

РАЗРАБОТКА ОБНАРУЖИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА ХАОСА ДЛЯ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

Т.В. Патрушева, Е.М. Патрушев

В статье рассматривается способ обнаружения периодических сигналов на фоне случайных помех. Предлагается реализация обнаружителя на основе неавтономного генератора детерминированного хаоса. Авторами составлены требования к выбору бифуркации, лежащей в основе механизма обнаружения. Параметры генератора хаоса изначально подбираются таким образом, чтобы обеспечивалась близость к бифуркационной границе. При отсутствии обнаруживаемого сигнала на входе генератора хаоса вид движения в нём будет хаотическим, а при поступлении обнаруживаемого сигнала устанавливается периодический режим. Представлена численная модель обнаружителя в Matlab / Simulink, которая реализует систему дифференциальных уравнений для генератора хаоса Murali – Lakshmanan - Chua. В качестве информативного параметра обнаружителя было выбрано количество хаотических выбросов за время обнаружения. Предложенная модель позволила провести статистические исследования для числа хаотических выбросов за время обнаружения периодических колебаний генератора хаоса под действием случайной узкополосной помехи. На основе полученных зависимостей осуществлён выбор оптимального значения надкритичности системы. Сравнение полученных гистограмм распределения для числа хаотических выбросов позволило установить независимость статистических характеристик сигнала на выходе обнаружителя от мощности помехи на входе. Исследование в целом позволило сделать вывод о возможности использования обнаружителя на основе генератора хаоса для случая нестационарных помех.

Ключевые слова: помехоустойчивость, генератор хаоса, обнаружитель периодических сигналов, нормированные гистограммы, нестационарные помехи

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружитель периодических сигналов является одним из важнейших узлов приборов контроля, в которых полезный сигнал получают на фоне преобладающих помех. Он востребован в ультразвуковых измерителях дальности, в доплеровских измерителях скорости потока, в датчиках контроля уровня, в фотоэлектрических приборах, в датчиках движения систем охранной и тревожной сигнализации и многих других случаях.

Согласно теории потенциальной помехоустойчивости, наилучшим обнаружителем сигналов на фоне помех является корреляционный приёмник или согласованный фильтр. Однако, это справедливо лишь для случая помех в виде стационарных случайных процессов по типу белого шума и при условии неизменного отношения сигнал/шум [1]. Такие условия могут наблюдаться лишь в идеальных случаях. На практике чаще приходится иметь дело со случаем нестационарных помех, и, следовательно, применение простых приёмников может оказаться неэффективным, поскольку применяемая в них

линейная обработка сигналов не различает сигнал и помеху. Решением задачи совершенствования обнаружителя для случая нестационарных помех является применение в нём нелинейного преобразования, в частности неавтономного генератора хаоса. Это становится возможным благодаря слабой чувствительности низкочастотной колебательной системы генератора хаоса к шуму, в результате чего улучшается отношение сигнал/помеха.

Динамические системы, демонстрирующие хаотическое поведение, в настоящее время получили распространение в средствах защищённой связи, а нелинейный характер взаимодействия сигнала и шума в них при использовании стохастического резонанса нашёл применение в средствах обработки сигналов. При этом использование хаотических генераторов в приборах контроля, для получения измерительной информации, ещё никем не осуществлялось.

Принципиально иным подходом к обнаружению сигналов на фоне случайных помех является использование в обнаружителе нелинейной колебательной системы, демонст-

рирующей хаотическое поведение. Хаотический режим становится возможным в результате потери устойчивости периодического движения в низкодобротной колебательной системе. Воздействие случайных помех на такую систему принципиально не изменяет вид движения в ней, который так и остаётся хаотическим. Подача на вход системы периодического сигнала, напротив, изменяет устойчивость движения системы в целом, динамика становится периодической, а чувствительность к помехам уменьшается. Улучшение отношения сигнал/помеха достигается механизмом схожим с явлением стохастического резонанса, но, в то же время, имеющим некоторые отличия. Наблюдая качественную картину движения в системе можно сделать вывод об обнаружении или отсутствии сигнала.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные соображения легли в основу настоящих исследований, задачи которых были сформулированы следующим образом:

1. Получить условия реализации механизма обнаружения периодических сигналов на фоне помех в обнаружителе на основе генератора хаоса;
2. Выявить преимущества использования хаотического обнаружителя для случая нестационарных помех.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Известный способ обнаружения периодических сигналов с помощью бифуркаций в генераторе хаоса (рисунок 1) состоит в следующем: неавтономный генератор хаоса (ГХ) с помощью опорного генератора синусоидальных колебаний $f_0 \sin(\omega t)$ настраивается в состояние близкое к порогу бифуркации и при отсутствии входного сигнала находится в хаотическом режиме. Предполагается, что сигнал, подаваемый на вход генератора хаоса, уже предварительно отфильтрован в узкой полосе, включающей ω , но при этом содержит случайную помеху $\sigma \cdot n(\tau)$ с нулевым средним значением и равномерным спектром в заданной полосе. Если на вход генератора хаоса подаётся сигнал, содержащий только помеху, то вид движения в системе остаётся неизменным, если же во входном сигнале также присутствует и полезный сигнал $d \cdot \sin(\omega t)$ – то, система проходит порог бифуркации и в ней устанавливается периодический режим [2].

Детектор состояния (Д) генератора хаоса

должен осуществить различение типа траекторий в системе. Это достигается путём подсчёта числа хаотических выбросов [3], выходного сигнала генератора хаоса, за время обнаружения $T_{обн}$. Полученный сигнал подаётся на вход решающего устройства (РУ). Решающее устройство выполнено по типу компаратора и осуществляет сравнение с заданным некоторым пороговым уровнем h .

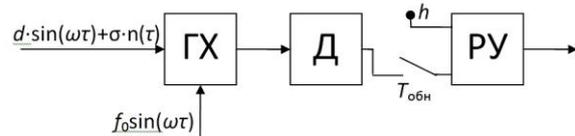


Рисунок 1 - Обнаружитель периодических сигналов на основе генератора хаоса: ГХ – генератора хаоса; Д – детектор состояния; РУ – решающее устройство

Условием реализации механизма обнаружения является выбор типа бифуркации. Всякая нелинейная система, демонстрирующая хаотическое поведение, может находиться в различных динамических состояниях, а переход между этими состояниями сопровождается бифуркациями. Выбор подходящей бифуркации должен учитывать лёгкую практическую реализацию, достаточно развитые области по обе стороны от границы, отсутствие бистабильности, наконец, образование хаоса, должно происходить строго за одну бифуркацию, а не через каскад бифуркаций.

Получение требуемых условий было достигнуто в работах [4-7], что свелось к выбору в качестве обнаружителя неавтономного генератора хаоса MLC-цепи [8], описываемой следующими уравнениями в безразмерных величинах:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = y - m(x) \\ \frac{dy}{d\tau} = -\beta y - \beta x + f_0 \sin \omega \tau + K \cdot (d \sin \omega \tau + \sigma \cdot n(\tau)) \end{cases} \quad (1)$$

где: x, y – динамические переменные системы; $\beta=0,9$ – бифуркационный параметр; $\omega=0,4$ – частота опорного генератора; $m(x)$ – нелинейный элемент, называемый диодом Чуа; τ – безразмерное время; K – масштабный множитель для входных воздействий.

Выбор амплитудного значения f_0 для опорного генератора должен предполагать определённую близость к критическому значению при отсутствии шумовой помехи $f_{кр}=0,08245$ [4], но должен быть обоснован ещё некоторыми критериями. Действительно, если рабочая точка будет предельно близка к $f_{кр}$, то можно считать, что будет достаточно

РАЗРАБОТКА ОБНАРУЖИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА ХАОСА ДЛЯ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

минимального по амплитуде полезного сигнала, чтобы произошла бифуркация и имело бы место обнаружение при очень небольших отношениях сигнал/шум. Однако, в случае, если помеха является нестационарной по мощности, т.е. σ непредсказуемо изменяется, то следует принять во внимание, что бифуркационная граница несколько сдвигается, а хаотические выбросы будут наблюдаться и в той области, где при отсутствии помехи наблюдался бы периодический режим [9].

Для осуществления подбора амплитуды опорного генератора в Matlab/Simulink была составлена модель генератора хаоса по

уравнению (1) (рисунок 2) и детектора состояния, описанного в работе [3]. Расчёт выполнялся методом Рунге-Кутты 4 порядка, шаг вычисления соответствовал $1/1500$ от периода колебаний опорного генератора.

В условиях реального применения обнаружителя частотная полоса помех всегда ограничена естественными причинами, а также предварительной фильтрацией. Для создания узкополосной помехи в модели применён генератор нормально распределённых псевдослучайных чисел и третьоктавный полосовой фильтр со среднегеометрической частотой равной ω .

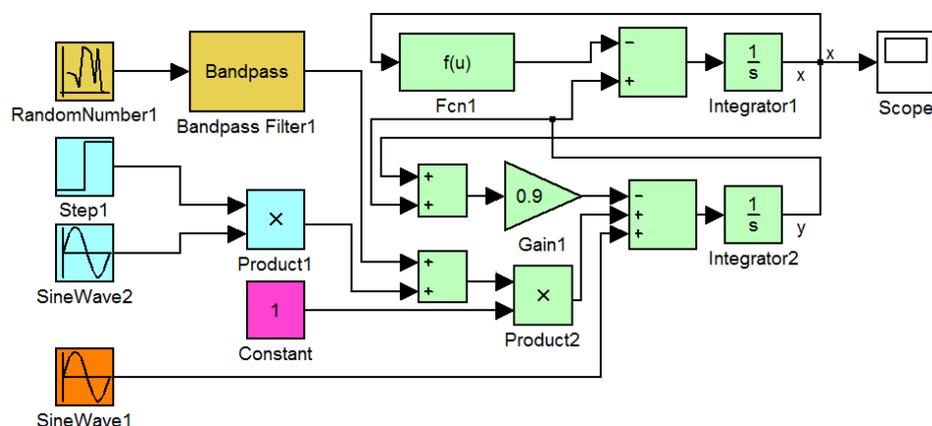


Рисунок 2 - Расчётная модель в Matlab/Simulink генератора хаоса под воздействием смеси сигнала и узкополосной помехи для исследования его работы в качестве обнаружителя



Рисунок 3 - Временная зависимость для входного сигнала (верхний график) и выходного сигнала обнаружителя (нижний график). Показаны интервалы времени при отсутствии полезного сигнала ($T_{обн0}$) и при его наличии ($T_{обн1}$)

Временные диаграммы работы обнаружителя на основе генератора хаоса показаны на рисунке 3. Поскольку входной сигнал предварительно отфильтровывается – его вид при наличии одних только помех носит квазипериодический характер, на графике этот интервал времени обозначен как $T_{\text{ОБН0}}$. Выходной сигнал обнаружителя при этом представляет собой хаотический процесс в виде перемежаемости продолжительных ламинарных фаз и коротких выбросов.

При наличии помехи и полезного сигнала на входе обнаружителя ($T_{\text{ОБН1}}$) происходит переход колебательной системы в периодический режим. Подсчитывая число хаотических выбросов за время обнаружения можно сделать вывод о наличии или отсутствии обнаруживаемого сигнала на входе обнаружителя.

Более детальный анализ возможностей обнаружения с помощью генератора хаоса предполагал исследование данной схемы с использованием теоретических основ оптимально приёма сигналов. Представленная на рисунке 2 схема была доработана с целью автоматизированного расчёта большого числа проходов при разных начальных значениях счётчика генератора псевдослучайных чисел [10]. Исследовались среднее значение числа хаотических выбросов за время обнаружения, стандартное отклонение и строились гистограммы распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Исследование предполагало получение двухпараметрической диаграммы в пространстве параметров $f - \sigma$ для числа хаотических выбросов за время обнаружения в окрестностях $f_{\text{кр}}$, и при разной мощности помехи. На рисунке 4 оси представлены в относительных величинах:

$$\tilde{f} = \frac{f}{f_{\text{кр}}} \quad \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{f_{\text{кр}}} \quad (2)$$

Изображённые на рисунке 4 изолинии расходятся веерообразно, и, следовательно, это может способствовать выбору оптимального значения амплитуды опорного генератора. Эта амплитуда должна быть выбрана такой, чтобы при разной мощности помехи оставался бы неизменный характер перемежаемости. Был проведён подбор подходящего значения для амплитуды опорного генератора путём исследования гистограмм распределения для числа хаотических выбросов

при разной мощности помех на входе обнаружителя.

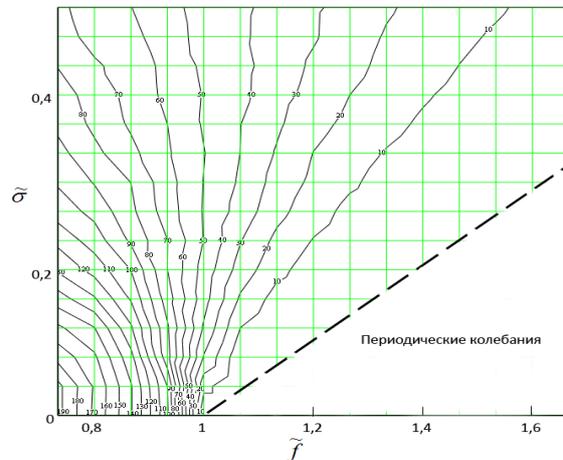


Рисунок 4 - Среднее число хаотических выбросов за 500 периодов колебаний опорного генератора в зависимости от амплитуды опорного генератора и действующего значения случайной помехи

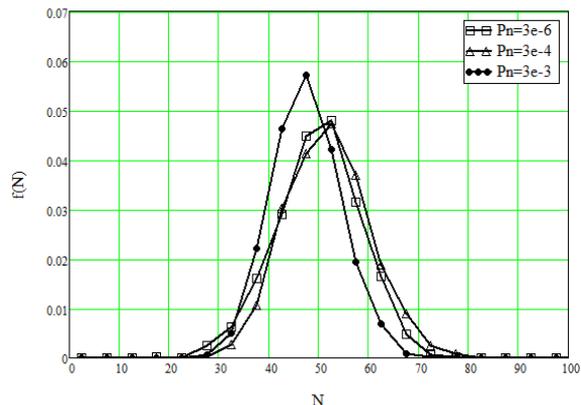


Рисунок 5 - Нормированные гистограммы распределения числа N хаотических выбросов при разной мощности помехи

Представленные на рисунке 5 нормированные гистограммы для числа хаотических выбросов N за $Z=500$ колебаний опорного генератора были получены при амплитуде опорного генератора $f_0=0,0821$. Прежде всего, следует отметить, что при разной мощности помех, в пределах трёх порядков, наблюдается статистическое сходство случайных процессов на выходе обнаружителя. Прежде всего, среднее значение составляет 47-51, и стандартное отклонение 6,7-8,3. Кроме того, нижняя граница для правила «трёх сигм», во всех случаях составляет около 25.

Таким образом, подтверждается гипотеза, о неизменности статистических характеристик выходного сигнала хаотического об-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2017

РАЗРАБОТКА ОБНАРУЖИТЕЛЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРА ХАОСА ДЛЯ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

наружителя при изменяющемся входном сигнале.

ОБСУЖДЕНИЕ

Установленный факт слабой зависимости флуктуаций выходного параметра генератора хаоса от мощности помех на входе даёт возможность построения обнаружителя, работающего в широком динамическом диапазоне входных параметров.

Для проверки работы обнаружителя были построены совмещённые гистограммы для числа хаотических выбросов на выходе обнаружителя при следующих параметрах: мощность помехи в третьоктавной полосе $P_n=3.5 \cdot 10^{-6}$; амплитуда обнаруживаемого сигнала $d=0.003$; число периодов колебаний опорного генератора за время обнаружения $Z=500$. Отношение сигнал/шум по мощности при этих параметрах составило $SNR=1$ дБ. Динамический диапазон управлялся масштабным множителем $K=1$ (рисунок 6, а), для всех остальных рисунков сигнал и помеха

увеличивались одинаково в K раз, например, $K=2$ (рисунок 6, б), $K=20$ (рисунок 6, в) и $K=32$ (рисунок 6, г). Поскольку, при построении нормированных гистограмм, масштаб для случаев наличия сигнала (периодический режим) и отсутствия сигнала (хаотический режим) оказался различным, была введена дополнительная вертикальная ось.

Для хаотического обнаружителя, вид гистограмм принципиально не менялся при увеличении мощности входных сигналов в 1000 раз. Заметно некоторое расширение области, соответствующей случаю действия на входе сигнала и помехи. Это объясняется тем, что мощность помехи при таких условиях становится соизмеримой с мощностью опорного генератора, что, делает невозможным существование устойчивого периодического режима. Тем не менее, между гистограммами сохраняется достаточный запас для того, чтобы решающее устройство могло надёжно принять решение об обнаружении или отсутствии сигнала.

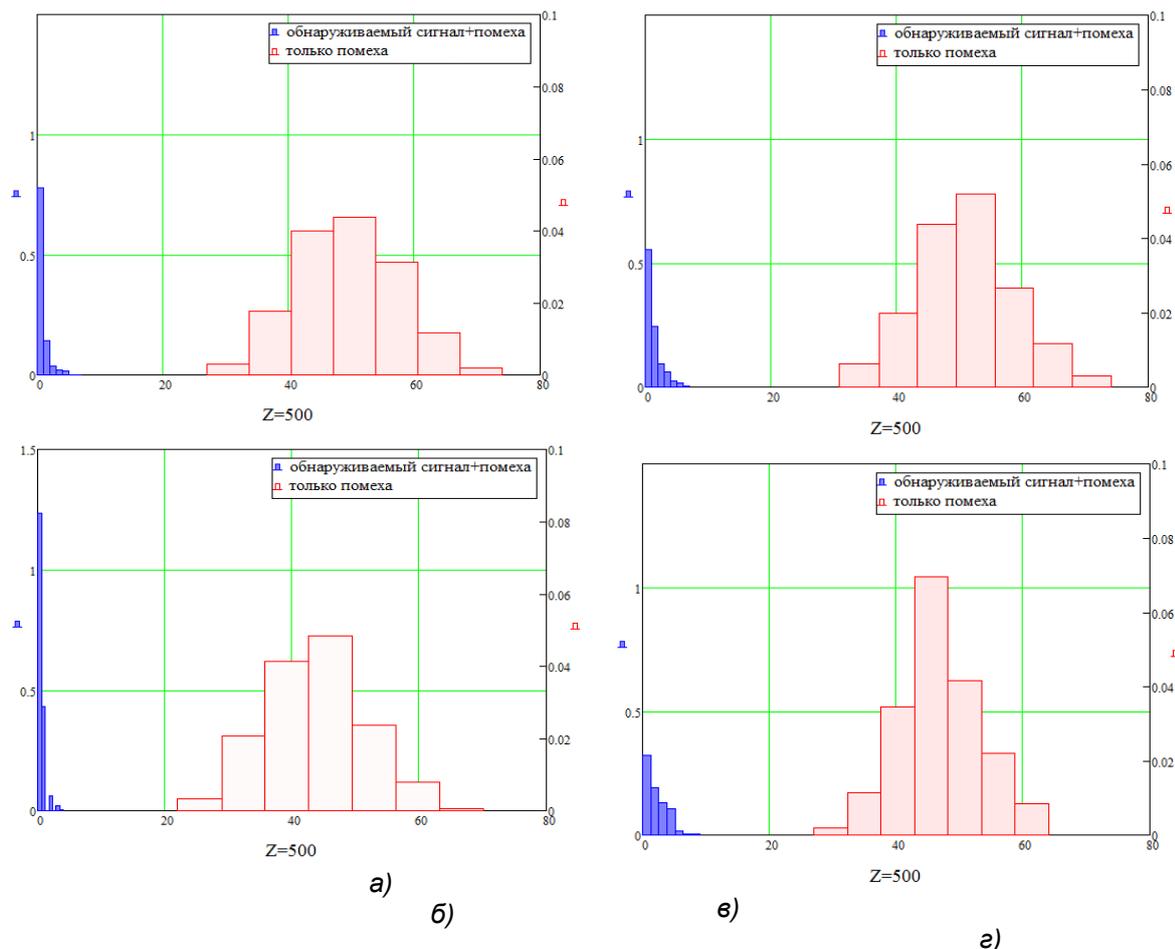


Рисунок 6 - Нормированные гистограммы распределения для числа хаотических выбросов при подаче на вход только помехи и смеси помехи и сигнала. Буквами на рисунке обозначены случаи с разным масштабным множителем а) $K=1$; б) $K=2$; в) $K=20$; г) $K=32$

Если время обнаружения уменьшить, гистограмма для случая действия только помех будет перемещаться влево. Установлено, что при времени обнаружения, соответствующем $Z=250$ сохраняется минимальный запас, обеспечивающий достоверное принятие решения с $P_f=0,001$ $P_D=0,999$.

При испытании корреляционного обнаружителя в аналогичных исходных условиях, качественно картина также не изменится при одинаковом изменении сигнала и помехи, однако, на горизонтальных осях гистограмм поменяется масштаб. Поскольку порог срабатывания решающего устройства остаётся неизменным, то вероятность ложного срабатывания может многократно возрасти, вплоть до 0,5. Решением проблемы может быть корректировка величины порогового уровня для условий нестационарных помех, однако простой технической реализации для этого нет. Таким образом, основным преимуществом хаотического обнаружителя является его низкая чувствительность к изменяющимся по мощности помехам.

ВЫВОДЫ

Для численной модели обнаружителя были проведены исследования способности обнаружения с помощью статистических методов. Путём подбора было установлено оптимальное значение амплитуды опорного генератора.

Полученные сравнительные оценки позволили установить, что преимущества хаотического обнаружителя проявляются в условиях нестационарных помех.

Реализация обнаружителей на основе генераторов хаоса позволяет создавать технически простые датчики контроля, предназначенные для тяжёлых условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов, В.И. Оптимальный приём сигналов [Текст] / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
2. Wang F. Study on Chaos-Based Weak Signal Detection Method with Duffing Oscillator [Text] / F. Wang, H. Xing, S. Duan S., H. Yu // Advances in Computer Science and Information Engineering, - Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012. v2 (169). pp21-26.
3. Патрушева, Т. В. Детектор состояния в

обнаружителе слабых периодических сигналов на основе генератора хаоса [Текст] / Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев, И. С. Наздрюхин // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2016. – № 2. – С. 11-13.

4. Патрушева, Т. В. Численное моделирование процесса обнаружения периодических сигналов на фоне преобладающих шумов в приборах контроля, основанных на использовании генераторов хаоса [Текст] / Т. В. Патрушева, Е.М. Патрушев // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2013. – № 1. – С. 59-64.

5. Патрушева, Т.В. Обнаружение слабых периодических сигналов на фоне шумов в приборах контроля, основанных на использовании генераторов хаоса [Текст] / Т. В. Патрушева, Е.М.Патрушев // Измерение, контроль, информатизация: Материалы четырнадцатой международной конференции, – Барнаул: АлтГТУ, 2013. - С. 46-51

6. Патрушева, Т.В. Численный анализ помехоустойчивости измерительного преобразователя на основе генератора хаоса [Текст] / Т. В. Патрушева, Е.М. Патрушев// Вестник Югорского государственного университета. Выпуск 2 (29). - Ханты–Мансийск, 2013. - с.90-95.

7. Патрушева Т.В. Способ контроля уровня жидкости на основе генератора хаотических колебаний [Текст] / Т.В. Патрушева, Е.М.Патрушев// Ползуновский вестник. – Барнаул, 2012. – № 3/2. – С. 149-152.

8. Murali, K. The simplest dissipative nonautonomous chaotic circuit [Text] / K. Murali, M. Lakshmanan, L.O. Chua. // Trans. Circuits Syst. – New York: Circuits and Systems Society, 1994. – Vol. 41. – P. 462-463.

9. Hramov A.E. Length distribution of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise [Text] / Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaja M.K., Ovchinnikov A.A., Boccaletti S.// Phys. Rev. E. 76, 026206

10. Патрушев, Е. М. Автоматическая симуляция в среде Matlab/Simulink на примере модели генератора Дуффинга-Холмса [Текст] / Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев, И. С. Наздрюхин // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2016. – № 2. – С. 181-183.

Патрушева Т.В. - ст. преп. каф. «Информационные технологии» Алтайского государственного технического университета, тел. 8(3852)290913, e-mail: attractor@list.ru.

Патрушев Е.М. - к.т.н., доц. каф. «Информационные технологии» Алтайского государственного технического университета, тел. (3852) – 290913, e-mail: attractor@list.ru.