j, \omega)} \right), \quad (10)$$

связанный с требуемым законом ГВЗ выражением:

$$T_r = \frac{d\Psi(\omega)}{d\omega}. \quad (11)$$

Полученный закон ФЧХ $\Psi(\omega)$ обеспечивает такой сдвиг гармоник, что во время существования основного лепестка сжатого НЧМ обеспечивается синфазное сложение составляющих амплитудного спектра, а во время существования боковых лепестков – противофазное. Требуемые характеристики (9), (10), (11) вычислены на основе использования дискретного преобразования Фурье и представлены соответственно на рисунках 3,4. Расчет характеристик (9), (11) для НЧМ-сигнала с параметрами: длительность $t_u = 1.8 \text{ мсек}$, $f_{\text{дес}} = 5 \text{ кГц}$, начальная частота ЛЧМ-сигнала $f_n = 50 \text{ кГц}$, конечная частота ЛЧМ-сигнала $f_k = 55 \text{ кГц}$.

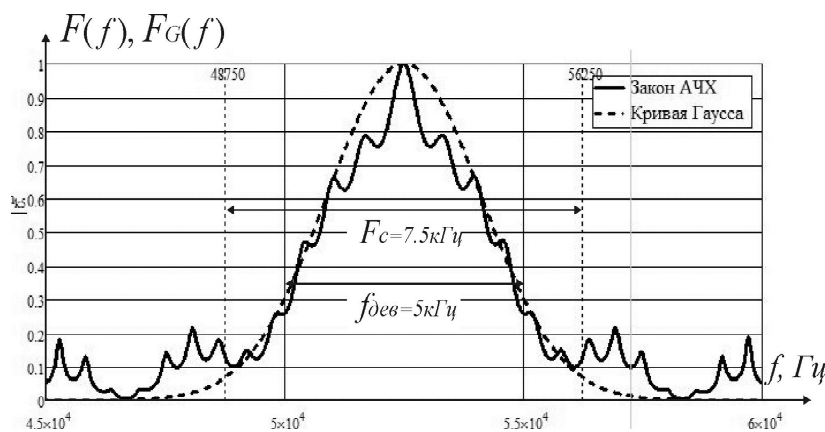


Рисунок 3. Требуемый закон АЧХ фильтрового устройства обработки НЧМ сигнала

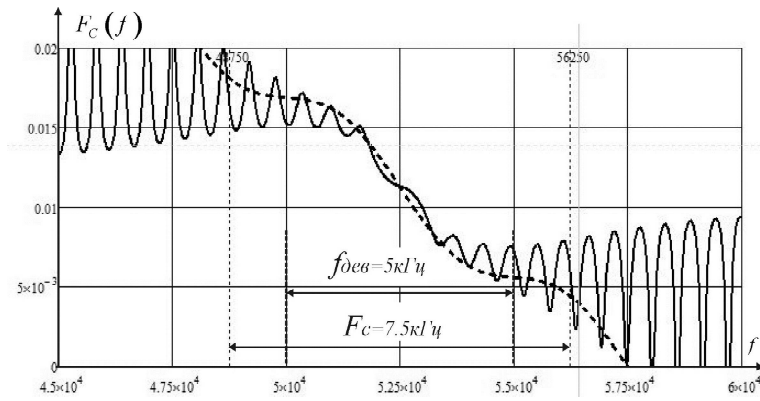


Рисунок 4. Требуемый закон ГВЗ устройства обработки фазового спектра НЧМ сигнала

На рисунке 5 представлен частный случай обработки НЧМ сигнала на выходе устройства с частотными характеристиками (9) и (10).

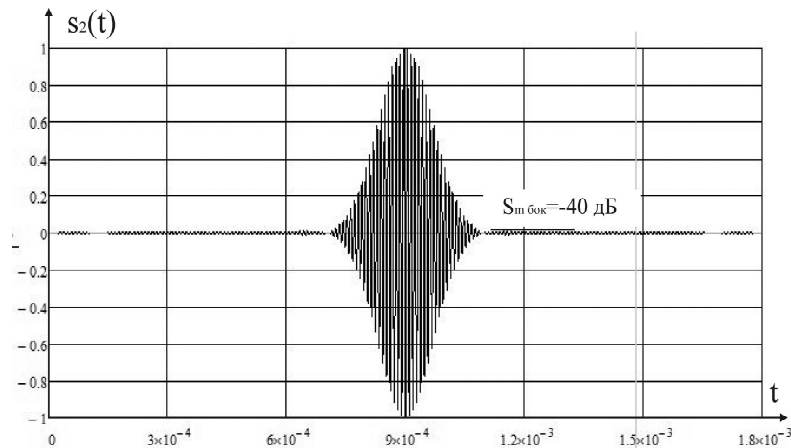


Рисунок 5. Сжатый НЧМ сигнал на выходе устройства обработки

Выводы. Таким образом, при применении сигналов с малой базой (порядка 10), сочтя формирование по простейшему нелинейному закону с оптимизированными параметрами глубины модуляции и обработку такого сигнала в приемном устройстве с АЧХ, вычисленной по закону (9) и нелинейной характеристикой ГВЗ, вычисленной по закону (11) при ограничении полосы обработки сигналов по 98 %-му уровню энергии сигнала, подавление боковых лепестков составляет порядка -40 дБ. Потери в отношении сигнал/шум за счет несогласования фильтрации составили 0.88 дБ.

Исследование проведено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14В37.21.2067

Список литературы

1. Беседа А. Л., Зубков М. В. Сигналы с нелинейной частотной модуляцией, имеющие низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции / А. Л. Беседа, М. В. Зубков // Вопросы радиоэлектроники. 2008. №2. С. 101-112.
2. Вакман Д. Е. Сложные сигнала и принцип неопределенности в радиолокации. М.: Советское радио, 1965. 303 с.
3. ГОСТ 52016-2003 Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн.
4. Козачок Н. И., Радько Н. М., Степанов В. Г., Иркутский О. А., Колтаков А. И. Использование ЛЧМ-сигналов в приемопередающих устройствах с фильтровой обработкой. XIV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2008. Т. 2. С.1060-1065.
5. Кочемасов В. Н., Оконечников В. С. Сжатие частотно-модулированных сигналов с небольшим произведением девиации частоты на длительность импульса // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1. С. 82-94.
6. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / Пер. с англ. под ред. Кельзона В. С. М.: Советское радио, 1971. С. 568.
7. Пат. 101292 РФ, МПК H03C 3/00. Фазовый модулятор / А.В. Ананьев, Б. Ф. Змий (РФ). № 2010116494/09; Заяв. 26.04.2010; Опубл. 10.01.2011, Бюл. №1. 3с.: ил.
8. Пат. 2439776 РФ, МПК H03C 3/38. Способ фазовой модуляции сигнала / А. В. Ананьев, Б. Ф. Змий (РФ). – № 2009108632/08; Заяв. 10.03.2009; Опубл. 10.01.2012, Бюл. №1. 6с.: ил.
9. Пат. 2447455 РФ, МПК G01S 13/02. Способ уменьшения уровня боковых лепестков сжатого ЛЧМ-сигнала / А. В. Ананьев, Б. Ф. Змий (РФ). – № 2010143068/07; Заяв. 20.10.2010; Опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. 11с.: ил.
10. Свистов В. М. Радиолокационные сигналы и их обработка. М.: Советское радио, 1997. 584 с.
11. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника, пер. с англ. Т. 3. М.: Советское радио, 1978. 528 с. High performance CSS transceiver enabling location awareness TN100. www.st.com
12. IEEE Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Std 802.15.4a™-2007.
13. Levanon, N., Mozeson, E. Radar Signals. IEEE Press 2004. P. 427.
14. Price, R., Chebyshev low pulse compression sidelobes via nonlinear FM. National Radio Science Meeting of URSI, Seattle, WA June 18, 1979.

Рецензенты:

Звездина Марина Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой "Радиоэлектроника", Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный универси-

тет экономики и сервиса», г. Ростов-на-Дону.

Мищенко Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Радиоэлектроника", Минобрнауки России, Ростовский технологический институт сервиса и туризма (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса», г. Ростов-на-Дону.