

УДК 004.4'22

О НЕКОТОРЫХ ТИПАХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ*

И.Л. РЕВА¹, А.А. ВОЕВОДА², Г.В. ТРОШИНА³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, декан факультета автоматики и вычислительной техники. E-mail: reva@corp.nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики. E-mail: ucit@ucit.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

Из самых разных областей науки и техники можно привести много примеров физических процессов, которые по своей природе являются случайными процессами, например: суточные колебания температуры, давления, влажности, осадков, потребления электроэнергии и другие процессы. На режим работы любых технических устройств в той или иной степени всегда оказывают влияние случайные факторы. Рост народонаселения, развитие биологических популяций, хозяйственная деятельность человека также представляют собой случайный процесс. Поэтому существует необходимость формирования математических моделей таких физических процессов и явлений. Отметим, что математическую модель можно представить либо в параметрическом виде, либо в непараметрическом виде. В дальнейшем построенная математическая модель может использоваться при формировании алгоритмов фильтрации физических процессов от случайных помех, для прогнозирования будущих значений и прочее. Присутствие шума в наблюдениях предполагает разработку специальных методов идентификации динамических объектов, поскольку использование традиционных методов идентификации, в котором случайные факторы не учитываются, дает только приближенное описание процесса и может привести к ошибочным результатам. Для определения основных свойств и анализа параметров случайных процессов используют или методы определения статистических характеристик по одной реализации, или методы определения общих характеристик процесса по совокупности реализаций. Имея реализацию случайного процесса на определенном участке времени, нельзя однозначно предсказать ее последующее поведение, так как она зависит от многих случайных параметров, которые оказывают существенное влияние на процесс в будущем.

Ключевые слова: случайный процесс, мартингал, поток событий, интенсивность потока событий, простая цепь Маркова, непрерывная цепь Маркова

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-45-55

* Статья получена 30 января 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Имеется много работ, в которых обсуждаются случайные процессы различных видов [1–27]. Основным требованием при анализе любых процессов является требование максимального объема информации, при этом желательно использовать минимальное количество данных. Используя соответствующую схему выбора данных, можно уменьшить количество измерений, необходимых для того, чтобы определить параметры процесса с подходящей степенью точности. Если известны среднее значение интервала времени между двумя реализациями, функция распределения этих интервалов, длина каждой реализации, то это позволяет прогнозировать вероятности появления событий и определять минимальное число реализаций. Данная статья является логическим продолжением работы [24].

1. МАРТИНГАЛЫ

Мартингалом называют семейство случайных величин $\xi(t)$, где $t \in T$, T – множество действительных чисел, обладающих некоторым «безразличием к прошлому». Это «безразличие» состоит в том, что условные математические ожидания приращений $\xi(t_2) - \xi(t_1)$ ($t_1 < t_2$) при заданных значениях $\xi(s)$, $s \leq t$, независимо от этих значений равны нулю. Если предположить, что эти условные математические ожидания неотрицательны или неположительны, то $\xi(t)$ называют **субмартингалом** или **супермартингалом** соответственно [1, 2, 4, 7]. В качестве примера мартингала можно привести симметричное случайное блуждание по целочисленным точкам прямой. Мартингал можно также интерпретировать как суммарный выигрыш одного из игроков в орлянку, если ставка в каждой партии назначается в зависимости от результатов предыдущих партий, при этом $\xi_0 = \text{const}$ интерпретируется как начальная плата за участие в игре. Термин *мартингал* был введен Ж. Виллем. Французское слово *martingale* означает часть конской упряжи (ремень), не позволяющую лошади вздергивать голову, этот термин также означает удвоение ставки при проигрыше. Если $\xi(t)$ – мартингал, то случайный процесс $\eta(t) = |\xi(t)|$ будет **полумартингалом**.

Мартингалы принято рассматривать как модели тех или иных игр. Например, пусть $x(t)$ описывает состояние капитала игрока в момент времени t , тогда, согласно определению мартингала, средняя величина его капитала в момент времени t_{n+1} равна a_n (при условии, что в момент времени t_n он располагал капиталом a_n) независимо от того, каков был его капитал в пред-

шествующие моменты времени. Процесс $X_n = Z_1 + \dots + Z_n$ при $n=1, 2, \dots$ является **мартингалом с дискретным временем**, если случайные величины Z_i являются независимыми величинами с нулевыми средними значениями. Если процесс $\{X_t, 0 \leq t \leq \infty\}$ имеет независимые приращения, средние значения которых равны нулю, то $\{X_t\}$ является **мартингалом с непрерывным временем**.

2. ЦЕПЬ МАРКОВА

Потоком событий принято называть последовательность однородных событий, появляющихся одно за другим в случайные моменты времени. Поток событий называется **ординарным**, если вероятность попадания на заданный интервал времени двух и более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события. Ординарный поток событий можно интерпретировать как случайный процесс $X(t)$ – число событий, появившихся до момента времени t .

Поток событий называется **потоком без последействия**, если число событий, попадающих на любой интервал времени τ , не зависит от того, сколько событий попало на любой другой не пересекающийся с ним интервал времени [1–11]. Поток событий называется **простейшим потоком**, если он стационарен, ординарен и не имеет последействия. Ординарный поток событий без последействия **называется пуассоновским потоком**. **Интенсивностью потока событий** λ называется среднее число событий, приходящееся на единицу времени. Для стационарного потока $\lambda = \text{const}$, а для нестационарного потока интенсивность в общем случае зависит от времени: $\lambda = \lambda(t)$.

Ординарный поток событий называется **потоком Пальма** (или потоком с ограниченным последействием), если интервалы времени между последовательными состояниями системы представляют собой независимые, одинаково распределенные случайные величины. Поток Пальма всегда является стационарным потоком. Простейший поток является частным случаем потока Пальма. **Потоком Эрланга k -го порядка** называется поток событий, получающийся «прореживанием» простейшего потока, когда сохраняется каждое k -е состояние в потоке, а все промежуточные состояния отбрасываются.

Цепь Маркова представляет собой марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем. Другими словами, марковская цепь представляет собой разновидность марковского процесса, в котором будущее зависит от прошлого только через настоящее. Цепь, в которой условные веро-

ятности состояний в будущем зависят только от состояний на последнем шаге и не зависят от предыдущих состояний, называют также **простой цепью Маркова**. В том случае, если будущее состояние зависит от состояний системы не только в настоящем времени, но и от ее состояний на нескольких предыдущих шагах, то такую цепь называют **сложной цепью Маркова**. Марковский случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем иногда называют **непрерывной цепью Маркова**.

3. СТОХАСТИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для описания случайных процессов в непрерывном времени используются стохастические дифференциальные уравнения, например:

$$dx(t) / dt = F(x, t) + G(x, t) \xi(t), \quad (1)$$

где $\xi(t)$ – нормальный белый шум с автокорреляционной функцией $\delta(\tau)$ [1, 6, 11]. Процесс $x(t)$ в уравнении (1) является марковским процессом.

Если рассмотреть частный случай уравнения (1), когда $F(x, t) = 0$ и $G = \text{const}$, то уравнение (1) преобразуется в следующее уравнение:

$$dx(t) / dt = \xi(t), \quad (2)$$

решение которого можно записать в виде

$$x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t \xi(t') dt'.$$

Процесс, определенный уравнением (2), является винеровским процессом.

Если динамический объект можно описать с помощью уравнения (1), когда $G = \text{const}$, то имеем

$$dx(t) / dt = F(x(t)) + \xi(t).$$

В этом случае при фиксированном начальном условии $x(t)$ стохастическое дифференциальное уравнение определяет ансамбль возможных траекторий системы. Для численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений можно использовать метод Эйлера с малым шагом интегрирования. Стохастические дифференциальные уравнения можно рассматривать как результат предельного перехода в стохастических разностных уравнениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье сделан краткий обзор некоторых типов случайных процессов. Важная роль случайных процессов объясняется тем, что реальные процессы, изучаемые с помощью вероятностных методов, связаны с чередованием тех или иных случайных событий. В рамках математических моделей для типичных случайных явлений можно разрабатывать методы решения самых сложных задач науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А.* Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука, 1967. – 496 с. – (Справочная математическая библиотека).
2. *Розанов Ю.А.* Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: учебник для вузов. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
3. *Пугачев В.С.* Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматлит, 1960. – 884 с.
4. *Гихман И.И., Скороход А.В.* Теория случайных процессов. В 2 т. Т. 2. – М.: Наука, 1973. – 640 с. – (Теория вероятностей и математическая статистика).
5. *Карлин С.* Основы теории случайных процессов: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
6. *Острем К.* Введение в стохастическую теорию управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 320 с.
7. *Вентцель А.Д.* Курс теории случайных процессов. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1996. – 399 с.
8. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.
9. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
10. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1998. – 576 с.
11. *Безручко Б.П., Смирнов Д.А.* Математическое моделирование и хаотические временные ряды. – Саратов: Колледж, 2005. – 320 с.
12. *Трошина Г.В.* Активная идентификация линейных динамических дискретных стационарных объектов во временной области: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2007. – 171 с.

13. Воевода А.А., Трошина Г.В. Оценивание параметров моделей динамики и наблюдения для линейных стационарных дискретных систем с использованием информационной матрицы Фишера // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 3 (24). – С. 199–200.

14. Трошина Г.В. О методах оценивания вектора состояния в задачах идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 69–78.

15. Воевода А.А., Трошина Г.В. О некоторых методах фильтрации в задаче идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 2 (76). – С. 16–25.

16. Трошина Г.В. Об использовании фильтра Калмана при идентификации динамических систем // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 3 (77). – С. 37–52.

17. Трошина Г.В. Об активной идентификации динамических объектов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 41–52.

18. Воевода А.А., Трошина Г.В. Об оценке вектора состояния и вектора параметров в задаче идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 4 (78). – С. 53–68.

19. Воевода А.А., Трошина Г.В. Вычисление информационной матрицы Фишера для линейных стационарных дискретных систем с неизвестными параметрами в моделях динамики и наблюдения. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 2 (44). – С. 29–34.

20. Трошина Г.В. D-оптимальный план эксперимента в задачах активной идентификации по данным установившегося режима для линейных стационарных дискретных систем // Наука. Промышленность. Оборона: труды VII Всероссийской научно-технической конференции, 19–21 апреля 2006 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 445–449.

21. Воевода А.А., Трошина Г.В. Активная идентификация линейных стационарных динамических объектов на основе информационной матрицы Фишера: установившийся режим // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014): материалы XII международной конференции, 2–4 октября 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 13–16.

22. Трошина Г.В., Воевода А.А. Оценка параметров объекта с использованием информационной матрицы Фишера на примере системы управления перевернутым маятником // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON–2015, Омск, Омский государственный технический университет, 21–23 мая 2015 г.: труды. – Омск: IEEE, 2015. – С. 1–4.

23. Трошина Г.В., Воевода А.А. Активная идентификация системы управления перевернутым маятником // XVIII международная конференция по мяг-

ким вычислениям и измерениям (SCM'2015) = 18 International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2015), Санкт-Петербург, 19–21 мая 2015 г.: сборник докладов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – Т. 1. – С. 153–156. – ISBN 978-5-7629-1613-4.

24. *Рева И.Л., Трошина Г.В.* Белый шум в задаче идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 1 (79). – С. 7–22.

25. *Рева И.Л.* Сравнительный анализ объективных методов оценки разборчивости // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 1 (59). – С. 91–102.

26. *Трушин В.А., Рева И.Л., Иванов А.В.* Усовершенствование методики оценки разборчивости речи в задачах защиты информации // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3–2. – С. 238–241.

27. *Рева И.Л., Трушин В.А., Иванов А.В.* Реализация оптимальной помехи при защите речевой информации от утечки по акустическому и виброакустическому каналам // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 4. – С. 140–145.

Рева Иван Леонидович – кандидат технических наук, декан факультета автоматизации и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – защита речевой информации. Имеет более 20 публикаций. E-mail: reva@corp.nstu.ru

Воевода Александр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 200 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Трошина Галина Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – идентификация динамических объектов. Имеет более 50 публикаций. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

About some types of the stochastic processes*

I.L. Reva¹, A.A. Voevoda², G.V. Troshina³

¹Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph. D. (Eng.), dean, faculty of automation and computer engineering. E-mail: re-
va@corp.nstu.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor of the automation department. E-mail: ucit@ucit.ru

³Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph. D. (Eng.), associate professor of the computer engineering department. E-mail: troshina@dean.cs.nstu.ru

It is possible to give many examples of physical processes which are stochastic processes by the nature from the most different areas of science and equipment. For example, the daily fluctuations of the temperature, the pressure, the humidity, the rainfall, the electricity consumption and other processes. The random factors always have impact on an operating mode of any technical devices in a varying degree. The growth of the population, the development of the biological populations, the economic activity of the people also represent the stochastic process. Therefore there is a need of the mathematical models formation such physical processes and the phenomena. We will note that the mathematical model can be presented in the parametrical form or in the nonparametric form. Further the constructed mathematical model can be used for the filtration algorithms formation of the physical processes with the stochastic hindrances, for the future values forecasting and many other purposes. Presence of noise in the observations assumes the special methods development for the dynamic objects identification because the traditional methods use for the identification in which random factors aren't considered, gives the process approximate description only and can lead to wrong results. For the main properties determination and the stochastic processes parameters analysis use the statistical characteristics definition methods on one realization or the process general characteristics definition methods on set of realization. Having the stochastic process realization on the certain time period it is impossible to predict unambiguously her subsequent behavior as it depends on many stochastic parameters which have the essential impact on the process in the future.

Keywords: stochastic process, martingale, events stream, intensity of the events stream, Markov simple chain, Markov continuous chain

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-45-55

REFERENCES

1. Prokhorov Yu.V., Rozanov Yu.A. *Teoriya veroyatnostei. Osnovnye ponyatiya. Predel'nye teoremy. Sluchainye protsessy* [Probability theory. Basic concepts. Limit theorems. Random processes]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 496 p.
2. Rozanov Yu.A. *Teoriya veroyatnostei, sluchainye protsessy i matematicheskaya statistika* [Probability theory, stochastic processes and mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 320 p.

* Received 30 January 2015.

3. Pugachev V.S. *Teoriya sluchainykh funktsii i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory stochastic functions and its application to problems of automatic control]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1960. 884 p.
4. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. *Teoriya sluchainykh protsessov*. V 2 t. T. 2 [Theory stochastic processes. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 640 p.
5. Karlin S. *A first course in stochastic processes*. New York, London, Academic Press, 1968. 502 p. (Russ. ed.: Karlin S. *Osnovy teorii sluchainykh protsessov*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.).
6. Åström K.J. *Introduction to stochastic control theory*. New York, London, Academic Press, 1970. 299 p. (Russ. ed.: Ostrem K.Yu. *Vvedenie v stokhasticheskuyu teoriyu upravleniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1973. 320 p.).
7. Venttsel' A.D. *Kurs teorii sluchainykh protsessov* [Course of the stochastic processes theory]. 2nd ed., enl. Moscow, Nauka Publ., 1996. 399 p.
8. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teorii sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Stochastic processes theory and its engineering applications]. 2nd ed., ster. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 383 p.
9. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Prikladnye zadachi teorii veroyatnostei* [Applied problems of probability theory]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 416 p.
10. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. 5th ed., ster. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1998. 576 p.
11. Bezruchko B.P., Smirnov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie i khaoticheskie vremennye ryady* [Mathematical modeling and chaotic time series]. Saratov, Kolledzh Publ., 2005. 320 p.
12. Troshina G.V. *Aktivnaya identifikatsiya lineinykh dinamicheskikh diskretnykh statsionarnykh ob"ektov vo vremennoi oblasti*. Dis. kand. tekhn. nauk [Active identification of linear dynamic discrete stationary objects in a time domain. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 171 p.
13. Voevoda A.A., Troshina G.V. Otsenivanie parametrov modelei dinamiki i nablyudeniya dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s ispol'zovaniem informatsionnoi matritsy Fishera [Parameters estimation of dynamics and supervision models for linear stationary discrete systems with use of Fischer information matrix]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 3 (24), pp. 199–200.
14. Troshina G.V. O metodakh otsenivaniya vektora sostoyaniya v zadachakh identifikatsii [About state vector estimation methods in identification problems]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 69–78.

15. Voevoda A.A., Troshina G.V. O nekotorykh metodakh fil'tratsii v zadache identifikatsii [About some filtration methods in the identification problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 2 (76), pp. 16–25.
16. Troshina G.V. Ob ispol'zovanii fil'tra Kalmana pri identifikatsii dinamicheskikh sistem [About Kalman filter using for dynamic systems identification]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 3 (77), pp. 37–52.
17. Troshina G.V. Ob aktivnoi identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [About active identification of dynamic objects]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 41–52. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-41-52
18. Voevoda A.A., Troshina G.V. Ob otsenke vektora sostoyaniya i vektora parametrov v zadache identifikatsii [About parameters vector estimation and state vector estimation in identification problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 4 (78), pp. 53–68. doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-53-68
19. Voevoda A.A., Troshina G.V. Vychislenie informatsionnoi matritsy Fishera dlya lineinykh statsionarnykh diskretnykh sistem s neizvestnymi parametrami v modelyakh dinamiki i nablyudeniya [Fischer information matrix calculation for linear stationary discrete systems with unknown parameters in dynamics and supervision models]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 2 (44), pp. 29–34.
20. Troshina G.V. [D-optimum design of experiment in active identification problems on base of steady state for single-line stationary discrete systems]. *Trudy VII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Nauka. Promyshlennost'. Oborona"* [Proceedings of the 7th All-Russian scientific and technical conference "Science. Industry. Defence"], Novosibirsk, Russia, 19–21 April 2006, pp. 445–449. (In Russian)
21. Voevoda A.A., Troshina G.V. [Active identification of liner stationary dynamic objects on base of the Fisher information matrix: the steady state] *Trudy XII mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy elektronnoho priborostroeniya"*, APEP–2014: v 7 t. [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE–2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 1, pp. 745–748. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785

22. Troshina G.V., Voevoda A.A. Parameters estimation with Fischer information matrix on the example of the control system of the inverted pendulum. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015)*: proceedings, Omsk, Russia, 21–23 May, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147243

23. Troshina G.V., Voevoda A.A. [Active identification of the inverted pendulum control system]. *18 mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2015): sbornik докладов: v 2 t.* [18th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM'2015, 19–21 May 2015: Proceedings: in 2 vol.]. Sankt-Petersburg, Russia, 2015, vol. 1, pp. 153–156.

24. Reva I.L., Troshina G.V. Belyi shum v zadache identifikatsii [White noise in the identification problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (79), pp. 7–22.

25. Reva I.L. Sravnitel'nyi analiz ob"ektivnykh metodov otsenki razborchivosti [Comparative analysis of objective methods of speech legibility evaluation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (59), pp. 91–102.

26. Trushin V.A., Reva I.L., Ivanov A.V. Uovershenstvovanie metodiki otsenki razborchivosti rechi v zadachakh zashchity informatsii [Improvement of a method for legibility of speech assessment in the information security objects]. *Polzunovskii vestnik – Polzunov bulletin*, 2012, no. 3–2, pp. 238–241.

27. Reva I.L., Trushin V.A., Ivanov A.V. Realizatsiya optimal'noi pomekhi pri zashchite rechevoi informatsii ot utechki po akusticheskomu i vibroakusticheskomu kanalams [Optimum noise detection for voice data protecting from leaking through acoustic and vibroacoustic channels]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science Bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 4 (45), pp. 140–145.