

УДК 621.372(075)

Использование аппарата передаточных функций Вольтерра в решении задачи стохастической фильтрации с входным сигналом в виде белого Гауссова шума

Харченко О. И.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: dthnbycrbq@gmail.com

В данной работе исследуется прохождение случайного процесса с Гауссовым распределением через нелинейный фильтр, обладающий эффектом стохастического резонанса. В расчетах использован математический аппарат рядов Вольтерра. С помощью рядов Вольтерра можно представить очень много систем, с которыми приходится иметь дело при решении задач связи. Показано, что важнейшую роль в данном анализе играет многомерное преобразование Фурье. Если передаточные функции Вольтерра известны, то путем подстановки их в общие формулы, выведенные на основе представления в виде рядов Вольтерра, можно получить требуемые данные относительно выходного сигнала. К числу таких данных относятся выражения для спектра мощности различных моментов. Рассчитаны передаточные функции Вольтерра, на основании которых получены выражения для начального момента второго порядка и спектральной плотности мощности выходного сигнала. Рассчитаны и проанализированы частотные зависимости спектральной плотности мощности сигнала на выходе нелинейного стохастического фильтра, а также амплитудные характеристики при различных значениях параметров фильтра. Полученные результаты показали, что спектральная плотность мощности сигнала на выходе рассматриваемого нелинейного стохастического фильтра убывает с ростом частоты и возрастает с увеличением спектральной плотности мощности входного сигнала. Кроме того, анализ плотности вероятности выходного сигнала показал, что значения сигнала на выходе нелинейного стохастического фильтра описываются распределением Стьюдента. Для оценки точности и достоверности полученных результатов были проведены численные расчеты выходного сигнала методом Рунге - Кутты. Сравнительный анализ показал аналогичный характер кривых спектральной плотности мощности выходного сигнала, полученного в результате расчета численным методом и на основе рядов Вольтерра.

Ключевые слова: стохастический резонанс; нелинейный стохастический фильтр; белый Гауссов шум; ряды Вольтерра, передаточные функции Вольтерра, спектральная плотность мощности

DOI: [10.20535/RADAP.2018.74.11-16](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.74.11-16)

Введение

В системах связи часто приходится иметь дело с устройствами, выполняющими нелинейные преобразования. Значительное число нелинейных систем может быть представлено рядами Вольтерра. Норберт Винер первым использовал ряды Вольтерра для анализа нелинейных систем [1].

В настоящей работе ряды Вольтерра применяются к нелинейным системам, обладающим эффектом стохастического резонанса, на входе которых действует белый Гауссов шум.

Ряды Вольтерра описываются как «степенные ряды с памятью», в этом случае выходной сигнал нелинейной системы может быть представлен в виде степеней входного сигнала. Выходной сигнал в

результате приобретает вид:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \int_{-\infty}^{\infty} du_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} du_n g_n(u_1, \dots, u_n) \prod_{r=1}^n x(t - u_r), \quad (1)$$

где $y(t)$ - выходной сигнал, $x(t)$ - входной сигнал и ядра описывают систему. Ядро первого порядка $g_1(u_1)$ - это хорошо известная импульсная характеристика линейной системы. Ядра высших порядков можно рассматривать как импульсные отклики более высокого порядка, которые характеризуют нелинейности различных порядков [2–4].

Коэффициент $\frac{1}{n!}$ введен в работе А. Бедросяна и Д. Райса [4] для упрощения записи многих уравнений.

Дальнейший анализ основан на использовании многомерного преобразования Фурье, которое имеет вид:

$$G_n(f_1, \dots, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} du_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} du_n g_n(u_1, \dots, u_n) e^{-j(\omega_1 u_1 + \dots + \omega_n u_n)}, \quad (2)$$

где $\omega_i = 2\pi f_i$, функция G_0 тождественно равна нулю, что отражает принцип каузальности рассматриваемой нелинейной системы. $G_1(f_1)$ является передаточной функцией линейной системы [5, 6]. Таким образом, преобразование ядра Вольтерра n -го порядка аналогично передаточной функции Вольтерра n -го порядка. Во многих случаях G_n можно получить без первоначального вычисления ядер Вольтерра [2, 4].

Предположим, что для конкретной системы функции G_n при $n = 1, 2, \dots$ известны. Тогда можно получить выражение для $y(t)$, используя передаточные функции Вольтерра.

Полные формулы ряда Вольтерра — это бесконечные ряды, в которых громоздкость вычисления n -го члена быстро возрастает с ростом значения n . В то же время, при изучении систем связи часто можно пренебречь членами ряда выше второго или третьего порядка [4].

Для вычисления передаточных функций воспользуемся методом гармонического входного сигнала, который был подробно изложен в [4].

Рассмотрим нелинейное дифференциальное уравнение вида:

$$F(d/dt)y + \sum_{l=2}^{\infty} a_l y^l = x(t). \quad (3)$$

Предполагается, что выходной сигнал тождественно равен нулю, если равен нулю входной сигнал $x(t)$. Предполагается также, что система устойчива. $F(d/dt)$ является многочленом от d/dt , и коэффициенты в $F(d/dt)$ и коэффициенты a_l не зависят от t , x и $y(t)$. В [2] показано, что для заданных начальных условий существует единственное решение уравнения (3). В работе [4] для изложенных условий были определены передаточные функции Вольтерра. Результаты данного расчета приведены в табл. 1.

Нелинейная стохастическая фильтрация на основе стохастического резонанса

Борьба с шумами является одной из основных задач радиотехники, радиолокации и связи. До настоящего времени разработано большое число различных методов решения этой задачи [7–9]. Вместе с тем, в 90-годах прошлого века были проведены исследования в области прикладной физики, которые привели к парадоксальным результатам. Оказалось, что при определенных условиях шум может играть конструктивную роль, обеспечивая усиление входного сигнала. Этот эффект получил название стохастического резонанса (СР). Приложение этого явления в радиотехнике и связи получило название нелинейной стохастической фильтрации [10].

Уравнение, описывающее эффект СР, имеет вид [11–13]:

$$\frac{dy}{dt} = ay(t) - by(t)^3 + x(t), \quad (4)$$

где $x(t) = s(t) + n(t)$, $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$ — полезный сигнал, $n(t)$ — белый Гауссов шум.

Данное уравнение является частным случаем уравнения (3), где учтено, что $F(d/dt)y = dy/dt - ay(t)$ и $\sum_{l=2}^{\infty} a_l y^l = by(t)^3$. Используя полученные выражения, определим передаточные функции Вольтерра для уравнения СР. Результаты расчета передаточных функций Вольтерра нелинейной системы в режиме СР приведены в третьей колонке табл. 1.

Определим параметры выходного сигнала, при условии, что на входе нелинейного стохастического фильтра действует только шум. Предполагается, что шум представляет собой стационарный Гауссов процесс с нулевым средним значением и двусторонним спектром мощности W_x . Полученные выражения для начального момента второго порядка выходного сигнала приведены в табл. 2, где в первой колонке показан общий вид выражений, полученный в работе [4], а во второй — результаты расчета для нелинейного стохастического фильтра.

В результате начальный момент второго порядка выходного процесса равен:

$$\langle y^2(t) \rangle \approx \begin{cases} W_x/2a - 3bW_x^2/4a^3, & \text{if } a > 0, \\ -W_x/2a + 3bW_x^2/4a^3, & \text{if } a < 0. \end{cases}$$

Используя передаточные функции Вольтерра, определим двусторонний спектр мощности выходного сигнала $W_y(t)$. Основные члены ряда двустороннего спектра мощности выходного сигнала $W_y(t)$ приведены в табл. 3.

Табл. 1 Передаточные функции Вольтерра

	Перед. функции Вольтерра для ур-я (3) [4]	Перед. функции Вольтерра для ур-я (4)
$G_1(f_1)$	$\frac{1}{F(j\omega_1)}$	$\frac{1}{-a+j\omega_1}$
$G_2(f_1, f_2)$	$\frac{-2a_2 G_1(f_1)G_1(f_2)}{F(j\omega_1+j\omega_2)}$	0
$G_3(f_1, f_2, f_3)$	$-\frac{2a_2 \sum_3 G_1(f_1)G_2(f_2, f_3)}{F(j\omega_1+j\omega_2+j\omega_3)} + \frac{6a_3 G_1(f_1)G_1(f_2)G_1(f_3)}{F(j\omega_1+j\omega_2+j\omega_3)}$	$\frac{-6b}{(-a+j\omega_1)(-a+j\omega_2)(-a+j\omega_3)(-a+j\omega_1+j\omega_2+j\omega_3)}$

Табл. 2 Основные члены ряда для одномерного момента второго порядка выходного сигнала

Основные составляющие начального момента второго порядка выходного сигнала для ур-я (3) [4]	Основные составляющие начального момента второго порядка выходного сигнала для ур-я (4)
$\langle y(t) \rangle^2$	0
$\int_{-\infty}^{\infty} df_1 W_x(f_1)G_1(f_1)G_1(-f_1)$	$W_x/2a$, if $a > 0$, $-W_x/2a$, if $a < 0$
$\int_{-\infty}^{\infty} df_1 \int_{-\infty}^{\infty} df_2 W_x(f_1)W_x(f_2)[G_1(f_1)G_3(-f_1, f_2, -f_2)]$	$-3bW_x^2/4a^3$, if $a > 0$, $3bW_x^2/4a^3$, if $a < 0$

Табл. 3 Основные члены ряда двустороннего спектра мощности выходного сигнала

Основные составляющие двустороннего спектра мощности выходного сигнала для ур-я (3) [4]	Основные составляющие двустороннего спектра мощности выходного сигнала для ур-я (4)
$\langle y(t) \rangle^2 \delta(f)$	0
$W_x(f) \left G_1(f) + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} df_1 W_x(f_1)G_3(f, f_1, -f_1) \right ^2$	$W_x \frac{(3bW_x - 2a^2)^2 + 4a^2\omega^2}{4a^2(a^2 + \omega^2)^2}$, if $a > 0$, $W_x \frac{(3bW_x + 2a^2)^2 + 4a^2\omega^2}{4a^2(a^2 + \omega^2)^2}$ if $a < 0$
$\frac{1}{2!} \int_{-\infty}^{\infty} df_1 W_x(f_1)W_x(f - f_1) G_2(f_1, f - f_1) ^2$	0
$\frac{1}{3!} \int_{-\infty}^{\infty} df_1 \int_{-\infty}^{\infty} df_2 W_x(f_1)W_x(f_2)W_x(f - f_1 - f_2) G_3(f_1, f_2, f - f_1 - f_2) ^2$	$\frac{9b^2}{2(a^2 + \omega^2)a^2(\omega^2 + 9a^2)} W_x^3$, if $a > 0$, $-\frac{9b^2}{2(a^2 + \omega^2)a^2(\omega^2 + 9a^2)} W_x^3$ if $a < 0$

Компоненты разложения двустороннего спектра мощности выходного сигнала для начальных значений n имеют вид:

$$W_y(f) \approx \begin{cases} W_x \frac{(3bW_x - 2a^2)^2 + 4a^2\omega^2}{4a^2(a^2 + \omega^2)^2} + \frac{9b^2}{2(a^2 + \omega^2)a^2(\omega^2 + 9a^2)} W_x^3, & \text{if } a > 0; \\ W_x \frac{(3bW_x + 2a^2)^2 + 4a^2\omega^2}{4a^2(a^2 + \omega^2)^2} - \frac{9b^2}{2(a^2 + \omega^2)a^2(\omega^2 + 9a^2)} W_x^3, & \text{if } a < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Используя данную формулу, построим график зависимости спектральной плотности мощности выходного сигнала и сравним с численным решением уравнения СР методом Рунге-Кутты (рис. 1). Графики имеют одинаковый характер, спектральная плотность мощности сигнала на выходе стохастического нелинейного фильтра убывает с ростом частоты, что является характерным свойством нелинейных систем [12, 14].

Рассмотрим частотные зависимости спектральной плотности мощности выходного сигнала, рассчитанные с помощью выражения (5) (рис. 2).

Как видно, с ростом входной спектральной плотности мощности спектральная плотность мощности на выходе также возрастает, однако при положительном a рост выходной мощности характеризуется большей крутизной. Частотная зависимость вновь отражает свойство нелинейных систем, о котором говорилось выше.

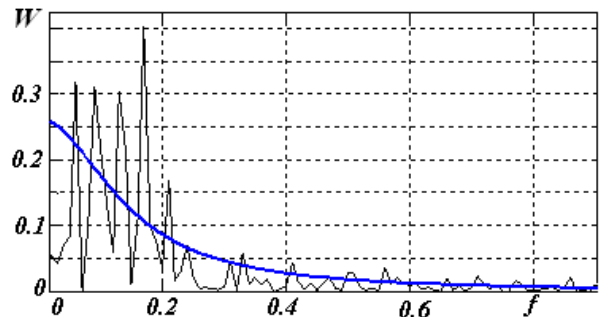


Рис. 1. Спектральная плотность мощности сигнала на выходе нелинейного устройства в случае белого Гауссова шума на входе (черная линия – численный расчет методом Рунге-Кутты, синяя – расчет по формуле (5), $a = b = 1$)

Как известно, при прохождении случайного процесса с нормальным распределением через линейную систему закон распределения выходного си-

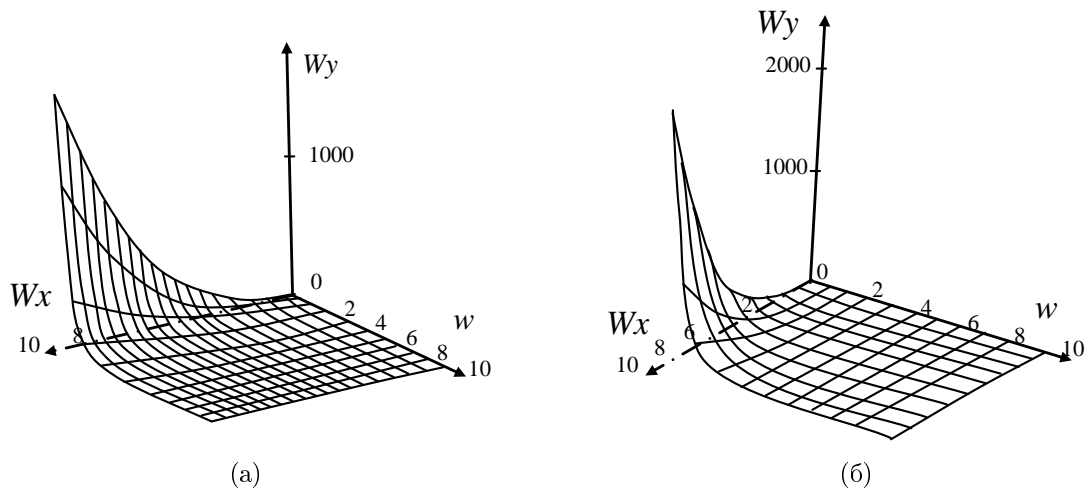


Рис. 2. Спектральная плотность мощности сигнала на выходе стохастического нелинейного фильтра в случае белого Гауссова шума на входе: (а) $a = -1$; (б) $a = 1$)

сигнала сохраняет нормальные свойства, в то время, как в нелинейных системах такое соответствие утрачивается [6, 14]. Результаты расчета плотности распределения выходного сигнала для нелинейного стохастического фильтра приведены на рис. 3.

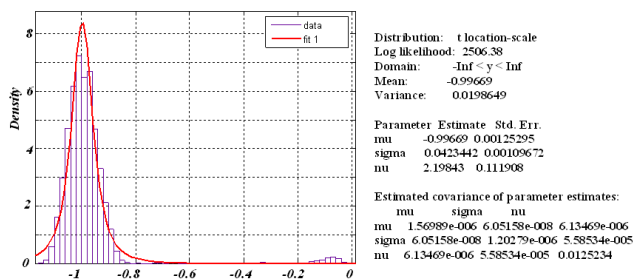


Рис. 3. Гистограмма и плотность распределения выходного сигнала ($a = b = 1$)

Проведенный расчет плотности распределения выходного сигнала для нелинейного стохастического фильтра показал, что выходной процесс описывается распределением Стьюдента [15].

Выводы

В настоящей работе получил дальнейшее развитие метод передаточных функций Вольтерра применительно к нелинейным системам. Были определены передаточные функции Вольтерра для нелинейного стохастического фильтра.

Рассмотрен случай входного сигнала в виде белого Гауссова шума. На основе рядов Вольтерра получены выражения для начального момента второго порядка и спектральной плотности мощности выходного сигнала. Анализ результатов расчета функций спектральной плотности мощности выходного сигнала, полученных на основе рядов Вольтерра и на основе метода Рунге-Кутты, показали одинаковый характер ее частотной зависимости. Эта зависимость носит убывающий характер, что

является одним из основных свойств нелинейных систем.

Рассчитана и построена частотная зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала при различных значениях спектральной плотности мощности входного сигнала. Показано, что при различных параметрах стохастического нелинейного фильтра его амплитудные характеристики имеют различный характер.

Анализ плотности распределения сигнала на выходе нелинейного стохастического фильтра показал, что значения выходного сигнала имеют распределение, отличное от нормального и описываются законом Стьюдента.

В дальнейшем планируется рассмотреть в виде входного сигнала аддитивную смесь гармонического сигнала и белого Гауссова шума.

Перелік посилань

1. Wiener N. Nonlinear Problems in Random Theory. — Cambridge, Mass. Technology Press, 1958. — 142 p.
2. Пупков К.А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко — М. : Наука, 1978. — 448с.
3. Xu B. Modified Volterra series transfer function method // IEEE Photonics Technology Letters. — 2002. — Vol. 14, Iss. 1. — pp. 47-48.
4. Bedrosian E. The Output Properties of Volterra Systems (Nonlinear Systems with Memory) Driven by Harmonic and Gaussian Inputs / E. Bedrosian, S. Rice // Proceedings of the IEEE. — 1971. — Vol. 59, No 12. — pp. 58-82.
5. Нефедов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для академического бакалавриата / В. И. Нефедов, А. С. Сигов ; под ред. В. И. Нефедова. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 266 с.
6. Волошук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці / Ю. І. Волошук. — Харків : Компанія СМІТ, 2005. — 228 с.
7. Sklar B. Digital Communication. Fundamentals and Applications, Second Edition / B. Sklar. — Prentice Hall PTR, 2003. — 1099 p.

8. Радиотехника: Энциклопедия / Под. ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правдыю. — М. : Додэка-XXI, 2002. — 944 с.
9. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, Д.И. Леховицкий и др. — М. : Радиотехника, 2007. — 512 с.
10. Домбровский А.Н. Стохастический резонанс и фильтрация сигналов в нелинейных радиотехнических системах. Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.12.04 / Домбровский А. Н.. — 2010. — 110 с.
11. Семенов В.В. Индуцированные шумом эффекты в модели бистабильного осциллятора с переменной диссипацией / В.В. Семенов, А.Б. Нейман, Т.Е. Вадивасова, В.С. Анищенко // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2016. — Т. 24, № 1. — С. 5–15.
12. Kharchenko O. Simulation of the Stochastic Resonance Effect in a Nonlinear Device / O. Kharchenko // Global Journal of Researches in Engineering-F. —2015. — Vol. 15, Iss. 7. — p. 19-23.
13. Zhang X., Hu N., Hu L. and Cheng Z. Stochastic resonance in multi-scale bistable array / X. Zhang, N. Hu, L. Hu, Z. Cheng // Physics Letter A. —2013. —Vol. 377, No 13. — pp. 981-984.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая / Б.Р. Левин. — М. : Сов. радио, 1969. — 752 с.
15. Ивченко Г.И. Введение в математическую статистику / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. — М. : ЛКИ, 2010. — 600 с.
- 9] Shirman Ya.D., Bagdasaryan S.T. and Lekhovitskii D.I. (2007) *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya* [Radioelectronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory], Moskow, Radiotekhnika, 512 p.
- 10] Dombrovskii A.N. (2010) *Stokhasticheskiy rezonans i fil'tratsiya signalov v nelineinykh radiotekhnicheskikh sistemakh* [Stochastic resonance and signal filtering in nonlinear radio engineering systems. Cand. of techn. sci. diss.], 110 p.
- 11] Semenov V.V., University S.S., Neiman A.B., Vadivasova T.E., Anishenko V.S., University O., University S.S. and University S.S. (2016) Noise-induced effects in the double-well oscillator with variable friction. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, Vol. 24, Iss. 1, pp. 5-15. DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-1-5-15
- 12] Kharchenko O. (2015) Simulation of the Stochastic Resonance Effect in a Nonlinear Device. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 15, Iss. 7, p. 19-23.
- 13] Zhang X., Hu N., Hu L. and Cheng Z. (2013) Stochastic resonance in multi-scale bistable array. *Physics Letters A*, Vol. 377, Iss. 13, pp. 981-984. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.02.025
- 14] Levin B.R. (1969) *Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki. Kniga pervaya* [Theoretical bases of statistical radio engineering. Vol. 1], Moskow, Sov. radio, 752 p.
- 15] Ivchenko G. I. and Medvedev Yu. I. (2010) *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to mathematical statistics], Moskow, LKI, 600 s.

References

- [1] Wiener N. (1958) *Nonlinear Problems in Random Theory*, Cambridge, Mass. Technology Press., 142 p.
- [2] Pupkov K. A., Kaplan V. I. and Yushchenko A. S. (1978) *Funktional'nye ryady v teorii nelineinykh sistem* [Functional series in the theory of nonlinear systems], Moskow, Nauka, 448 p.
- [3] Xu B. and Brandt-Pearce M. (2002) Modified Volterra series transfer function method. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 14, Iss. 1, pp. 47-49. DOI: 10.1109/68.974157
- [4] Bedrosian E. and Rice S. (1971) The output properties of Volterra systems (nonlinear systems with memory) driven by harmonic and Gaussian inputs. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 59, Iss. 12, pp. 1688-1707. DOI: 10.1109/proc.1971.8525
- [5] Nefedov V. I. ed. and Sigov A. S. (2018) *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata* [Radio circuits and signals], Moskow, Yurait, 266 p.
- [6] Voloshchuk Yu. I. (2005) *Syhnaly ta protsesy u radiotekhnitsi* [Signals and processes in radio engineering] Kharkiv, Kompaniia SMIT, 228 p.
- [7] Sklar B. (2001) *Digital Communication. Fundamentals and Applications, Second Edition*, Prentice Hall PTR, 1099 p.
- [8] Mazor Yu. L. eds., Machuskiy E. A. and Pravda V.I. (2002) *Radiotekhnika: Ensiklopedia* [Radio engineering: Encyclopedia], Moskow, Dodeka-XXI, 944 p.

Використання апарату передаточних функцій Вольєрра у вирішенні задачі стохастичної фільтрації з вхідним сигналом у вигляді білого Гауссового шуму

Харченко О. І.

У цій роботі досліджується проходження випадкового процесу з Гауссовим розподілом через нелінійний фільтр, що має ефект стохастичного резонансу. У розрахунках використано математичний апарат рядів Вольєрра. Розраховано передатні функції Вольєрра, на підставі яких отримано вирази для початкового моменту другого порядку та спектральної щільності потужності вихідного сигналу. Отримані результати показали, що спектральна щільність потужності сигналу на виході даного нелінійного стохастичного фільтра убиває із зростанням частоти і зростає зі збільшенням спектральної щільності потужності вхідного сигналу. Розраховуються та аналізуються частотні залежності спектральної щільності потужності вихідного сигналу нелінійного стохастичного фільтра, а також амплітудних характеристик у випадку різних значень параметрів фільтра. Отримані результати показали, що спектральна щільність потужності вихідного сигналу розглянутого нелінійного стохастичного фільтра зменшується із зростанням частоти і збільшується при зростанні спектральної щільності потужності вхідного сигналу. Крім того, аналіз функції щільності імовірності вихідного сигналу показав, що значення вихідного сигналу нелінійного стохастичного фільтра описуються розподілом Стюдента. Для оцінки точності та достовірності отриманих результатів проведено чисельні розрахунки вихідного сигналу методом

Рунге-Кутта. Порівняльний аналіз залежностей щільності спектра потужності вихідного сигналу, отриманих численним розрахунком, і на основі рядів Вольтерра показує їх подібний характер. Далі планується розглянути нелінійний стохастичний фільтр, на вході якого діє суміш гармонійного та білого Гауссового шуму.

Ключові слова: стохастичний резонанс; нелінійний стохастичний фільтр; білий Гауссовий шум; ряди Вольтерра; передатні функції Вольтерра; спектральна щільність потужності

Using of Volterr's Transfer Functions in Solving the Problem of Stochastic Filtration with Input Signal in the Form of White Gaussian Noise

Kharchenko O. I.

This paper is continuation of the researches of non-linear systems in case of different input signals. Earlier, the case of a harmonic input signal was considered. Expressions for the output harmonics were received. In present paper Gaussian random process passing through the non-linear filter having the effect of a stochastic resonance is researched. Volterra series is used in calculations. A substantial number of the systems encountered in communication problems can be represented as Volterra series. It is shown that the n-fold Fourier transform plays an important role in this analysis. When the Volterra transfer functions are known, items of

interest regarding the output can be obtained by substituting them in general formulas derived from the Volterra series representation. These items include expressions for the output power spectrum and various moments. Volterra transfer function by means of which expressions for the second order initial moment and power spectral density of output process are calculated. The frequency dependences of power spectral density of the output signal of the non-linear stochastic filter and also amplitude characteristics are calculated and analyzed in case of different parameter values of the filter. The obtained results showed that power spectral density of the output signal of the considered non-linear stochastic filter decreases when frequency increases and increases when power spectral density of an input signal increases. Besides, the analysis of probability density function of an output signal showed that values of the non-linear stochastic filter output signal are described by Student's t-distribution. Numerical calculations of an output signal by Runge-Kutta method were carried out for assessment of accuracy and reliability of the obtained results. The comparative analysis of dependences of an output signal power spectrum densities are obtained by the numerical calculation and on the basis of Volterra series shows their similar character. Further it is planned to consider non-linear stochastic filter driven by the mixture of harmonic and Gaussian input.

Key words: stochastic resonance; nonlinear stochastic filter; white Gaussian noise; Volterra series; Volterra transfer function; power spectral density