

С. В. Дворников¹¹ Военная академия связи им. С. М. Буденного

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИМИТОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются вопросы оценки имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией. Представляются результаты, характеризующие вероятность ошибки в зависимости от длительности интервалов совпадения структурной помехи с сигналом. Даются предложения по практическому использованию результатов.

Ключевые слова: имитационная устойчивость, канал управления, структурные помехи.

Введение

Широкое использование роботизированных устройств в силовых структурах является одним из приоритетных направлений развития технологических производств, в том числе и в Российской Федерации. Прежде всего, это обусловлено особенностями их беспилотной эксплуатации, что позволяет использовать такие устройства в техногенных и опасных для жизни людей ситуациях.

Однако слабой стороной роботизированных систем являются их каналы управления, посредством которых возможно осуществить внешнее деструктивное воздействие. Так, несмотря на высокие технологические характеристики оптоволоконных кабелей, их практическое применение ограничивается сотнями метров, поэтому основой управления указанных систем являются радиоканалы. Следовательно, именно устойчивость радиоканалов определяет эффективность и эксплуатационную надежность роботизированных систем и устройств. Поэтому вопросам обеспечения безопасности радиоканалов управления и их устойчивости к воздействию различного рода помех должно уделяться первостепенное внимание как при проектировании, так и при эксплуатации роботизированных систем и устройств.

Анализ подходов к организации функционирования роботизированных систем показал, что для их управления используется достаточно ограниченный набор команд. Причем в качестве модуляционного формата исторически применяются сигнальные конструкции, в основе которых лежит частотная модуляция (манипуляция) [1]. В перспективе возможен переход на шумоподобные сигналы, в настоящее время применяемые для управления беспилотными летательными аппаратами легкого класса.

Значит, именно наличие радиоканала делает роботизированные системы уязвимыми к сторонним воздействиям, в качестве которых могут использоваться в том числе и имитационные помехи.

Согласно [2], постановка имитационных помех является наиболее эффективным способом радиоэлектронного подавления, поскольку обеспечивает требуемый результат при достаточно низком энергопотреблении (сопоставимом с энергопотенциалом подавляемой радиолинии). При этом имитационные помехи довольно сложно идентифицируются, что придает скрытый характер самому процессу деструктивного воздействия.

Более того, посредством постановки имитационных помех возможно обеспечить перехват управления роботизированной системой, что открывает новые перспективы в информационно-техническом противоборстве.

Именно поэтому радиоэлектронное подавление, заключающееся в постановке имитационных помех каналу управления, можно отнести к одному из наиболее опасных видов деструктивного воздействия на роботизированные системы.

Применительно к настоящей статье определим процесс постановки имитационных помех как процесс имитонавязывания, а способность роботизированной системы противостоять имитонавязыванию определим как имитостойкость.

Одним из достоинств имитонавязывания является отсутствие явных признаков деструктивных воздействий, что существенно затрудняет своевременное принятие мер противодействия. Между тем проблема имитонавязывания неоднократно рассматривалась в различных работах [2; 3], что указывает на актуальность рассматриваемой тематики.

Вероятностная модель оценки имитационной стойкости каналов управления, использующих сигналы с частотной манипуляцией

В контексте рассматриваемой статьи имитонавязывание будет представлять собой процесс постановки помех, имеющих близкую к сигналам команд управления частотно-временную структуру, в каналы управления. Такого рода деструктивное воздействие сводится к подмене полезного сигнала помехой [2], создающей условия, при которых значение демодулированного символа будет определяться структурой имитационной помехи (рис. 1).

Так, на рис. 1 показано три тактовых интервала τ_1 , τ_2 , τ_3 двухпозиционного частотно-манипулированного сигнала управления (ЧМ-2) $s(t)$, соответствующих информационным символам «1» и «0». На этом же рисунке представлена структурная помеха $u(t)$, соответствующая информационному символу «0», передаваемая в пределах тактового интервала τ_2 , в пределах которого по каналу управления передается информационный символ «1».

В результате для каналов управления, использующих сигналы ЧМ-2, структурная помеха деструктивного характера будет создавать на входе демодуляторов ситуацию, при которой решение о демодулированном символе осуществляется случайным образом.

Действительно, результирующая смесь $z(t)$ содержит информацию как о полезном сигнале, соответствующем информационному символу «1», так и о помехе, соответствующей информационному символу «0».

Указанную ситуацию более наглядно отражает частотно-временное представление $z(t)$ на длительности тактового интервала τ_2 (рис. 2).

Очевидно, что на длительности τ_2 , представленной на рис. 2б, сложно однозначно на основе энергетического критерия принять решение об истинном значении передаваемого символа. Заметим, что рассматриваемая ситуация возможна только

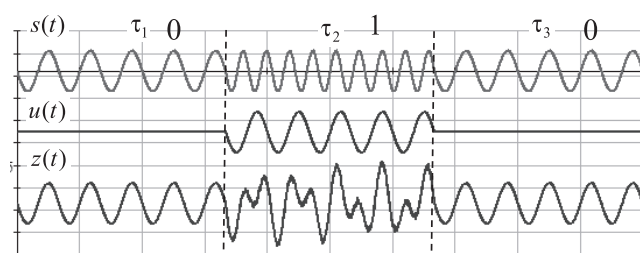


Рисунок 1. Временная структура полезного сигнала $s(t)$, структурной помехи $u(t)$ и результирующей смеси на входе демодулятора $z(t)$

в том случае, если структура помехи в каждый момент времени будет соответствовать противоположному символу, передаваемому по каналу управления сигналом ЧМ-2.

С позиций системы радиоподавления рассматриваемая ситуация полного тактового совпадения структурной помехи и информационного сигнала в процессе имитонавязывания является идеальной.

Тем временем в достаточной степени высокая динамика перемещения роботизированных систем предполагает для каналов управления с сигналами ЧМ-2 использование только методов некогерентного детектирования, при которых, согласно [4], обеспечивается вероятность битовой ошибки, равная

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_B}{2N_0}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2} h_0^2\right), \quad (1)$$

где E_B – энергия, приходящаяся на бит (для бинарных передач – на символ ЕС); N_0 – спектральная плотность мощности шума; $h_0^2 = \frac{E_B}{N_0} = \frac{E_C}{N_0}$ – отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума (ОСШ) (в рассматриваемой ситуации – спектральной плотности мощности структурной помехи).

На рис. 3 представлена зависимость P_B от ОСШ.

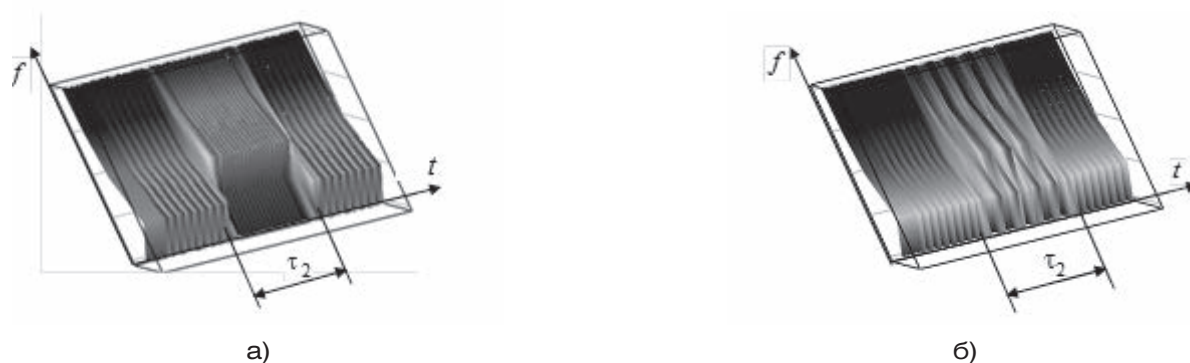


Рисунок 2. Частотно-временное представление процесса имитонавязывания: а) частотно-временное представление сигнала управления $s(t)$ с выделенным фрагментом τ_2 , соответствующим информационному символу «1»; б) представление сигнала $z(t)$

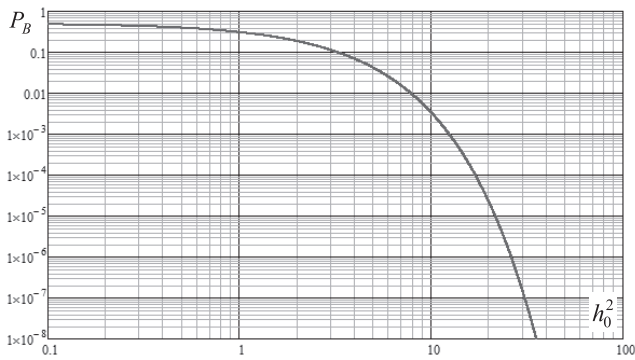


Рисунок 3. Зависимость вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сигналов ЧМ-2 от ОСШ

В условиях имитонавязывания значение P_B можно будет преобразовать к следующему виду:

$$\tilde{P}_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_C}{2(N_0 + E_{II})}\right), \quad (2)$$

где E_{II} – энергия имитационной помехи на длительности символа.

На рис. 4 представлена зависимость P_B от ОСШ при имитонавязывании посредством структурных помех мощностью $E_{II} = E_C/2$ и $E_{II} = E_C/4$ в условиях тактового совпадения помех и сигналов.

Итак, анализ известных подходов к постановке структурных помех [2] показал, что одной из проблем, определяющих их эффективность, является сложность обеспечения тактовой синхронизации с подавляемым сигналом. Поэтому, несмотря на детерминированность структуры команд, высокая динамика перемещения роботизированных систем приводит к тому, что для большинства такой показатель, как разность между дистанциями связи и подавления, будет представлять собой случайную величину, которую сложно учитывать. В таких условиях обеспечение тактовой синхронизации помехи и сигнала становится нетривиальной задачей.

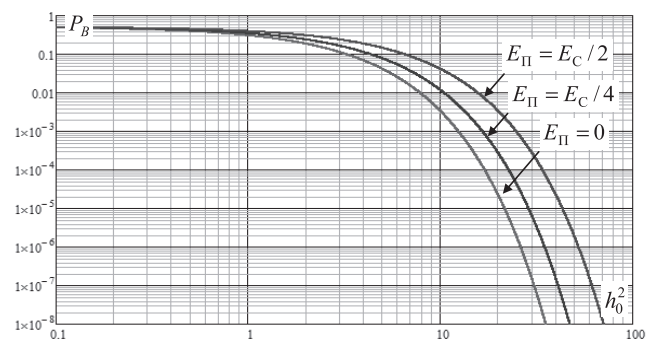


Рисунок 4. Зависимость вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сигналов ЧМ-2 от ОСШ в условиях имитонавязывания

В конечном итоге чрезмерное повышение мощности структурной помехи приведет к срабатыванию пороговых устройств и блокированию дальнейшего приема искаженного сигнала, исключающего имитонавязывания. Следовательно, система постановки помех вынуждена будет варьировать такой величиной помехи, как период излучения.

С целью учета ущерба, наносимого в процессе постановки помех, предлагается ввести понятие коэффициента эффективности имитонавязывания ρ , который будет характеризовать временное несоответствие структурной помехи и подавляемого сигнала на входе демодулятора. На рис. 5 представлены эпюры, поясняющие физическую сущность коэффициента ρ .

В соответствии с логикой, предложенный коэффициент ρ лежит в пределах, то есть значение $\rho = 1$ соответствует условиям эффективного деструктивного воздействия, при котором на тактовом интервале помехой формируется логический символ, полностью противоположный символу, передаваемому сигналом управления, а $\rho = 0$ соответствует условиям передачи помехой символа, полностью совпадающего с передаваемым управляющим сигналом, то есть будет способствовать его достоверному приему. Другими словами, чем выше значение ρ , тем эффективнее имитонавязывание.

Применительно к рис. 5, на тактовом интервале τ_2 значение коэффициента имитонавязывания будет определяться как $\rho = \frac{\tau_{II} - \Delta\tau_2}{\tau_c}$. Заметим, что для тактового интервала τ_3 , напротив, на длительности $\Delta\tau_2$ имитационная помеха совпадает по структуре с информационным сигналом и, следовательно, приведет к повышению достоверности правильного приема.

С энергетических позиций для системы имитонавязывания наилучшая ситуация наступит в случае равенства энергии структурной помехи E_{II} и энергии полезного сигнала E_C на решающем

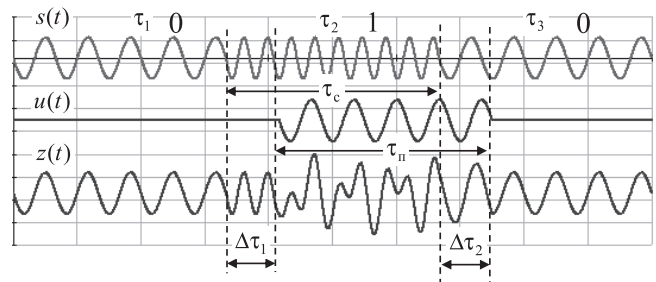


Рисунок 5. Временная структура полезного сигнала $s(t)$, структурной помехи $u(t)$ и результирующей смеси на входе демодулятора $z(t)$ при тактовой рассинхронизации помехи и сигнала

устройстве, что возможно обеспечить при повышении мощности структурных помех до

$$E_{II} \frac{E_C}{\rho}. \quad (3)$$

В этом случае деструктивное воздействие достигается даже при значении $\rho < 1$. Однако применение пороговых ограничителей на входе демодуляторов сигналов ЧМ-2 не позволяет обеспечить достижения равенства (3).

Следовательно, будем полагать, что система деструктивного воздействия стремится к решению задач имитонавязывания только за счет тактового совпадения, при котором обеспечивается равенство (3), приводящее к полной неопределенности на входе решающего устройства демодулятора роботизированной системы.

С учетом указанных замечаний, выражение (1) можно представить следующим образом:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_C + (1-2\rho)E_{II}}{2N_0}\right). \quad (4)$$

Далее преобразуем выражение (4) к следующему виду:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_C}{2N_0} + \frac{(2\rho-1)E_{II}}{2N_0}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-0,5h_0^2 + (\rho-0,5)h_0^2\right), \quad (5)$$

где $h_0^2 = \frac{E_{II}}{N_0}$ – отношение энергии помехи к спектральной плотности мощности шума (ОПШ).

Если допустить равенство значений, обеспечиваемое, например, за счет ограничителя на входе, то формулу (5) можно представить как

$$P_B = \frac{1}{2} \exp(-h_0^2 + \rho h_0^2) = \frac{1}{2} \exp(h_0^2(\rho-1)). \quad (6)$$

Выражение (5) наглядно позволяет оценить влияние значения ОСШ на вероятность ошибки имитонавязывания. На рис. 6 показана зависимость $P_B(\rho)$

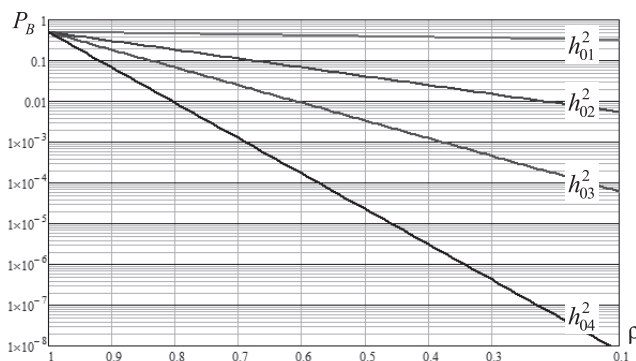


Рисунок 6. Зависимость вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сигналов ЧМ-2 от ОСШ

при значениях ОСШ $h_{01}^2 = 0$ дБ, $h_{02}^2 = 10$ дБ, $h_{03}^2 = 13$ дБ, $h_{04}^2 = 16$ дБ.

Анализ полученных результатов указывает на существенную зависимость $P_B(\rho)$ от параметра ρ . Так, начиная с ОСШ 16 дБ в радиоканале, 10%-ное увеличение коэффициента имитонавязывания приводит к ухудшению показателя P_B более чем на порядок.

Результаты, представленные на рис. 6, характеризуют только частный случай ($h_0^2 = h_0^2$), описываемый формулой (6). Для общего случая в качестве модели оценки вероятности ошибки в канале с частотной модуляцией в условиях воздействия оптимальных по структуре имитационных помех целесообразно рассматривать выражение (4).

Определим такую модель, как модель оценки деструктивного урона, нанесенного в результате имитонавязывания. Модель (4) характеризует зависимость имитонавязывания от тактового совпадения помехи и полезного сигнала (совпадение по времени), которое в выражении (4) учитывается посредством параметра ρ .

Так, при $\rho = 1$, то есть при $P_B = 0,5$, имеется полная неопределенность на решающем устройстве демодулятора, а при $\rho = 0$ в результате суммирования энергии сигнала и помехи достоверность принятия правильного решения повышается.

В то же время анализ результатов, представленных на рис. 6, однозначно указывает на то, что имитонавязывание определяется не только величиной ρ , но и текущими значениями ОСШ и ОПШ. Чем ниже исходное значение ОСШ, тем выше эффективность деструктивного воздействия, поскольку меньшее значение энергии помехи необходимо приложить при той же временной синхронизации с сигналом для обеспечения искомой величины P_B .

В подтверждение данного заключения, на рис. 7 представлены результаты зависимости вероятности битовой ошибки P_B от ОСШ при различных значениях ρ .

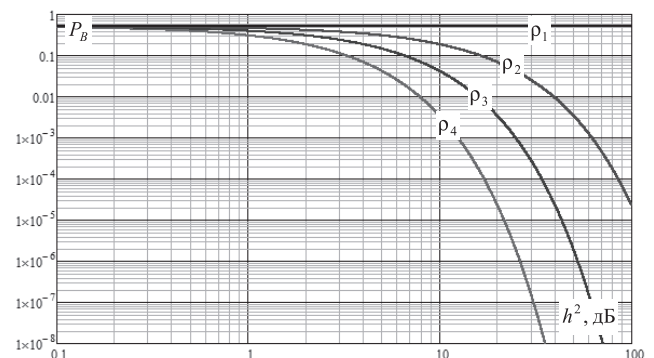


Рисунок 7. Зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ при различных значениях коэффициента временного несовпадения

В качестве искомым при построении графиков на рис. 7 были определены следующие значения коэффициента эффективности имитонавязывания: $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 0,8$; $\rho_3 = 0,5$ и $\rho_2 = 0$.

Полученная вероятностная оценка позволяет выработать конструктивные предложения по защите каналов управления от имитонавязывания.

В частности, анализ результатов на рис. 5 показал, что аддитивное сложение помехи и сигнала приводит к увеличению биений результирующего излучения, которое может быть использовано в качестве признака имитонавязывания.

Заключение

Проведенные исследования показали, что имитонавязывание, как процесс передачи заведомо ложных команд, представляет реальную угрозу для каналов управления. Это связано с тем, что обнаружение имитационных помех, имеющих близкую к сигналам управления частотно-временную структуру, связано с определенными сложностями.

Фактически, эффективность имитонавязывания существенно зависит от временного совпадения тактовых интервалов излучения помех и сигналов на входе демодулятора. Следовательно,

целесообразно использовать команды с различными тактовыми интервалами следования сигналов (использовать псевдослучайный режим) или использовать радиоизлучения, формируемые в негармонических базисах [5], что существенно усложнит процедуры их синтеза для систем деструктивных воздействий. В этом случае использование методов распознавания, предложенных в [6], позволит решить проблему идентификации самого факта имитонавязывания.

Другой конструктивной мерой, позволяющей избежать имитонавязывания, является установка на входе демодулятора индикатора уровня принимаемого сигнала. Понятно, что при имитонавязывании возрастет как энергия суммарного сигнала на входе демодулятора, так и величина его дисперсии. Указанные особенности могут выступать в качестве признаков деструктивного воздействия еще на стадии обнаружения сигналов, в интересах которых может использоваться подход, представленный в [7].

Дальнейшие исследования предполагаются в направлении разработки методов имитозащиты на основе исправления ошибок, обусловленных структурными помехами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Точилов, Л. Системы управления БЛА. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html (свободный доступ).
2. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Под ред. В.Г. Радзиевского. – М.: Радиотехника, 2006.
3. Орошук, И. М. Метод обнаружения и фильтрации имитационных помех в Рэлеевских каналах с замиряниями // Безопасность информационных технологий. – 2002. – № 3. – С. 75–79.
4. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Пер. с англ. / Изд. 2-е испр. – М.: ИД «Вильямс». – 2004.
5. Агиевич, С.Н., Дворников, С.В., Гусельников, А.С. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Виленкина – Кристенсона // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 3. – С. 52–57.
6. Дворников, С.В., Сауков, А.М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14. – № 1. – С. 85–93.
7. Дворников, С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14. – № 4. – С. 92–97.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дворников Сергей Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиосвязи Военной академии связи им. С.М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.3, e-mail: proctidsv@yandex.ru.

For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 2. – P. 64–69.
S. V Dvornikov

PROCEDURE OF EVALUATION OF IMITATION STABILITY OF ROBOTIC DEVICES CONTROL CHANNELS

There are considered the matters of evaluation of an immanence of control channels with frequency modulation. There are presented the results characterizing probability of error depending on duration of intervals of coincidence of a structural noise with signal. There are proposed some practical use of results.

Keywords: imitation stability, control channel, structural noises.

REFERENCES

1. Tochilov, L. *Sistemy upravleniya BLA*. – [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html (svobodnyi dostup).
2. *Sovremennaya radioelektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii / Pod red. V.G. Radzievskogo*. – M.: Radiotekhnika, 2006.
3. Oroshuk, I.M. *Metod obnaruzheniya i fil'tracii imitacionnyh pomeh v Releevskih kanalakh s zamiraniyami // Bezopasnost' informacionnyh tehnologiy*. – 2002. – № 3. – S. 75–79.
4. Sklyar, B. *Cifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye / Per. s angl. / Izd. 2-e ispr.* – M.: ID «Vil'yams». – 2004.
5. Agievich, S.N., Dvornikov, S.V., Gusef'nikov, A.S. *Opisanie signalov v bazisah funktsii splain-Vilenkina – Kristensona // Kontrol'. Diagnostika*. – 2009. – № 3. – S. 52–57.
6. Dvornikov, S.V., Saukov, A.M. *Metod raspoznavaniya radiosignalov na osnove veivlet-paketov // Nauchnoe priborostroeniye*. – 2004. – T. 14. – № 1. – S. 85–93.
7. Dvornikov, S.V. *Metod obnaruzheniya na osnove posimvol'nogo peremnozheniya realizatsii spektra nablyudaemogo processa s avtomaticheskim raschetom poroga prinyatiya resheniya // Nauchnoe priborostroeniye*. – 2004. – T. 14. – № 4. – S. 92–97.

AUTHOR

Dvornikov Sergey, Dr. Sc. in Technical Sciences, Prof., Professor of the Radio Communication Chair, S.M. Budjonny Military Academy of the Signal Corps, Russian Federation, 194064, Saint-Petersburg, Tikhoretskiy pr., 3, e-mail: procticdsv@yandex.ru.