

Д. А. Сахаров,
К. А. Батенков,
О. Н. Катков,
А. А. Афанасьев

Влияние нестационарных помех в анализе информационных моделей с модуляцией с одной и несколькими несущими

Целью исследования является попытка проанализировать наиболее часто встречающиеся механизмы воздействия импульсного шума на данные, передаваемые в символах систем модуляции с одной несущей и несколькими. В работе решается задача качественного анализа деструктивного воздействия импульсной помехи на возможность восстановления символов цифровых систем модуляции, функционирующих на базе медножильной кабельной инфраструктуры. Проведенный анализ в качестве методов исследования использует индукцию, позволяющую распространить единичные частные случаи искажения символов на обобщенные процедуры деградации качества передаваемой информации; аналогию, предусматривающую рассмотрение схожих механизмов изменения данных в потоке модулированных сигналов с одной несущей и несколькими. Новизна полученных результатов заключается в обобщении процесса возникновения ошибок декодирования вследствие шумовых всплесков на системы с одной несущей и несколькими, а также в разграничении влияния длительности и мощности импульса шума на передаваемые символы. В качестве основного результата работы можно отметить выявление неоднозначности воздействия импульсного шума на системы передачи цифровых абонентских линий, выражаемой в необходимости учета при анализе как параметров самого шума и типа модуляции, так и энергетических и временных соотношений между полезным сигналом и шумом. Таким образом, в работе показано, что степень деструктивности воздействия импульсного шума на систему передачи цифровой абонентской линии определяется несколькими характеристиками, учет которых необходим при разработке механизмов защиты от помех, или, наоборот, для обоснования нецелесообразности их использования.

Ключевые слова: сеть связи, система DSL, нестационарные помехи, импульсный шум, информационная модель.

D.A. Sakharov,
K.A. Batenkov,
O.N. Katkov,
A.A. Afanasiev

Influence of non-stationary interference in analyzing information models with one and several carrier modulation

The aim of the study is to try to analyze the most common mechanisms of impulse noise impact on data transmitted in the symbols of single-carrier and multi-carrier modulation systems. The paper solves the problem of a qualitative analysis of the destructive effect of impulse noise on the possibility of restoring symbols of digital modulation systems operating on the basis of a copper cable infrastructure. The performed analysis uses induction as research methods, which allows extending isolated special cases of symbol distortion to the generalized procedures for degrading the transmitted information quality; an analogy involving the consideration of similar mechanisms for modifying data in a stream of modulated signals with one carrier and multiple ones. The novelty of the findings obtained consists in generalizing the process of decoding errors due to noise bursts to the systems with one carrier and several ones, as well as in differentiating the influence of the noise pulse duration and power on the transmitted symbols. As the main findings of the work, we can note the identification of the impact ambiguity of impulse noise on the transmission systems of digital subscriber lines, expressed in the necessity to take into account while analyzing both the parameters of the noise itself and the type of modulation, and the energy and time relationships between the useful signal and noise. Thus, the work shows that the destructiveness degree of the impulse noise impact on the transmission system of a digital subscriber line is determined by several characteristics that should be taken into account when developing mechanisms for the protection against interference, or, conversely, to justify the inappropriateness of their use.

Keywords: communication network, DSL system, transient interference, impulse noise, information model.

Введение

Импульсный шум является основным нестационарным нерегламентированным воздействием, влияющим на системы *DSL* (цифровой абонентский шлейф). Он присутствует во многих абонентских шлейфах и был довольно качественно изучен, однако до сих пор существуют определенные пробелы. Известно, что импульсный шум вызван физическими явлениями, такими как разряды молнии, а также деятельностью человека: двигатели и переходные процессы переключения, вызванные аналоговыми реле, могут создавать элек-

тромагнитные помехи, которые проявляются в виде всплесков шума на медных витых парах.

Импульсный шум проникает через неэкранированную часть абонентского шлейфа. Следовательно, импульсный шум может появляться либо на стороне оборудования оператора, и в этом случае он в основном связан с переключением, либо на оборудовании в помещении клиента, его источником обычно являются физические явления или обычные бытовые приборы, такие как фен или холодильник, моторы. На рис. 1 показан импульсный шум, измеренный на шлейфе *DSL*.

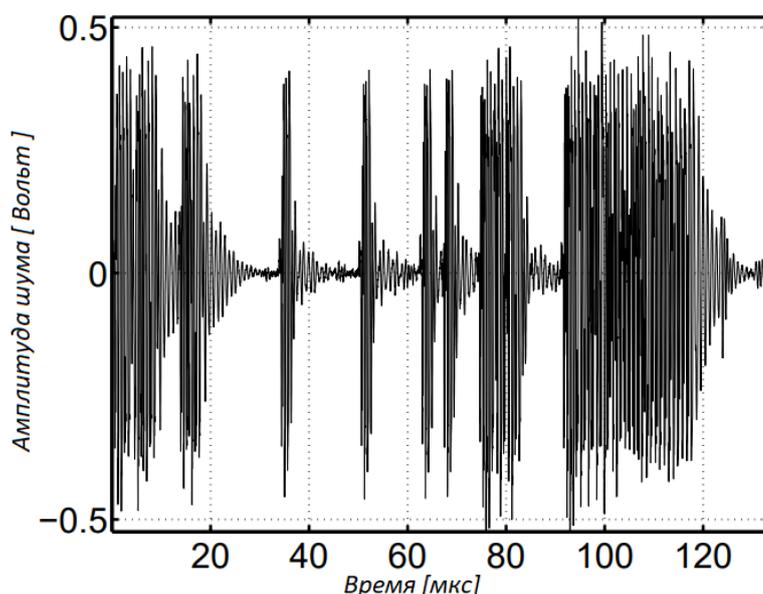


Рис. 1. График зависимости амплитуды импульсного шума от времени

Характеристика импульсного шума

Основными характеристиками импульсного шума являются его нестационарный характер и высокая энергия по сравнению с фоновым шумом и перекрестными помехами. Более того, импульсный шум возникает короткими импульсами. Параметры, которые обычно используются для характеристики импульсного шума, - это амплитуда импульса, длительность импульса, время между приходом двух последовательных импульсов и форма сигнала. Исследования показали, что амплитуда импульса меньше 30 мВ для большинства шумовых всплесков, хотя иногда может достигать значений до 500 мВ. Тем не менее, это происходит с малой вероятностью. Напряжение передаваемого сигнала в типичных системах *ADSL* (асимметричный цифровой абонентский шлейф) и *VDSL* (высокоскоростной

цифровой абонентский шлейф) не превышает 1–1,5 Вольт.

Наличие импульсного шума приводит к совершенно иной ситуации по сравнению с маломощным стационарным шумом. Наложение шумовых импульсов на передаваемый сигнал может привести к тому, что некоторые символы будут искажены без возможности восстановления. Более того, невозможно спроектировать систему, рассматривая импульсный шум как стационарный источник шума, потому что из-за высоких значений импульсного шума в худшем случае результирующая скорость передачи битов будет очень низкой.

Другим важным параметром при проектировании и оценке характеристик системы *DSL* в отношении импульсного шума является длительность интервала времени между двумя последовательными всплесками шума. На практике, если два длинных и сильных им-

пульса очень близки друг к другу, система защиты от шума может быть не в состоянии гарантировать безошибочную передачу, и единственный способ восстановить данные - это использовать повторные передачи, согласованные на более высоком уровне.

Наконец, важной характеристикой импульсного шума является большое разнообразие возможных форм сигналов. Получить простое описание форм сигналов непросто, поскольку автокорреляция импульсов зависит не только от их длительности и амплитуды, спектр также имеет тенденцию сильно отличаться для разных импульсов.

Модели импульсного шума

Существует потребность в создании моделей импульсного шума. С практической точки зрения также важно иметь возможность точно предсказать всплески шума, возникающие на абонентских линиях. Если репрезентативная модель шума станет доступной, это позволит провести теоретический анализ поведения системы в присутствии импульсного шума. Даже если детальный теоретический анализ не поддается обработке, хорошие модели помогут определить репрезентативные наборы шумовых импульсов, которые будут использоваться в симуляциях или реальных тестах системы.

Единого мнения о том, как должны генерироваться импульсы, пока не достигнуто. Предлагается метод создания импульсов на основе статистики измеренных шумовых выборок. Более конкретно, длина шума выбирается в соответствии с функцией распределения вероятности длины, а затем используется для генерации синтетической автокорреляционной функции с использованием метода

Tough&Ward, который также включает информацию о статистике выборок шума.

Другой подход заключается в следующем, измеренные всплески шума классифицируются с использованием неконтролируемых методов. Как оказалось, небольшое количество репрезентативных классов может быть получено с использованием нормализованной совокупной PSD (Спектральная плотность мощности) измеренных шумовых импульсов. Предлагаемая схема генерации импульсного шума использует репрезентативные шумовые элементы производных классов.

Чтобы воспользоваться преимуществами обоих методов, был предложен метод, сочетающий эти два подхода. Предлагается использовать метод классификации, чтобы найти репрезентативные классы импульсного шума, а затем использовать статистику выборок импульсов каждого класса для генерации импульсных сигналов для каждого класса импульсного шума отдельно, используя метод Tough&Ward.

На сегодняшний день не согласована универсальная модель импульсного шума. Для тестирования модемов различных производителей операторы в настоящее время либо используют всплески шума, измеренные в их собственных шлейфах, либо генерируют всплески AWGN (аддитивный белый гауссовский шум).

Влияние импульсного шума на системы DSL

Рассмотрим систему SCM (модуляция с одной несущей). Всплеск шума $s(t)$ будет наложен на стационарный шум $n(t)$, состоящий из фонового шума и перекрестных помех, как показано на рис. 2. Сигнал y_k после АЦП и до эквалайзера может быть выражен как

$$y_k = y_{k, \text{ без шума}} + n_k + s_k = y_{k, \text{ без импульса}} + s_k,$$

где $y_{k, \text{ без импульса}}$ — обозначает выборки, которые были бы приняты, если бы импульсный

шум не ухудшила передачу, и s_k является частью y_k только из-за импульсного шума.

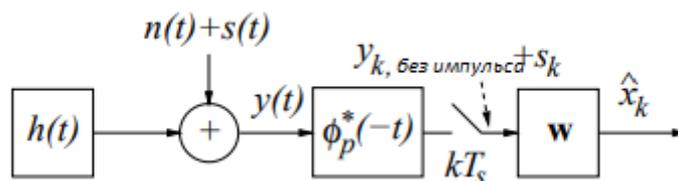


Рис. 2. Влияние импульсного шума на системы SCM

Если используется линейный эквалайзер w , отклонение оценки \hat{x}_k от значения, которое оно имело бы, если бы $s(t)$ не присутствовало, можно найти с помощью простого векторного умножения. Однако, если используется нелинейный *DFE* (эквалайзер обратной связи), анализ становится громоздким, поскольку выход эквалайзера также зависит от значений переданных данных x_k .

Если используется приемопередатчик на основе *DMT* (дискретная многочастотная модуляция), влияние импульсного шума в час-

тотной области рассматривается проще благодаря *FFT* (быстрое преобразование Фурье) приемнике. Как показано на рис. 3, совокупный сигнал, состоящий из суммы принятых форм сигналов, фонового шума и шумового всплеска, сначала передается на согласованный фильтр и дискретизируется в моменты времени mT_s . Затем, после отбрасывания циклического префикса, дискретный сигнал проходит через *FFT* приемника, а половина оставшегося эрмитова $2N$ -вектора сохраняется.

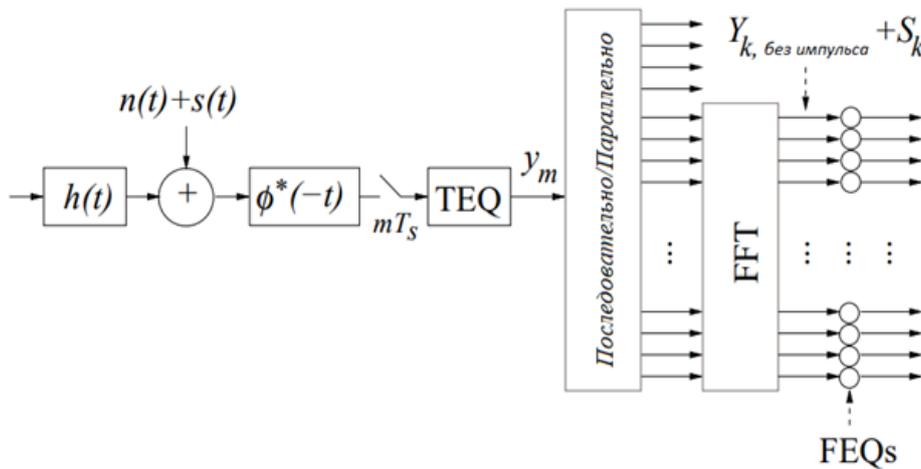


Рис. 3. Влияние импульсного шума на системы DMT

Используя линейность *FFT*, принятые символы Y_k в каждом подканале могут быть выражены как

$$Y_k = Y_{k, \text{ без шума}} + N_k + S_k = Y_{k, \text{ без импульса}} + S_k$$

Тогда для оценки \hat{X}_k

$$\hat{X}_k = \frac{Y_k}{\hat{H}_k} = X_k + \frac{N_k + S_k}{\hat{H}_k} = \hat{X}_{k, \text{ без импульса}} + \frac{S_k}{\hat{H}_k} = \hat{X}_{k, \text{ без импульса}} + \tilde{S}_k$$

Следовательно, аналогично системам *SCM*, возмущение каждой оценки \hat{X}_k из-за импульсного шума можно рассматривать как вектор \tilde{S}_k , который добавляется к значению, которое \hat{X}_k имел бы в отсутствие импульсного шума. Однако для случая *DMT* эта суперпозиция выполняется с использованием *FFT* шумового взрыва. Если система *DMT* использует простой *FEQ* (эквалайзер частотной области) с одним отводом, вычисление \tilde{S}_k будет тривиальным, если известен шумовой пакет $s(t)$.

Основываясь на разнице в вычислении вектора искажения, который добавляется к передаваемым символам, легко предсказать разни-

цу в поведении систем *DMT* и *SCM* в отношении импульсного шума. Предположим, что на линии *DSL* появляется очень пиковый (во временной области) шумовой всплеск, и что очень мало ненулевых отсчетов s_k достаточно больших, чтобы приводить к ошибкам декодирования в приемнике. Это означает, что если используется система *DSL* на основе *SCM*, все символы, которые передаются по каналу в момент появления шумового импульса, искажаются без возможности восстановления. Однако, если используется система *DMT*, *FFT* на приемнике будет распространять энергию шумового импульса на несколько тонов. Сле-

довательно, есть большая вероятность, что результирующие значения \tilde{S}_k будут достаточно малы, и все переданные символы будут правильно декодированы. Это свойство, то есть то, что системы *DMT* более устойчивы к пиковым импульсам, является хорошо известным преимуществом модуляции с несколькими несущими по сравнению с модуляцией с одной несущей. Таким образом, системы *DMT* являются лучшим выбором, если ожидается, что короткие и относительно маломощные импульсы ухудшат передачу через абонентский виток.

С другой стороны, рассмотрим оконную синусоиду относительно небольшой амплитуды, которая накладывается на передаваемый сигнал, так что выборки s_k возмущения во временной области, показанного на рис. 2, были достаточно малы. В этом случае все оценки символов \hat{X}_k могут быть правильными, и система *SCM* обеспечит передачу без ошибок.

Однако, если используется система *DMT*, результатом *FFT* будет линия в частотной области. Соответствующее частоте импульса \tilde{S}_k (или набору \tilde{S}_k в зоне утечки), может быть достаточно большим, чтобы исказить оценки \hat{X}_k . В этом случае система *DMT* может быть не в состоянии правильно оценить эти символы. Хотя оконная синусоида может быть крайним случаем импульсного шума, некоторые из наблюдаемых импульсов имеют тенденцию демонстрировать пики в некоторых частях частотного спектра. Когда появляются такие импульсы, системы *SCM* могут иметь преимущество перед *DMT*.

Хотя сторонники *SCM* и *DMT* спорят о том, какая система демонстрирует лучшую устойчивость к импульсным помехам, вероятно, невозможно прийти к общему выводу, поскольку разброс импульсов, которые появляются на линиях *DSL*, очень велик. На абонентском контуре могут наблюдаться как пиковые, так и узкополосные импульсы, а также большое количество промежуточных случаев. Если нет надежной и точной модели импульсного шума, возникающего в каждом контуре, который позволил бы количественно оценить производительность каждой из схем модуляции, вероятно, разумно предположить, что, учитывая разнообразие шумовых всплесков, системы *DMT* и *SCM* будут демонстрировать одинаковые характеристики в отношении импульсного шума.

Прежде чем завершить сравнение систем *SCM* и *DMT* в отношении импульсного шума, следует упомянуть еще об одном различии между двумя схемами модуляции. В *SCM* используется посимвольная передача, тогда как в *DMT* данные передаются блоками, каждый из которых содержит N символов данных. Для случая *ADSL* и *VDSL* длительность каждого блока *DMT* равна 250 мкс. Сторонники *SCM* утверждают, что если импульс короче, чем размер блока *DMT* появляется на линии *DSL*, система на основе *DMT* будет затронута вдвое большей продолжительности блока (из-за возможного несоответствия между символами *DMT* и импульсов), тогда как длительность возмущения в системе *SCM* будет не более чем точно равна длительности шумового импульса. Пример того, как может произойти такое несоответствие, показан на рис. 4.

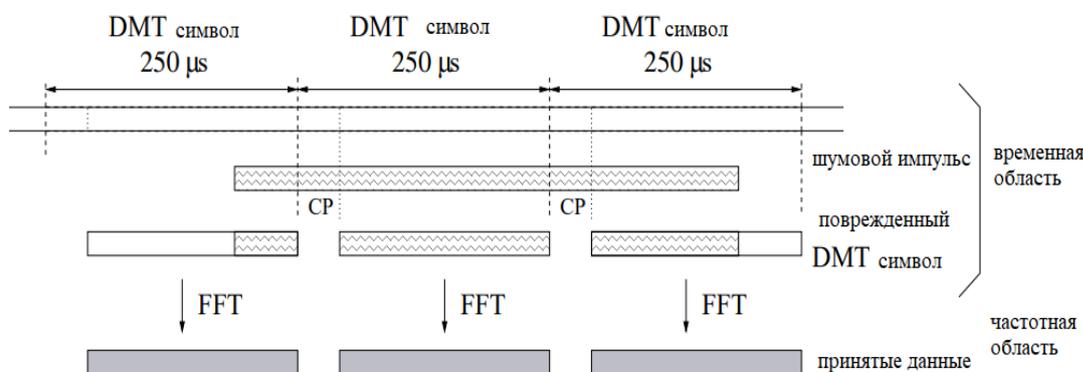


Рис. 4. Несовпадение между символами *DMT* и импульсным шумом

Подобные искажения информации в блоке вследствие воздействия импульсного шума

возникают не всегда. Во-первых, это может произойти только тогда, когда выборки дан-

ного импульса настолько велики, что они ухудшают большинство символов в системы *DMT* после расширения *FFT*. Более того, появление импульса в системе *SCM* вызовет распространение ошибки, если используется *DFE* (что, вероятно, будет тем выбором для эквалайзера, если требуется хорошая производительность). Таким образом, даже в системе на основе *SCM* продолжительность искажения может быть больше, чем длительность импульса.

Отметим, что в ходе рассуждений акцентировалось внимание, по сути, на одиночных ошибках декодирования, однако подобные выводы при определенных допущениях можно распространить на ошибки произвольной кратности.

Заключение

Степень деструктивности воздействия импульсного шума на систему передачи цифровой абонентской линии определяется несколькими характеристиками, такими как количество используемых несущих, статистические параметры импульсного шума (распределения длительности и мощности импульсов), линейная скорость системы передачи и отношение сигнал–шум. Учет подобных параметров необходим при разработке механизмов защиты от помех, или, наоборот, для обоснования не-

целесообразности их использования в процессе эргономического обеспечения разработки и эксплуатации информационных моделей.

Используемый в работе подход к анализу влияния нестационарных помех на системы модуляции имеет преимущественно качественную форму. С одной стороны, это обстоятельство существенно сужает возможности количественной оценки показателей качества подобных систем. Так, известные подходы к аналитическому или имитационному моделированию позволяют в форме математических соотношений, либо на основе статистического анализа доступных экспериментальных данных показать степень влияния рассматриваемых параметров импульсных шумов в основном на вероятность или коэффициент ошибок. Однако при подобных исследованиях приходится вводить значительные ограничения, зачастую искажающие реальную картину поведения систем модуляции в случае деструктивных воздействий нестационарных помех. В данной же работе проведенный качественный анализ практически лишен подобного недостатка, поскольку рассматривает причинно-следственную связь между непосредственно появлением импульсного шума в форме резкого увеличения (изменения) мгновенного уровня сигнала в точке приема и вариантом детектирования символа в виде правильного или ошибочного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудник, Б. Я. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник, В. Ф. Овчаренко; Под ред. Б. Я. Дудника. - М.: Радио и связь, 1984. - 216 с. - ISBN - FB B 84-69/166.
2. Филин, Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи. - Москва : Радио и связь, 1988. - 208 с. - ISBN - 5-256-00032-2.
3. Ушаков, И. А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов / И. А. Ушаков. - Москва : Дрофа, 2008. - 239 с. - ISBN - 978-5-358-01586-9.
4. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. - 704 с. - ISBN - 5-94157-542-4.
5. Обоскало, В. П. Структурная надежность энергетических систем: учеб. пособие // Екатеринбург: УрФУ, 2012. - 194 с. - ISBN - 978-5-321-02195-8.
6. Батенков, К. А. Числовые характеристики структур сетей связи // Труды СПИИРАН. - 2017. - № 4 (53). - С. 5–28. - DOI - [10.15622/sp.53.1](https://doi.org/10.15622/sp.53.1)
7. Батенков, К. А. Общие подходы к анализу и синтезу структур сетей связи // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической кон-

REFERENCES

1. Dudnik, B. Ya. Reliability and Survivability of Communication Systems / B. Ya. Dudnik, V. F. Ovcharenko; Ed. B. Ya. Dudinok. - M.: Radio and Communication, 1984. - 216 p. - ISBN - FB B 84-69 / 166.
2. Filin, B. P. Methods of Analyzing Structural Reliability of Communication Networks. - Moscow: Radio and Communication, 1988. - 208 p. - ISBN - 5-256-00032-2.
3. Ushakov, I. A. Course of System Reliability Theory: Manual for Universities / I. A. Ushakov. - Moscow: Dropha, 2008. - 239 p. - ISBN - 978-5-358-01586-9.
4. Polovko, A. M. Fundamentals of Reliability Theory / A. M. Polovko, S. V. Gurov. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. - 704 p. - ISBN - 5-94157-542-4.
5. Oboskalo, V. P. Structural Reliability of Electric Power Systems: manual // Yekaterinburg: UrFU, 2012. - 194 p. - ISBN - 978-5-321-02195-8.
6. Batenkov, K. A. Numerical Features of Networking // Proceedings of SPIIRAS. - 2017. - no. 4 (53). - pp. 5–28. - DOI - [10.15622 / sp.53.1](https://doi.org/10.15622/sp.53.1)
7. Batenkov, K. A. General Approaches to the Analysis and Synthesis of Structures of Communication Networks // Modern Problems of Telecommunications: Proceedings of the Russian

ференции. - 2017. - С. 19–23. - ISBN – 978-5-91434-028-2.

8. **Nozaki, T.** Analysis of Breakdown Probability of Wireless Sensor Networks with Unreliable Relay Nodes / T. Nozaki, T. Nakano, T. Wadayama; 2017. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Aachen, Germany. - 2017. - pp. 481–485. - DOI – 10.1109/ISIT.2017.8006574.

9. **Takabe, S.** Fault Tolerance of Random Graphs with respect to Connectivity: Phase Transition in Logarithmic Average Degree / S. Takabe, T. Nakano, T. Wadayama. - 2017. - arXiv:1712.07807. - ISBN – 1712.07807v1.

10. **Yagan, O.** Zero-one Laws for Connectivity in Random Key Graphs / O. Yagan, A. M. Makowsk. - IEEE Trans. Inf. Theory, May 2012. – 2012. - Vol. 58. - No. 5 - pp. 2983–2999. - DOI – 10.1109/TIT.2011.2181331.

11. **Батенков, К. А.** Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний //Труды СПИИРАН. - 2019. - Т. 18. - № 5. - С. 1093-1118. - ISSN – 2078-9181.

12. **Huh, J.** H-vectors of matroids and logarithmic concavity // Adv. Math., 2015. – 2015. - No 270. - pp. 49–59. - DOI – 10.1016/J.AIM.2014.11.002.

scientific-technical conference. – 2017. – pp. 19–23. – ISBN – 978-5-91434-028-2.

8. **Nozaki, T.** Analysis of Breakdown Probability of Wireless Sensor Networks with Unreliable Relay Nodes / T. Nozaki, T. Nakano, T. Wadayama; 2017. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Aachen, Germany. - 2017. - pp. 481–485. - DOI – 10.1109/ISIT.2017.8006574.

9. **Takabe, S.** Fault Tolerance of Random Graphs with respect to Connectivity: Phase Transition in Logarithmic Average Degree / S. Takabe, T. Nakano, T. Wadayama. - 2017. - arXiv:1712.07807. - ISBN – 1712.07807v1.

10. **Yagan, O.** Zero-one Laws for Connectivity in Random Key Graphs / O. Yagan, A. M. Makowsk. - IEEE Trans. Inf. Theory, May 2012. – 2012. - Vol. 58. - No. 5 - pp. 2983–2999. - DOI – 10.1109/TIT.2011.2181331.

11. **Batenkov, K. A.** Accurate and Boundary Estimates of the Connectivity Probabilities of Communication Networks based on the Method of Full Iteration of Typical States // Proceedings of SPIIRAS. – 2019. – vol. 18. – no. 5. – pp. 1093-1118. – ISSN – 2078-9181.

12. **Huh, J.** H-vectors of matroids and logarithmic concavity // Adv. Math., 2015. – 2015. - No 270. - pp. 49–59. - DOI – 10.1016/J.AIM.2014.11.002.

Ссылка для цитирования:

Сахаров Д. А. О Влияние нестационарных помех в анализе информационных моделей с модуляцией с одной и несколькими несущими / Д. А. Сахаров, К. А. Батенков, О. Н. Катков, А. А. Афанасьев // Эргодизайн. – 2021 - №2 (12). – С. 133-139. - DOI: 10.30987/2658-4026-2021-2-133-139.

Сведения об авторах:

Сахаров Дмитрий Андреевич
сотрудник Академии ФСО России
тел. 920-266-79-76
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

Батенков Кирилл Александрович
доктор технических наук, доцент,
сотрудник Академии ФСО России,
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

Катков Олег Николаевич
кандидат технических наук,
сотрудник Академии ФСО России,
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

Афанасьев Андрей Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
сотрудник Академии ФСО России,
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

Abstracts:

D.A. Sakharov
employee of Russian Federation Security Guard Service
Federal Academy
тел. 920-266-79-76,
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

K.A. Batenkov
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
employee of Russian Federation Security Guard Service
Federal Academy
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

O.N. Katkov
Candidate of Technical Sciences,
employee of Russian Federation Security Guard Service
Federal Academy
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

A.A. Afanasiev
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
employee of Russian Federation Security Guard Service
Federal Academy
E-mail: dim.saharov@yandex.ru
ORCID

Статья поступила в редколлегию 29.03.2021г.
Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета
член редакционного совета журнала «Эргодизайн» Рытов М.Ю.
Статья принята к публикации 09.04.2021 г.