

Фильтрация гармонического и хаотического сигналов в нелинейных радиоэлектронных системах

А.Н. Казимиров

Южно-Уральский государственный университет
454080, Российская Федерация, г. Челябинск
пр. им. В.И. Ленина, 76

Создание нелинейных радиотехнических систем является перспективным направлением. В радиотехнической системе в качестве информационного используется хаотическое колебание. Применяется нелинейная фильтрация смеси хаотического колебаний и шума. Нелинейный фильтр содержит бистабильную систему – триггер Шмитта и линейный фильтр. Фильтрация происходит за счет эффекта стохастического резонанса. Сигнал на выходе нелинейной системы усиливается при некоторой оптимальной интенсивности шума. Исследован эффект стохастического резонанса для узкополосных сигналов. Приведены результаты экспериментального исследования в программе Multisim.

Ключевые слова: хаотическая динамика, стохастический резонанс, бистабильная система – триггер Шмитта, оптимальный уровень шума, нелинейная фильтрация, спектральный анализ колебаний.

Введение

Реальные информационные сигналы имеют определенную полосу частот. В настоящее время существует тенденция использования сложных широкополосных сигналов для передачи информации и снижения отношения мощности сигнала к мощности шума. Поэтому, необходимо рассматривать явление стохастического резонанса в приложении к таким сигналам [1]. При использовании явления стохастического резонанса в бистабильной нелинейной динамической системе создаются условия для усиления слабого информационного сигнала в результате его взаимодействия с шумом. Модель реального информационного сигнала – это хаотическое колебание. Такой процесс может генерироваться нелинейной системой. Сигнал является детерминированным, но сложным. С современной точки зрения хаотические и стохастические колебания идентифицируются различными методами нелинейной динамики. Например, по величине фрактальной размерности. Имеются теоретические исследования нелинейных динамических систем с добавлением шума. Прикладные исследования по нелинейной фильтрации посвящены сигналам с классическими видами модуляции.

Недостаточно исследованы вопросы обработки хаотических сигналов в приемных устройствах. При этом сигнал передатчика претерпевает изменения в канале связи из-за фильтрующих

свойств канала и добавления к сигналу шума. Ряд авторов рассматривают явления стохастического резонанса и стохастической фильтрации в приложении к обработке аддитивной смеси сигнала и шума [2]. Также рассматривают наложение белого шума на гармонический сигнал. Реальные первичные информационные сигналы имеют определенную полосу частот, учитывая современные тенденции по использованию широкополосных сигналов для передачи информации, необходимо рассматривать явление стохастического резонанса в приложении к таким сигналам. В последние годы явления в нелинейных системах исследуются теоретически, моделируются в вычислительных экспериментах и исследуются в физических устройствах. Наибольшие достижения имеются в вопросах генерации хаотических колебаний. Наименее всего представлены работы по схемотехническому моделированию явлений в нелинейных системах. Для обработки сигналов может быть использовано явление стохастического резонанса, когда в бистабильной нелинейной динамической системе создаются условия для усиления слабого периодического сигнала в результате его взаимодействия с шумом.

Переход от теоретического исследования (математической модели) к радиотехнической системе – проблема настоящего исследования. Имеется потенциальная возможность исполь-

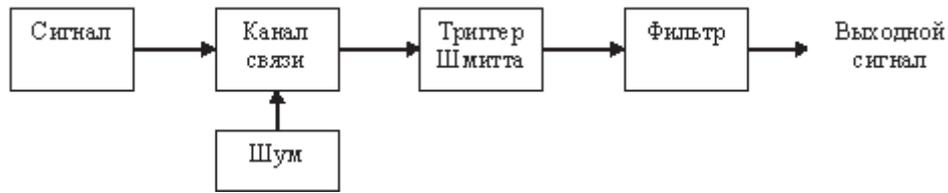


Рис. 1

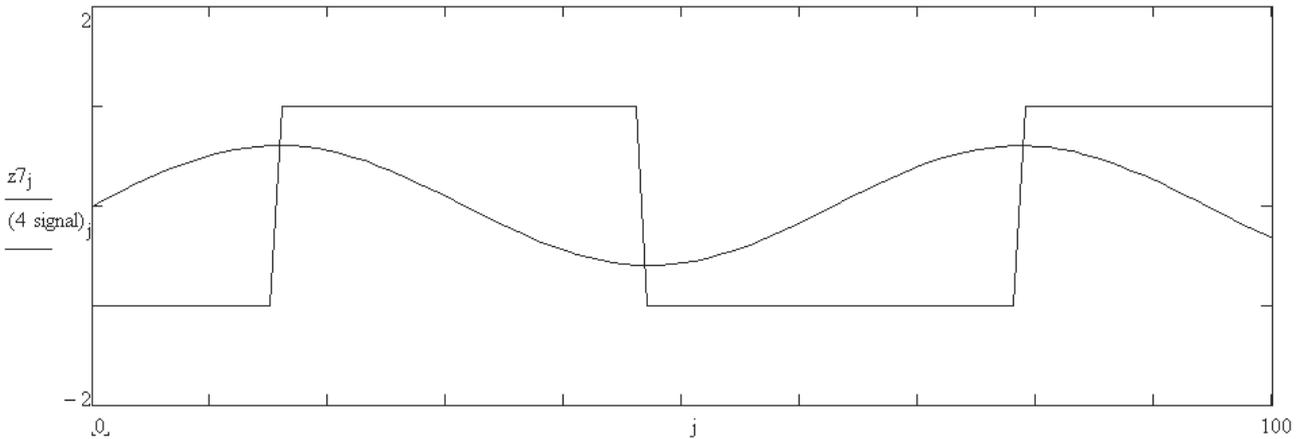
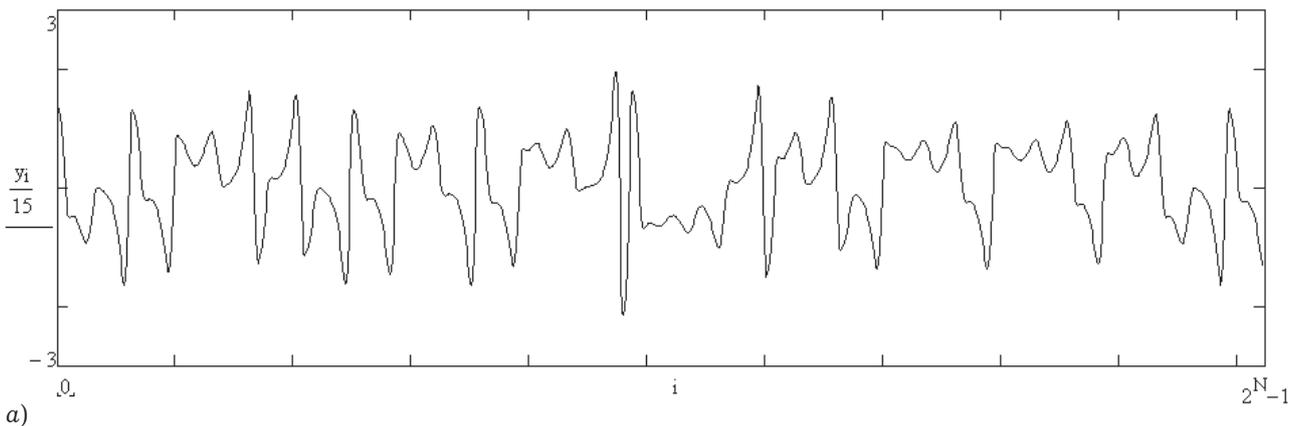
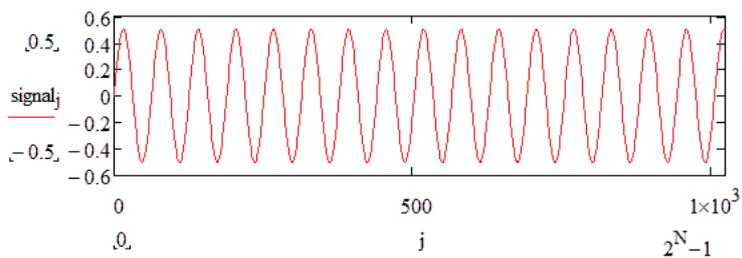


Рис. 2



а)



б)

Рис. 3

зования эффекта стохастического резонанса для повышения отношения мощности сигнала к мощности шума. Также предлагается исследование этой проблемы в программе схемотехнического моделирования Multisim.

1. Моделирование стохастического резонанса

Рассмотрим преобразование сигнала в следующей нелинейной системе (рис. 1). Эксперимен-

тальное колебание поступает в канал связи, где на него накладывается шум. Далее сигнал с шумом поступает на вход бистабильной системы – триггер Шмитта. Полученное дискретное колебание на выходе триггера Шмитта поступает на вход линейного фильтра, на выходе фильтра наблюдаем обработанный сигнал.

Каноническая модель для теоретического исследования стохастического резонанса имеет вид:

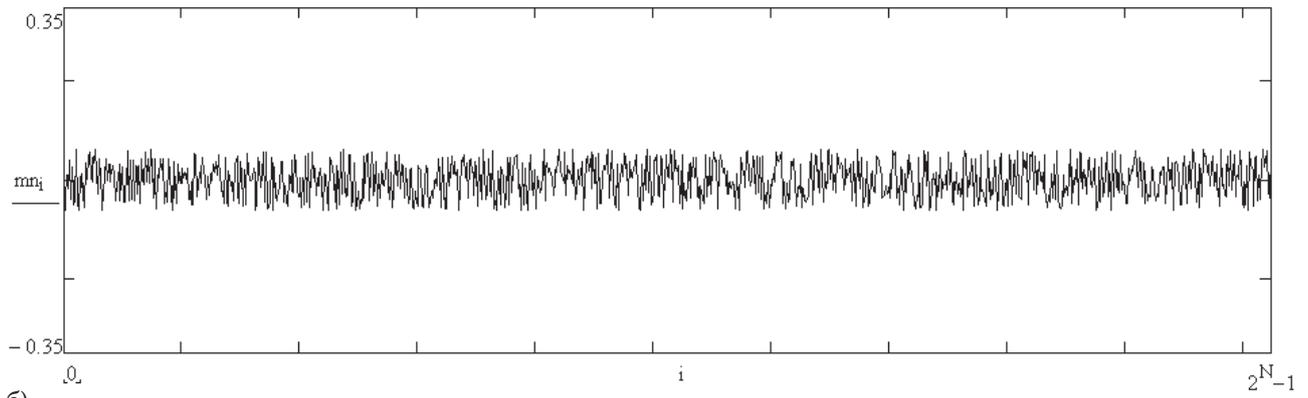
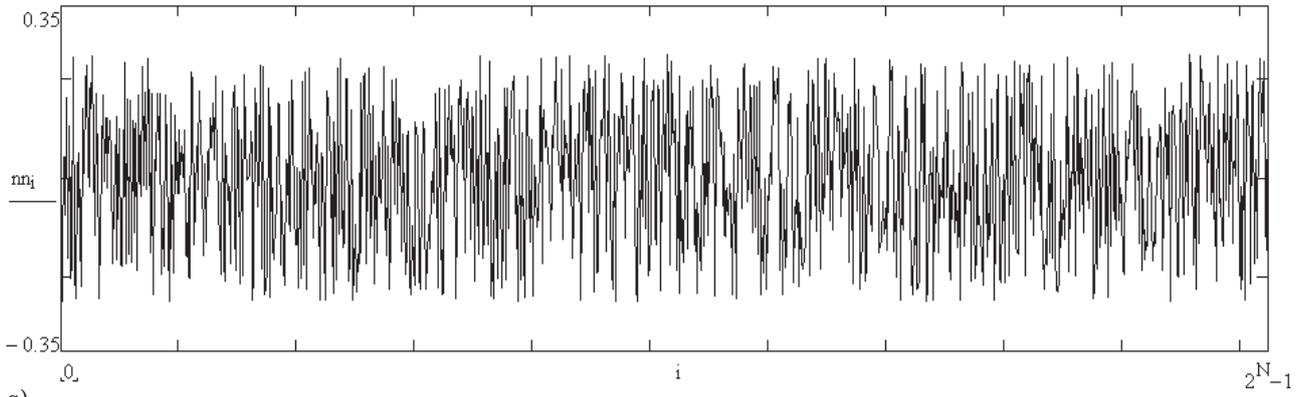


Рис. 4

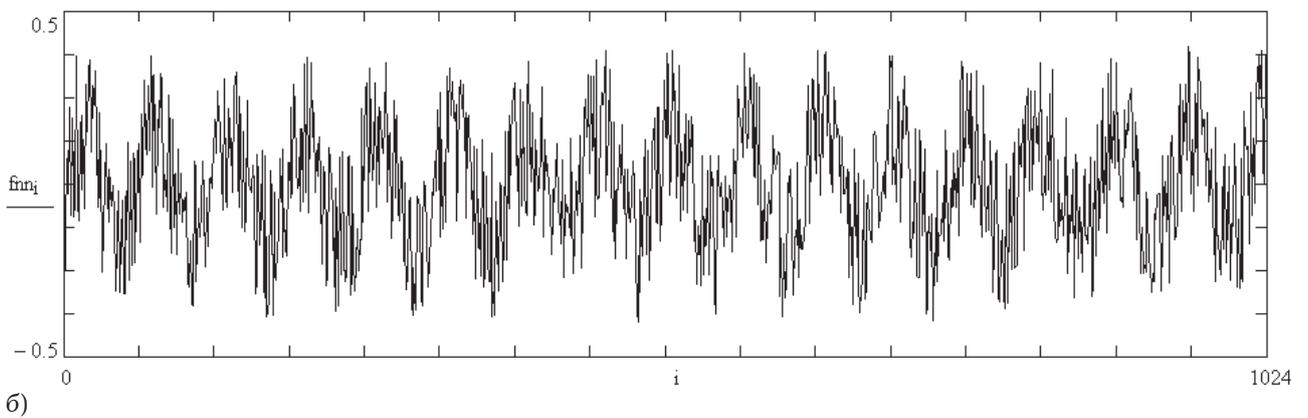
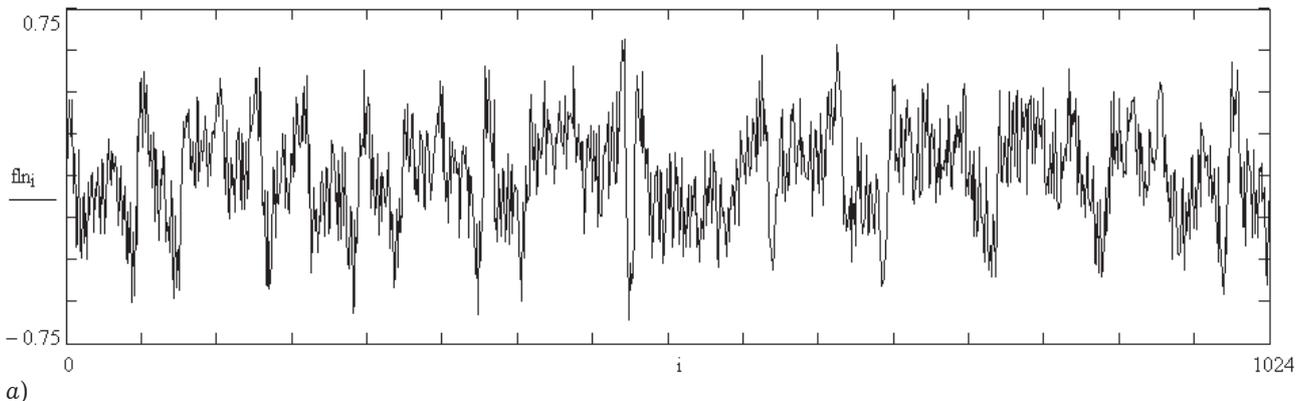
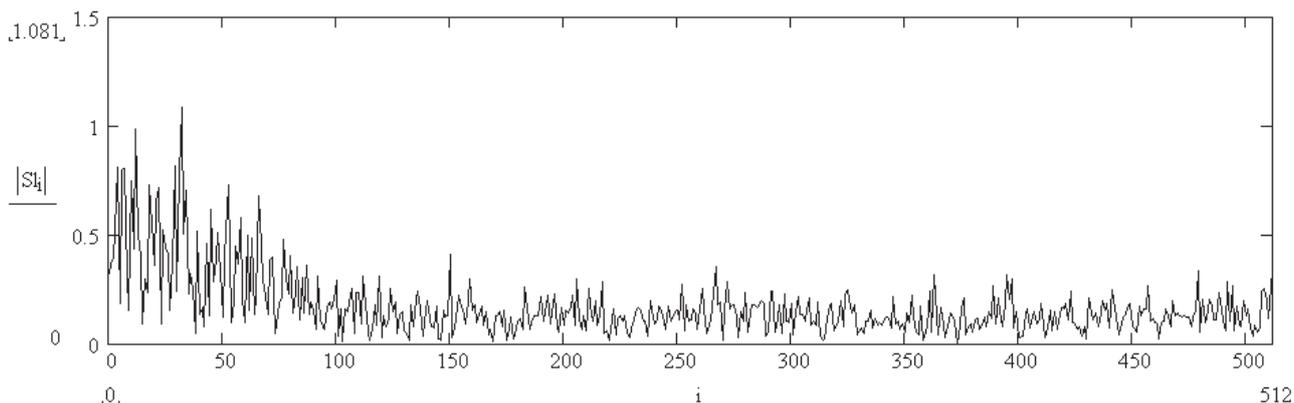
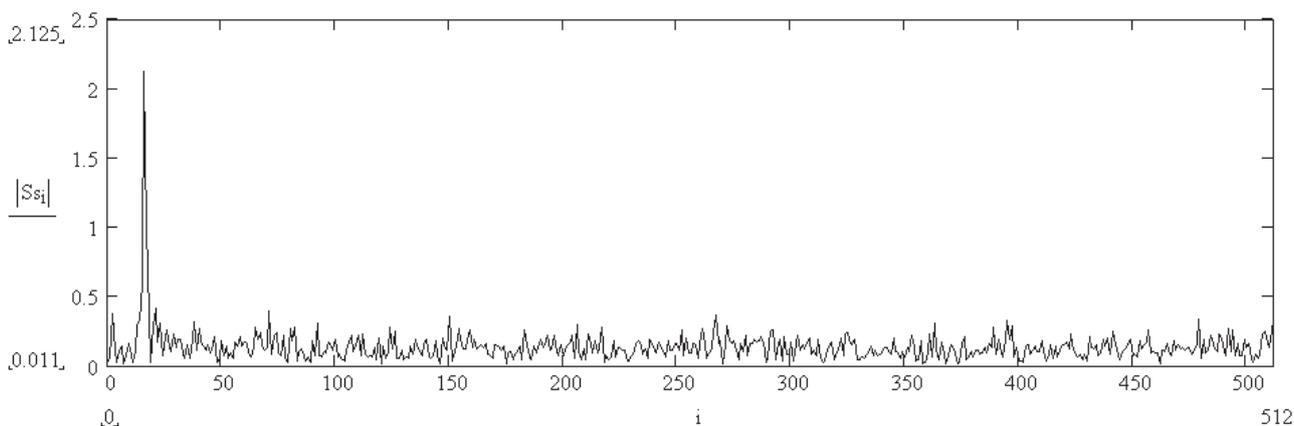


Рис. 5



а)



б)

Рис. 6

$$\dot{x} = x - x^3 + A \cos(\Omega t + \varphi) + \sqrt{2D}\xi(t), \quad (1)$$

где $A \cos(\Omega t + \varphi)$ – гармоническое колебание; $\xi(t)$ – белый шум интенсивности D .

Далее рассмотрим моделирование процесса преобразования сигнала в математическом пакете MATHCAD.

Временная диаграмма работы триггера Шмитта показана рис. 2.

В качестве входных сигналов используются гармоническое колебание или хаотическое колебание, полученное в результате численного решения системы уравнений Лоренца

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -cx + cy, \\ \frac{dy}{dt} &= rx - y - xz, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz. \end{aligned} \quad (2)$$

В качестве сигнала будем использовать колебания переменной $y(t)$. На рис. 3, а показана переменная $y(t)$, на рис. 3, б представлен тестовый сигнал – гармоническое колебание.

На рис. 4 представлены изображения шума как реализации случайного процесса с нулевым

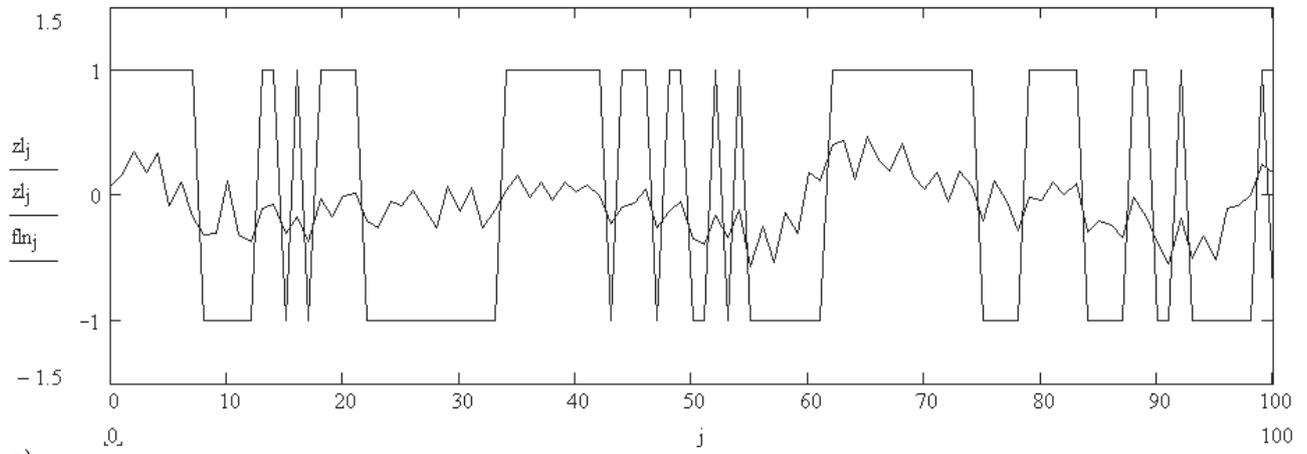
средним и нормальным распределением с различной интенсивностью.

Соответственно сигналы с добавлением шума показаны на рис. 5. Слева колебание модели Лоренца, справа гармонический сигнал. Интенсивность шума в обоих случаях одинакова. Исследования были проведены при различной интенсивности шума, добавляемого к хаотическому и гармоническому сигналам. На графиках достаточно ясно просматривается характер динамики колебаний. Соответственно спектры этих колебаний показаны на рис. 6.

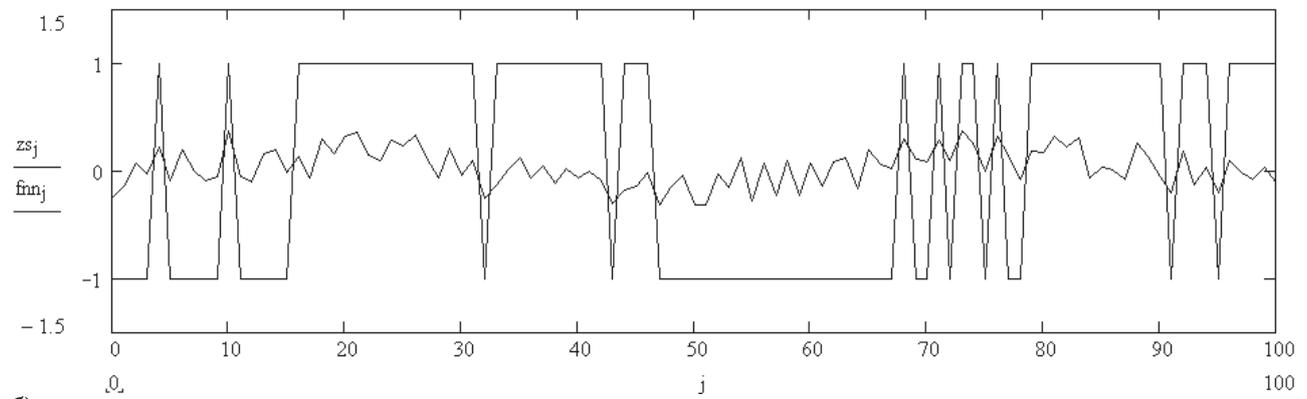
Видно, что спектр гармонического колебания является узкополосным, а спектр модели Лоренца достаточно широкополосным (выше спектральных составляющих шума).

На рис. 7 показаны фрагменты сигналов (для различения динамики работы триггера Шмитта), совмещенные с выходным сигналом триггера Шмитта. Соответственно на рис. 7, а – $y(t)$ колебание модели Лоренца, на рис. 7, б исходное гармоническое колебание.

Колебание на выходе триггера Шмитта можно рассматривать как дискретный сигнал с широко-импульсной модуляцией, отражающей

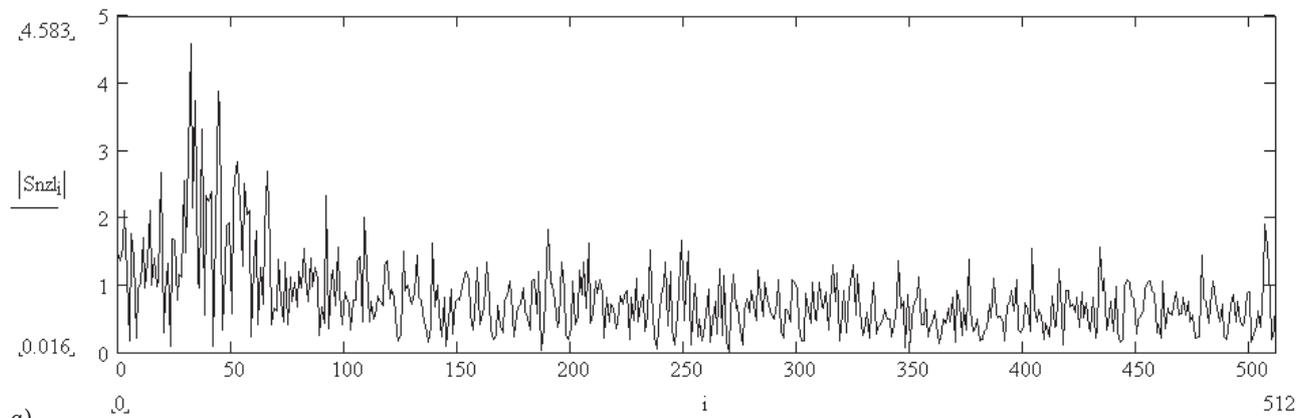


а)

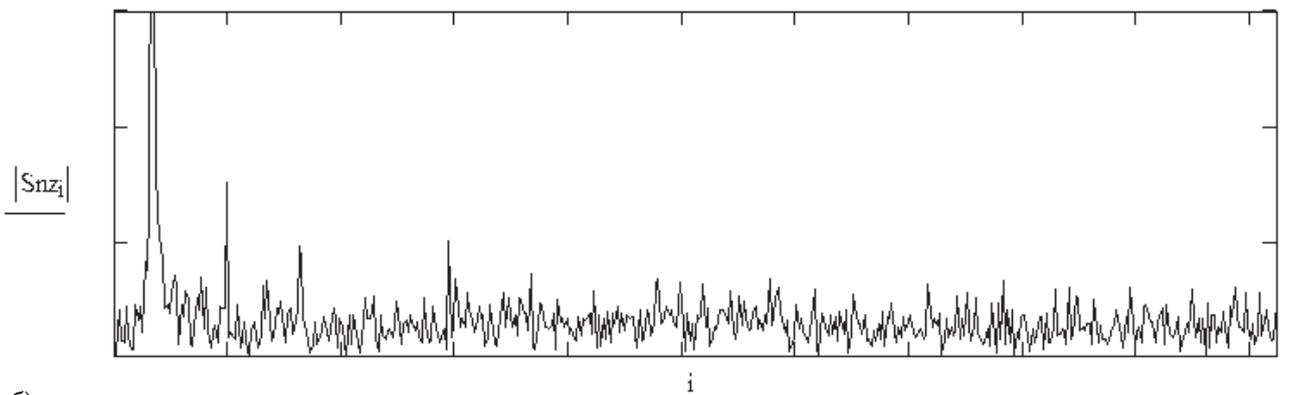


б)

Рис. 7



а)



б)

Рис. 8

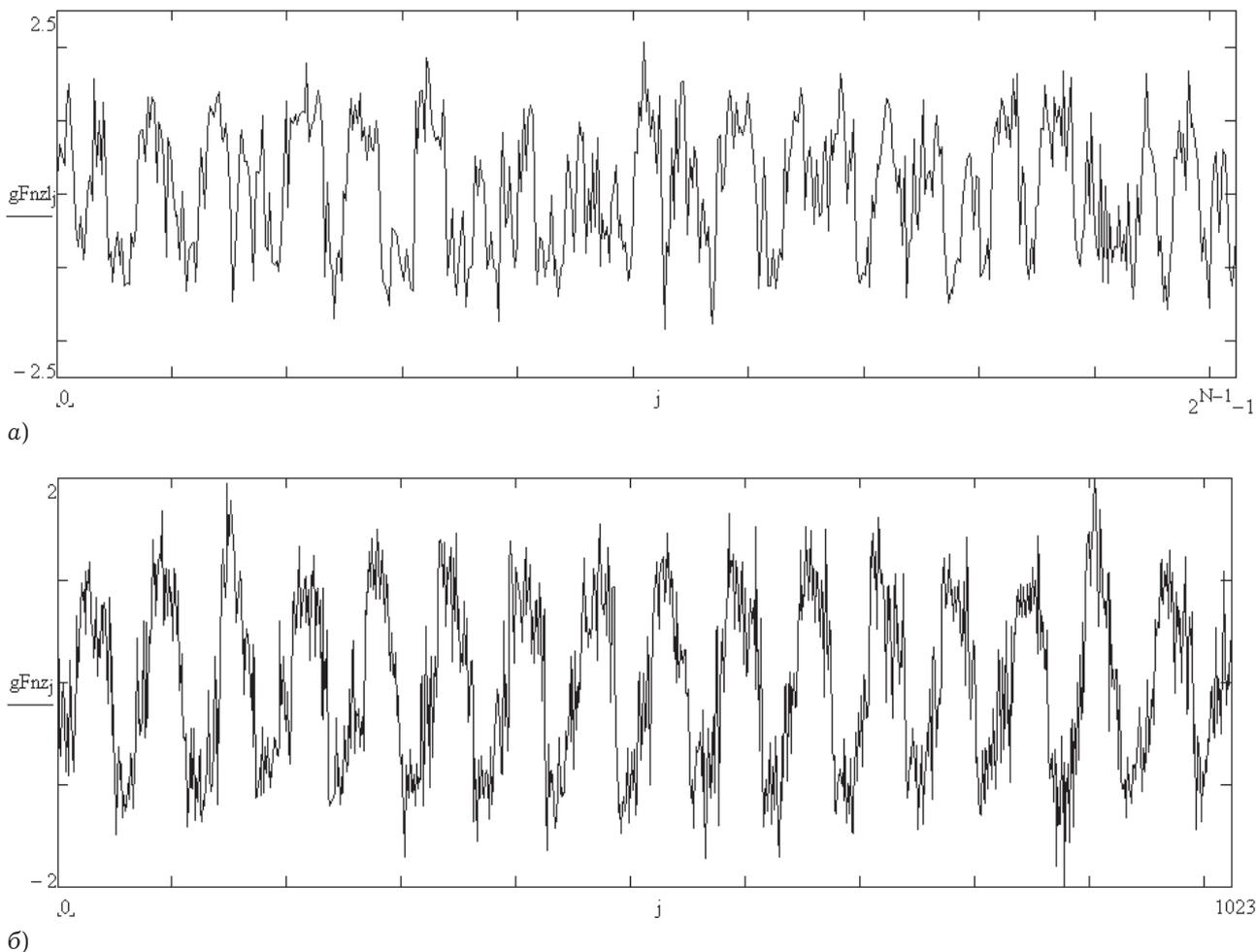


Рис. 9

динамику колебания. Спектры этих дискретных сигналов представлены на рис. 8. В спектрах дополнительно появляются кратные гармонические составляющие.

В соответствии с явлением стохастического резонанса было отмечено для гармонического колебания изменение амплитуды основной гармоники в зависимости от интенсивности шума. На рис. 8 представлены результаты при одной интенсивности шума для гармонического колебания и колебания модели Лоренца. Интенсивность шума выбрана исходя из наглядности эксперимента для обоих колебаний. На рис. 9 показаны сигналы после обработки на выходе фильтров. Параметры фильтра таковы, что его влияние на выходной сигнал минимально. В результате дискретные сигнала преобразованы в исходные искаженные. Из графиков видно, что динамика исходных колебаний сохраняется. Представляет интерес для дальнейших исследований вычисление фрактальной размерности для всех пар сигналов [3].

2. Схемотехническое моделирование нелинейного преобразования сигналов

Выше показано, что явление стохастического резонанса может быть использовано для построения нелинейных приемных устройств сигналов различных типов. Рассмотрим схемотехническое моделирование нелинейных устройств и физические эксперименты. Кроме этого необходима теоретическая база для экспериментов, которая может строиться на основе общей принятой теории стохастического резонанса [1].

Создание радиотехнических систем на основе эффектов стохастической и хаотической динамик является перспективным направлением. Задачу разработки таких систем необходимо ориентировать на использование результатов теоретических исследований процессов в нелинейных радиофизических системах. Представим результаты исследования нелинейной фильтрации смеси хаотического колебания и шума на основе эффекта стохастического резонанса, происходящего в бистабильной системе, с целью

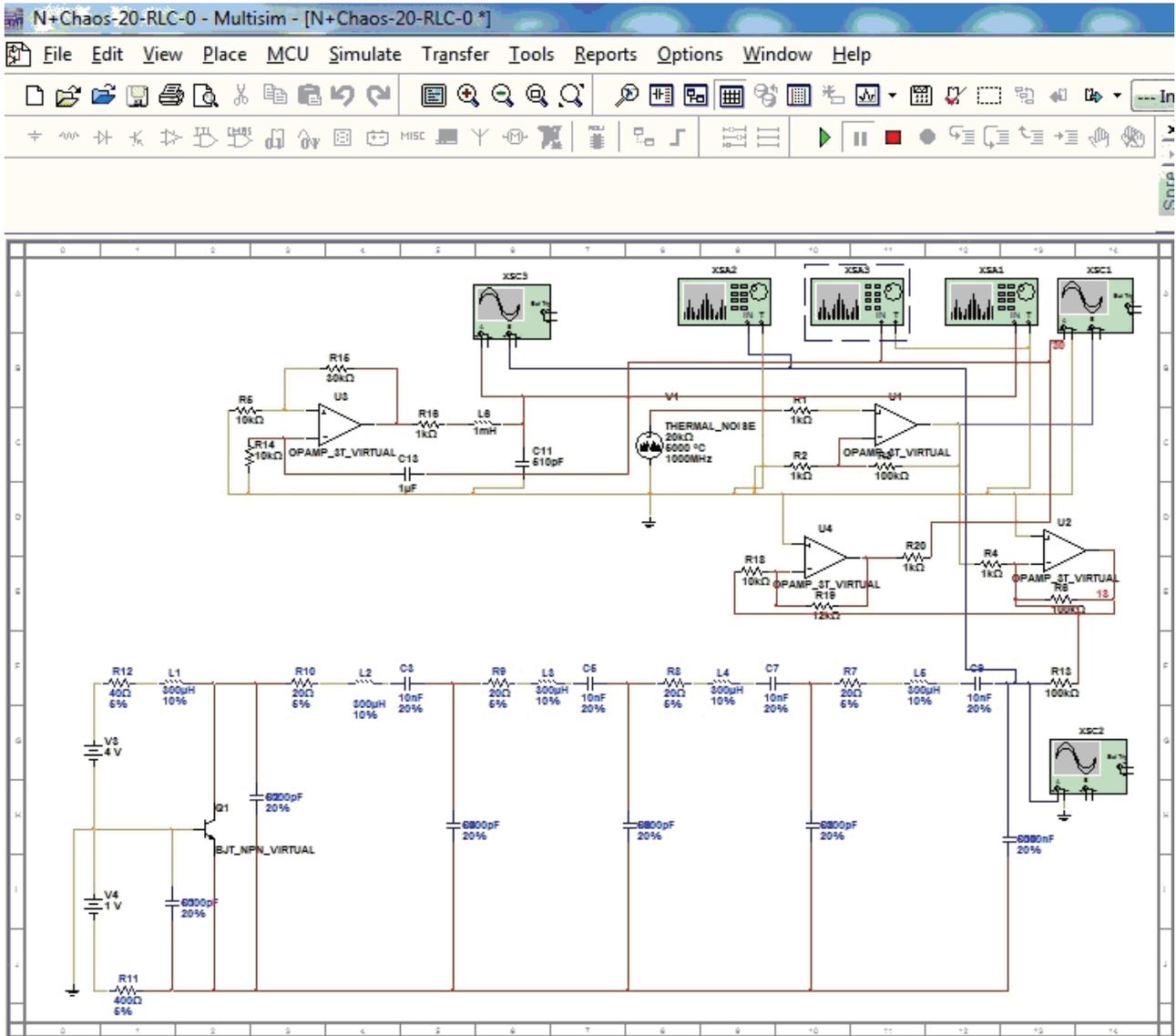


Рис. 10

выделения информационного хаотического сигнала. Обычно полагают шум «белым», а сигнал узкополосным. В качестве бистабильной системы может быть применен триггер Шмитта. Эффект стохастического резонанса – это явление при котором отклик нелинейной системы на слабый внешний сигнал усиливается с ростом интенсивности шума до некоторого его оптимального значения. Реальные информационные сигналы имеют определенную полосу частот, учитывая современные тенденции по использованию сложных видов модуляции и расширения полосы сигналов для передачи информации, необходимо рассматривать явление стохастического резонанса в приложении к таким сигналам. При использовании явления стохастического резонанса в бистабильной нелинейной динамической системе создаются условия для усиления слабо-

го информационного сигнала в результате его взаимодействия с шумом. Для моделирования реального информационного сигнала используется хаотическое колебание.

В большинстве исследований отмечается потенциальная возможность использования эффекта стохастического резонанса для повышения отношения мощности сигнала к мощности шума. Предлагается исследовать эти процессы в прикладном аспекте в программе схемотехнического моделирования Multisim. В Multisim собраны генератор хаотического колебания, нелинейный фильтр на основе бистабильной системы – триггере Шмитта, источником шума является встроенный генератор «thermal_noise». Происходящие, в такой системе, процессы наблюдаются и анализируются с помощью виртуальных приборов: осциллографов и анализаторов.

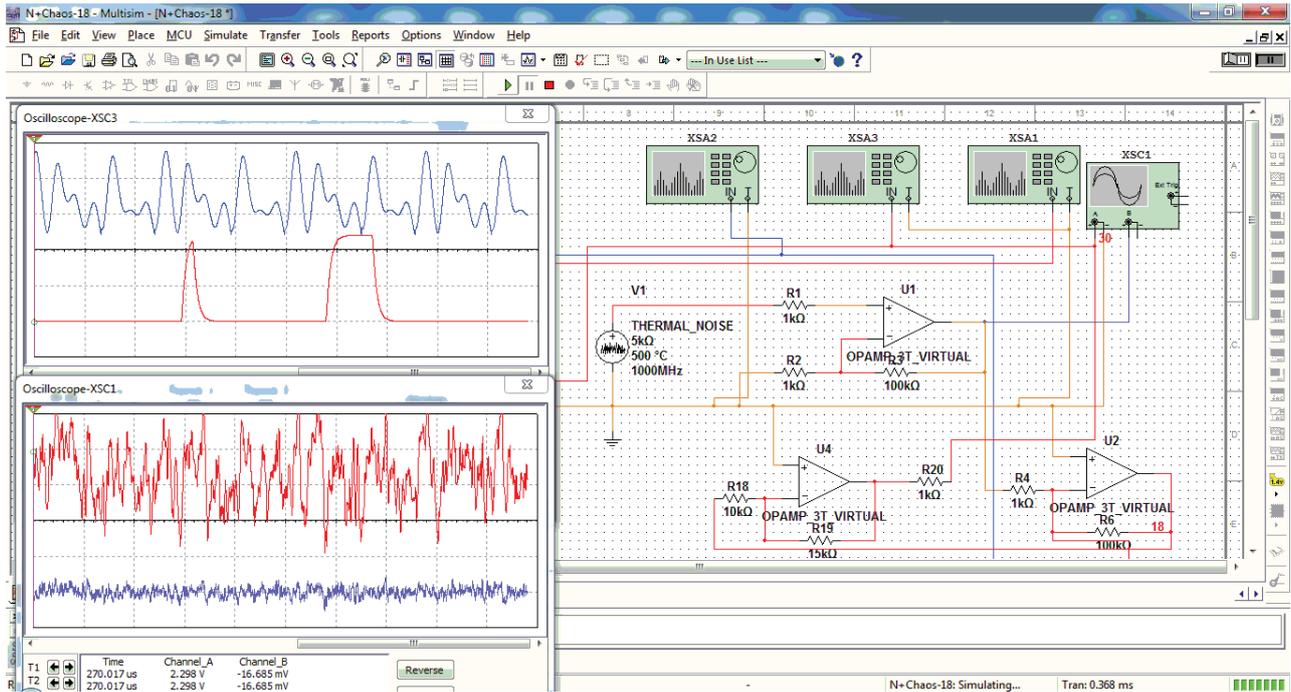


Рис. 11

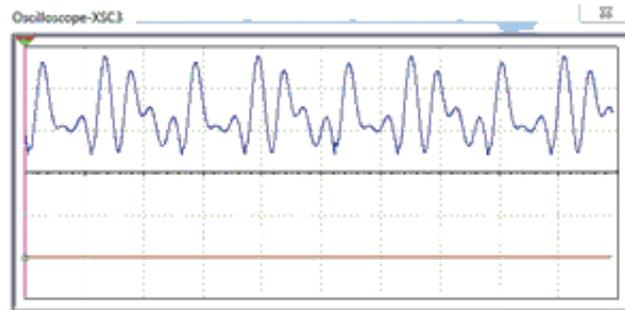


Рис. 12

ров спектра. На рис. 10 приведена схема модели всего устройства. Генерация хаотического колебания осуществляется транзисторным генератором с резонансной системой лестничного типа [4]. Триггер Шмитта, линейный фильтр и другие вспомогательные устройства собраны на операционных усилителях.

На рис. 11 показан пример работы всего устройства, происходящие процессы отображаются на дисплеях виртуальных приборов. Слева сверху приведены осциллограммы входного хаотического колебания и сигнала на выходе триггера Шмитта, прошедшего через нелинейный фильтр, колебаний. Ниже соответственно хаотическое колебание с добавлением шума и реализация шума. Справа фрагмент электрической схемы, собранной в Multisim.

При отсутствии шума уровень сигнала недостаточен для переключения триггера Шмитта, поэтому сигнала на выходе нелинейного фильтра нет (рис. 12).

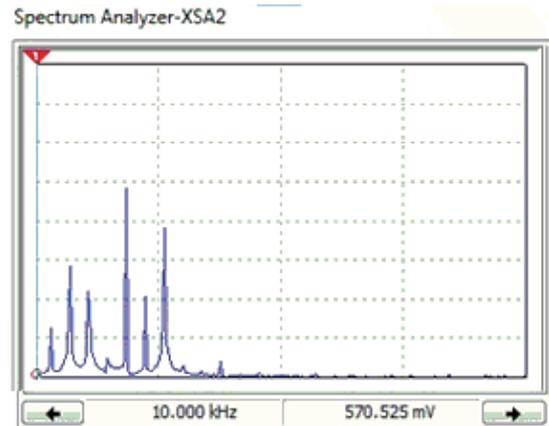


Рис. 13

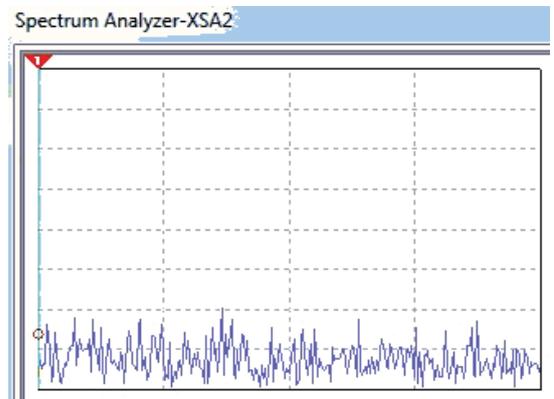


Рис. 14

Спектр хаотического колебания на выходе транзисторного генератора показан на рис. 13.

На рис. 14 представлен спектр шума, добавляемого к хаотическому колебанию.

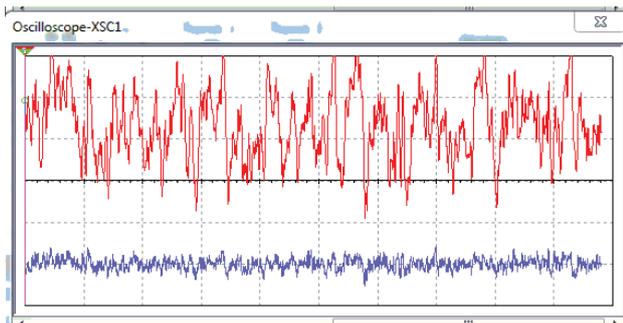


Рис. 15

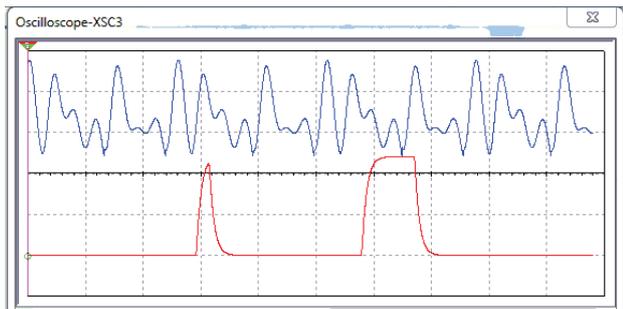


Рис. 16

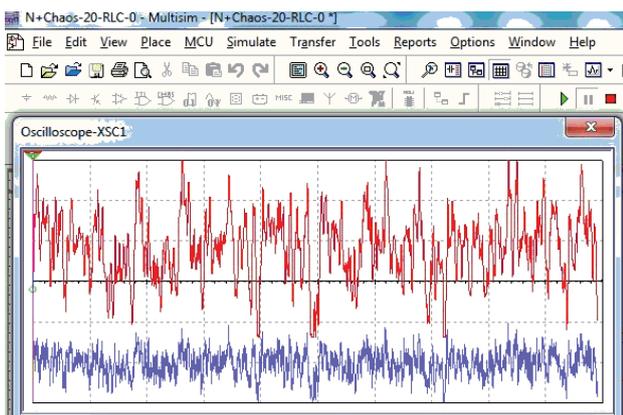


Рис. 17

Хаотическое колебание с добавлением шума и «шумовая дорожка» на рис. 15.

Переключения триггера Шмитта начинают происходить, но уровень шума еще далек от оптимального и динамика процесса на выходе нелинейного фильтра не соответствует сигналу – хаотическому колебанию на входе устройства (рис. 16).

Если уровень шума увеличивается и становится близок к оптимальному уровню, то сигнал и его спектр выглядят достаточно зашумленными (рис. 17 и 18).

Исходное колебание и колебание на выходе триггера Шмитта для этого случая на рис. 19.

В случае оптимального уровня шума спектр входного колебания (аддитивная смесь хаотического колебания и шума) показан на рис. 20,

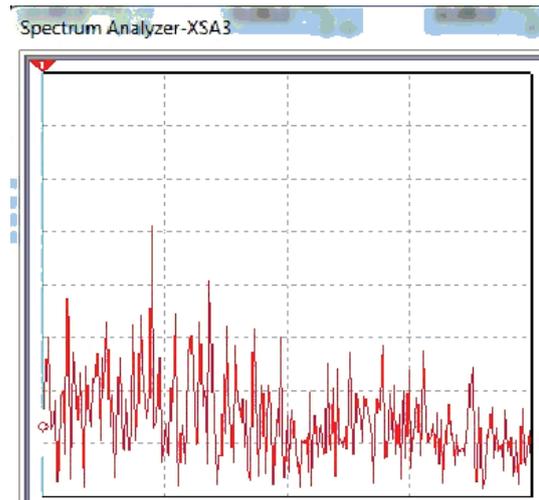


Рис. 18

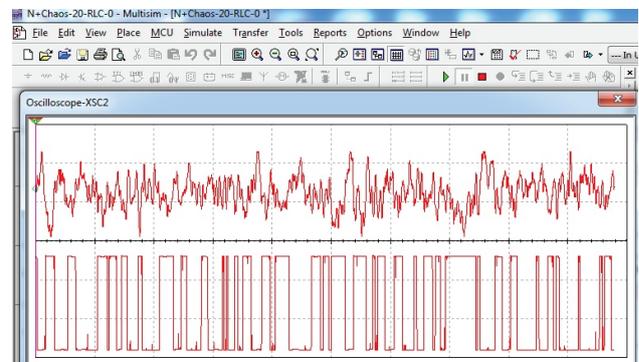


Рис. 19

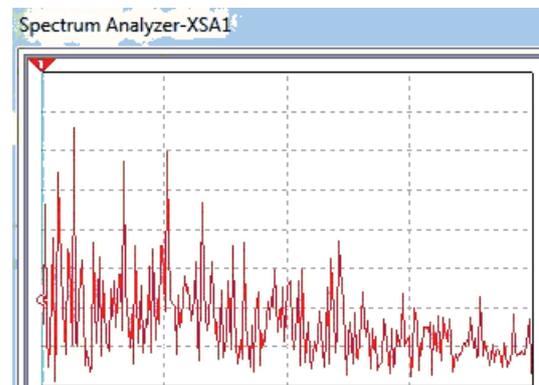


Рис. 20

а хаотическое колебание и колебание на выходе нелинейного фильтра на рис. 21. Спектр выходного колебания соответственно на рис. 22.

Соответствие динамики хаотического и преобразованного колебаний зависит от вида передаточной характеристики нелинейного устройства или формы бистабильного потенциального элемента. Триггер Шмитта имеет релейную характеристику с гистерезисом. Выбор функции бистабильного потенциала является задачей дальнейших исследований.

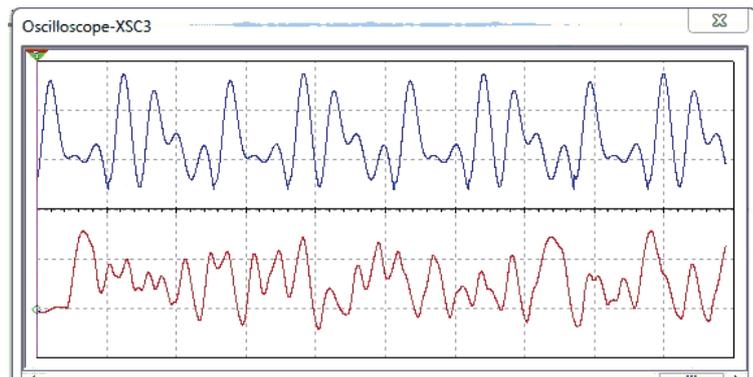


Рис. 21

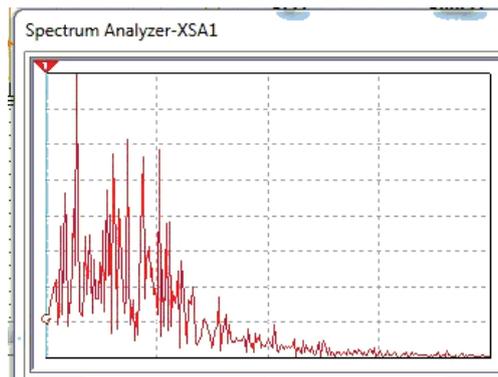


Рис. 22

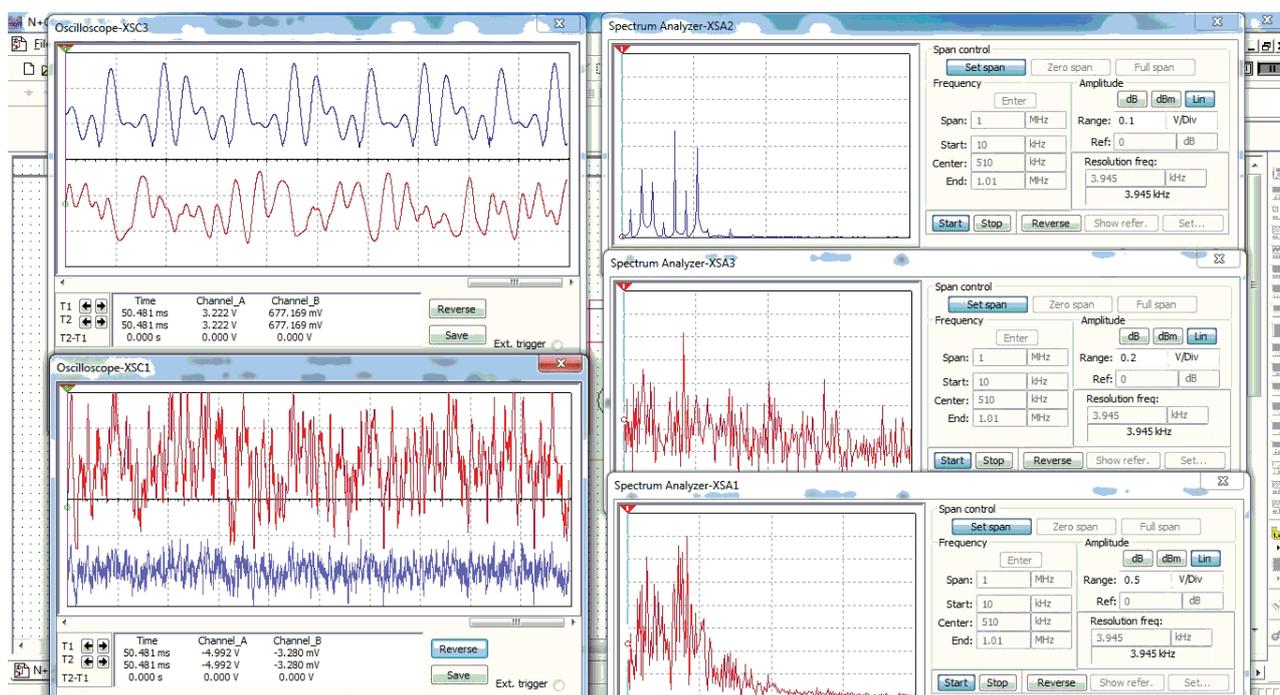


Рис. 23

На рис. 23 показан пример работы всего устройства, происходящие процессы отображаются на дисплеях виртуальных приборов. Слева сверху приведены осциллограммы входного и выходного, прошедшего через нелинейный фильтр, колебаний. Ниже соответственно реализация шума и сигнал с добавлением шума. Справа, сверху вниз соответственно, спектр хаотического колебания, спектр сигнала с добавлением шума и спектр колебания на выходе нелинейного фильтра. Параметры у всех трех анализаторов спектра одинаковы.

При увеличении уровня шума выше оптимального в спектре выходного колебания увеличивается уровень высокочастотных составляющих и в целом динамика выходного процесса менее соответствует исходному хаотическому колебанию.

Заключение

Проведенные исследования показывают возможность выделения сложного сигнала из его смеси с шумом. Схемотехническое моделирование сокращает сроки исследования по сравнению с теоретическими изысканиями и далее позволит быстрее перейти к физической реализации устройства.

Список литературы

1. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / В.С. Анищенко [и др.] // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 1. С. 7–38.
2. Домбровский А.Н., Решетняк С.А. Стохастический резонанс и фильтрация сигналов в нелинейной системе второго порядка // Радиотехника. 2007. № 9. С. 19–25.

3. Казимиров А.Н., Тележкин В.Ф. Генератор сверхширокополосного фрактального сигнала для радиотехнических систем связи // 16 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2014): доклады. 2013. Т. 1. С. 401–404.
4. Максимов Н.А., Панас А.И. Однотранзисторный генератор полосовых хаотических сигналов радиодиапазона // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 11. С. 61–68.
5. Kazimirov A.N., Telezhkin V.F. Research of methods of transformation of chaotic signals in radio engineering systems // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk, Russia, 2016. P. 401–404.

Filtering harmonic and chaotic signals in non-linear radio electronic systems

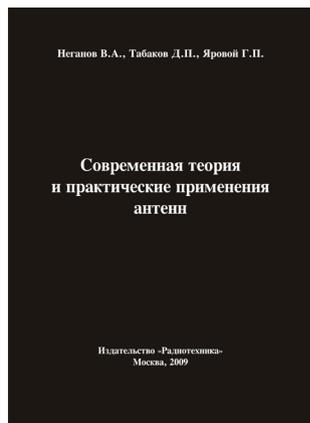
A.N. Kazimirov

Creation of non-linear radio engineering systems is the perspective direction. In radio engineering system as informational chaotic fluctuation is used. In work non-linear filtration of mix of chaotic fluctuation and noise is investigated. The non-linear filter contains the bistable system – Schmitt's trigger and the edge filter. In the filter the effect of a stochastic resonance takes place. The signal at the exit of non-linear system amplifies with body height of intensity of noise to some of its best value. For narrow-band signals the effect of a stochastic resonance is investigated rather explicitly. Results of model operation are given in the Multisim program.

Keywords: chaotic dynamics, a stochastic resonance, the bistable system – Schmitt's trigger, optimum level of noise, the non-linear filter, a spectral analysis of fluctuations.

Неганов, В.А.

Современная теория и практические применения антенн: монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.



ISBN 978-5-88070-222-0

УДК 621.396.67
ББК 32.845

Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.