

9. Galustov G.G. Modelirovanie sluchaynykh protsessov i otsenivanie ikh statisticheskikh kharakteristik [Modeling of random processes and estimation of their statistical characteristics]. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 120 p.
10. Ivanov M.A., Chugunkov I.V. Teoriya, primeneniye i otsenka kachestva generatorov psevdosluchaynykh posledovatel'nostey [Theory, implementation, and evaluation of the quality of pseudorandom sequences]. Moscow: KUDITs-OBRAZ, 2003, 240 p.
11. Bakalov V.P. Tsifrovoye modelirovanie sluchaynykh protsessov [Digital simulation of random processes]. Moscow: SAYNS-PRESS, 2002, 88 p.
12. Barash L. Algoritm AKS proverki chisel na prostotu i poisk konstant generatorov psevdosluchaynykh chisel [The AKS algorithm checks for Prime numbers and the search for constants of the pseudo-random number generator], *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy* [Bezopasnost Informatsionnykh Tekhnology], 2005, No. 2, pp. 27-38.
13. Uspenskiy V.A. Chetyre algoritmicheskikh litsa sluchaynosti [Four algorithmic faces of randomness]. Moscow: MTsNMO, 2006, 48 p. ISBN 978-5-94057-485-9.
14. Zhel'nikov V. Kriptogpafiya ot papirusa do komp'yutepa [Cryptography from papyrus to computer]. Moscow: ABF, 1996, 335 p. ISBN 5-87484-054-0.
15. Barker E., Kelsi Dzh. Rekomendatsiya dlya pokoleniya sluchaynogo chisla, ispol'zuya determinirovannyye sluchaynye generatory dolota, NIST SP800-90A, yanvar' 2012 [Recommendation for random number generation using deterministic-mined random bit generators, NIST SP800-90A, January 2012].
16. Kulikov D., Li A. Novyy datchik dlya registratsii psikhofizicheskikh vozdeystviy na osnove poluprovodnikovyykh generatorov shuma [A new sensor for registration of psychophysical effects on the basis of semiconductor noise generators], *Anomaliya* [Anomaly], 2009, No. 4, pp. 3-9.
17. Galustov G.G., Voronin V.V. Parameters estimation of random sequence in the stochastic calculating devices, *23rd Telecommunications Forum TELFOR 2015, 24-26th November 2015 (Belgrade, Serbia)*, pp. 670-673.
18. Menezes A., van Oorshot P., Vanstone S. Handbook of Applied Cryptography. CRC Press, 1997.
19. Cortois P.J. Decomposability instabilities and saturation in multiprogramming system, *Communications of the ACM*, 1975, Vol. 18, No. 7, pp. 371-377.
20. Kumar A. Equivalent queueing networks and their use in approximate equilibrium analysis, *The Bell system technical J.*, 1982, Vol. 62, No. 10, pp. 2893-2907.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Галустов Геннадий Григорьевич – Южный федеральный университет; e-mail: g.galustov@ya.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89045011525; кафедра радиоприёмных устройств и телевидения; зав. кафедрой; д.т.н.

Galustov Gennady Grigorevich – Southern Federal University; e-mail: g.galustov@ya.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79045011525; the department of radio receivers and television; head the department; dr. of eng. sc.

УДК 521.3.01

П.Ю. Волощенко, Ю.П. Волощенко, С.Б. Мальков

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ СИГНАЛОВ В ОДНОМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ

Проведено аналитическое исследование композиции волн в электронной цепи с распределенными параметрами методами схем замещения, эквивалентных синусоид и комплексных амплитуд, двух узлов и активного двухполюсника, законов Кирхгофа и теоремы Телледжена. Она моделирует электрические и нелинейные электронные процессы взаимодействия единого электромагнитного (ЭМ) поля микрополосковой воздушной линии и носителей заряда в двух полупроводниковых приборах (ПП) СВЧ. Считаем, что ее геометрическая конфигурация, а также свойства окружающей среды остаются неизменными вдоль

продольной координаты. Иллюстрацию возбуждения идеальным источником мощности соединительного проводника при неизвестном импедансе ПП осуществляем одновременно схемами однопортового четырехполюсника с распределенными нелинейными параметрами, проходного невзаимного четырехполюсника и эквивалентной двухпроводной линии передачи, нагруженной резистивно-негатронным нелинейным элементом (НЭ). В ходе символического анализа дифракции ЭМ волн ПП комплексная частотная входная и передаточная характеристика одномерной электронной цепи характеризуется S - и A -параметрами, решением уравнений Гельмгольца в виде стоячих волн, зависящим от интенсивности воздействия, рабочего режима негатрона и фазовой скоростью распространения фронта волн напряжения и тока в ней. Показано, что граничные условия в начале и конце исследуемой линии с НЭ, зависят от интенсивности воздействия и инерционной реакции, явления интерференции при наложении сигналов. Законы трансформации когерентных волн проанализированы на примере идеализированной четвертьволновой цепи, шунтированной резистивно-негатронным двухполюсником. Определены ее параметры, обеспечивающие режим бегущей волны и одностороннюю передачу колебательной энергии между ПП.

Длинная линия; резистивно-негатронный нелинейный элемент; теория электронных цепей с распределенными параметрами.

P.Yu. Voloshchenko, Yu.P. Voloshchenko, S.B. Malkov

MODELING OF SIGNAL COMPOSITION IN A ONEDIMENSIONAL ELECTRONIC CIRCUIT

An analytical study of wave composition in a distributed parameter electronic circuit through methods of equivalent circuits, equivalent sine wave and complex amplitude, nodal-pair and active one-port, Kirchhoff laws and Tellegen theorem is carried out. It models electric and nonlinear electronic interacting processes of a microstrip uniform electromagnetic field and charge carriers in two microwave semiconductor devices. Consider that its geometrical configuration and environment properties remain invariable along the longitudinal coordinate. The excitement of connecting line with unknown impedance of the semiconductor device by ideal power source we illustrate simultaneously by the schemes of the one-port quadripole with distributed nonlinear parameters, nonreciprocal transmission quadripole and the equivalent two-wire transmission line loaded with a resistive negatron nonlinear element. In the symbolical analysis of electromagnetic waves diffraction by semiconductor devices the input and transfer complex frequency characteristics of one-dimensional electronic circuit is characterized by S - and A - parameters, the standing waves solution of Helmholtz equations depending on impact intensity, negatron operating mode and voltage and current wave front phase speed in it. It is shown that boundary conditions at the beginning and end of analyzed long line with nonlinear element depends on impact intensity and delayed reaction, signal overlapping interference phenomenon. The coherent wave transformation laws are analyzed using the example of idealized quarter wave line loaded with resistance-negatron two-terminal element. Its parameters providing a traveling-wave mode and a one-way oscillatory energy transmission between semiconductor devices are defined.

A long line; a resistance-negatron nonlinear element; the theory of distributed parameter electronic circuit.

Введение. Как известно, для моделирования явления дифракции сигналов, распространяющихся вдоль и между токнесущих проводников конформных сверхскоростных изделий аналоговой и цифровой техники, выполняют обращенный анализ интерференции волн напряжения и тока при гармоническом возмущении и реакции электромагнитного (ЭМ) поля [1–4]. В этом случае конкретизируют инерционный отклик на зажимах нагрузки, а затем определяют функцию воздействия. Однако объемные и планарные «электрически негерметичные» (или открытые) конструкции из электронных компонентов СВЧ могут не иметь устойчивого энергетического состояния при заданных условиях, достаточных в случае решения линейных электро- и радиотехнических задач [5]. Поэтому для расчета стационарного режима таких микроволновых устройств необходимо предварительно анали-

тически исследовать характеристики фрагмента изделия, содержащего разнородные детали и узлы, например, микрополосковую воздушную линию (1) и два лавинно-пролетных диода (ЛПД) (2), герметизированных от атмосферы компаундом [5–7]. Его конструктивно-технологическая схема приведена на рис. 1.

Описание модели. Проведем символичный анализ влияния эффекта наложения сигналов в однородном тракте, на одном из концов которого размещен полупроводниковый прибор (ПП) СВЧ без конкретизации типа этих элементов методами схем замещения, эквивалентных синусоид и комплексных амплитуд, двух узлов и активного двухполюсника [8–22]. Считаем, что его геометрическая конфигурация, а также свойства окружающей среды остаются неизменными вдоль продольной координаты (рис. 1). Такой регулярный канал связи соединяет источник монохроматического возмущения общего поля с локальной областью пространства, в которой наблюдается явление коррелированной электрической проводимости, обусловленное инерционным движением свободных зарядов [6, 12]. Поэтому математическая модель волновых процессов в конструктивной единице изделия когерентной электроники (рис. 1) должна учитывать энергию взаимодействия ЭМ – колебаний СВЧ, когерентно потребляемую или отдаваемую электронами за время пролета межэлектродного пространства ЛПД [1, 2, 6, 7].

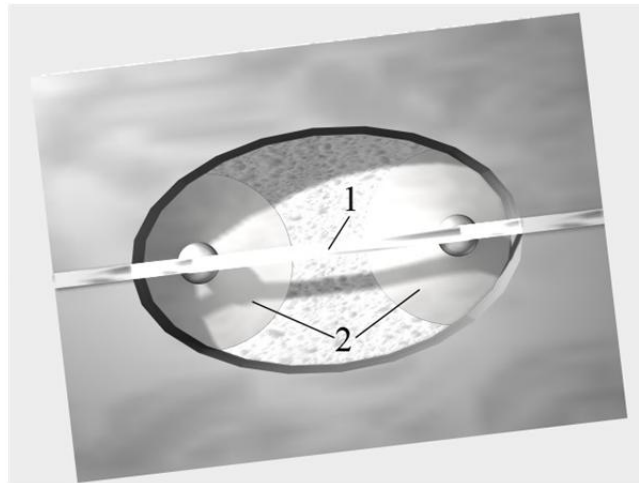


Рис. 1. Схема конструктивно-технологического исполнения одномерной электронной цепи

Вследствие необходимости адекватного применения законов Кирхгофа и теоремы Телледжена при неизвестном импедансе ПП используем схемы однопортового четырехполюсника с распределенными нелинейными параметрами для иллюстрации механизма дифракции сигналов вдоль проводника и в диэлектрике, изолирующем его по постоянному току. Одновременно воспользуемся макромоделями проходного невзаимного четырехполюсника и эквивалентной линии передачи, нагруженной резистивно-негатронным нелинейным элементом (НЭ) [1, 2, 6, 7, 14]. В этом случае инерционная связь ПП характеризуется как S - и A -параметрами, зависящими от интенсивности воздействия и положения «рабочей» точки на вольт-амперной характеристике (ВАХ) негатрона, так и фазовой скоростью передачи сигналов и сопротивлением $Z_0 = 1/Y_0$ идеализированной двухпроводной длинной линии, используемыми при расчете прямоугольного и шарового волновода [11, 12]. На рис. 1–4 приведено семейство графических инвариантов макромоделей

одномерной нелинейной и электронной цепи, корректно описывающее способ соединения между собой и параметры пассивных и активных одно- и двухпортовых элементов при электрическом равновесии. Здесь амплитуды напряжения и тока в сечениях $x-x'$, $1-1'$, $2-2'$ схем замещения обозначены как $U_{mx}, U_{m1}, U_{m2}, I_{mx}, I_{m1}, I_{m2}$; $\gamma = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения сигнала в линии (α и β – коэффициенты затухания и фазы); ω – частота воздействия; Y_0, l – модуль волновой (эквивалентной) проводимости, рассчитываемый по мощности и напряжению [12, 13], и геометрическая длина отрезка моделирующей линии. Переменные $G_1, G_{H2}, G_{e2}(U_{m2}), G_2 = [G_{H2} - G_{e2}(U_{m2})]$ – частотно-независимые проводимости первичного источника E_1 , резистора нагрузки и негатрона [1–4, 6, 7] на «виртуальных» границах волнового канала. Они характеризуют сложение и вычитание первичного и вторичного воздействий, регенерацию и рекуперацию ЭМ-энергии в изучаемом фрагменте конструкции, образованной совокупностью кондуктивных и беспроводных соединений при изменении режима питания ПП.

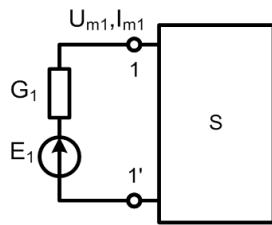


Рис. 2. Инвариант одностороннего четырехполюсника электронной цепи

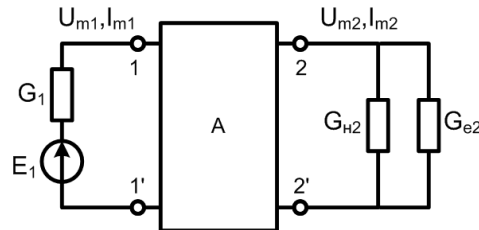


Рис. 3. Схема замещения одномерной электронной цепи в виде двухстороннего четырехполюсника

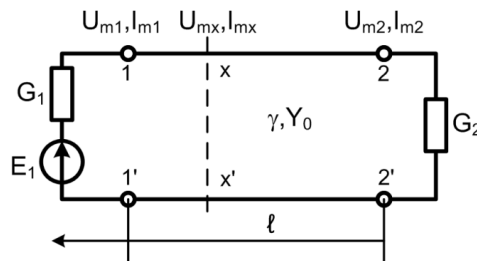


Рис. 4. Модель длинной линии с резистивно-негатронным элементом

Уточним, что термины “одномерная нелинейная электрическая и электронная цепи” являются синонимами в рамках современной теоретической электротехники. Однако первое понятие больше отвечает постулированию электронной цепи (electronic circuit) как электрической цепи, в элементах которой используется явление электрической проводимости в газах, в вакууме и в полупроводниках [23]. В то же время вторая формулировка электронной цепи соответствует другому известному ее определению как цепи, которая оснащена не менее чем одним электронным элементом или комплектующим. В свою очередь, электронный элемент и комплектующее (electronic component) – это часть, в которой проводимость обеспечивается в основном электронами, движущимися в вакууме, газе или полупроводнике [24, 25].

Проанализируем законы композиции гармонических сигналов в продольном сечении регулярной длинной линии, шунтированной резистивно-негатронным двухполосником в сечении 2-2' (рис. 4). Генератор ЭДС E_1 подключен к зажимам 1-1' схемы замещения и обеспечивает в нем амплитуды \dot{U}_{m1} , \dot{I}_{m1} напряжения и тока. Координата x измеряется в направлении источника первичного воздействия E_1 ; начало отсчета совпадает с клеммами НЭ. В месте подключения НЭ ток I_{m2} и напряжение U_{m2} в линии связаны граничным условием $I_{m2}(U_{m2})=U_{m2}[G_{н2}-G_{e2}(U_{m2})]$. Следовательно, на зажимах 2-2' исследуемой макромодели выполняются следующие импедансные условия: $G_{н2}>0$, $G_{e2}(U_{m2})<0$. Инварианты (рис. 2-4) необходимы на различных этапах корректного исследования в аналитическом виде амплитудной зависимости комплексных частотных характеристик (КЧХ) линии связи источника сигнала и сосредоточенного НЭ. Они адекватно учитывают инерционные и интерференционные процессы в одномерной электронной цепи.

Уравнения Гельмгольца [13], аналитически иллюстрирующие распространение фронта волн напряжения и тока в эквивалентной длинной линии с НЭ, записываются следующим образом:

$$\frac{d^2 \dot{U}_{mx} [\dot{U}_{m2} (\dot{U}_{m1})]}{dx^2} - \gamma^2 \dot{U}_{mx} [\dot{U}_{m2} (\dot{U}_{m1})] = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}_{mx} [\dot{U}_{m2} (\dot{U}_{m1})]}{dx^2} - \gamma^2 \dot{I}_{mx} [\dot{U}_{m2} (\dot{U}_{m1})] = 0. \quad (2)$$

Воспользуемся решением уравнений (1), (2) в виде стоячих волн для символьного анализа входной и передаточной КЧХ двухсторонней цепи с распределенными параметрами ($\alpha=0$) [1, 2]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mx} (U_{m2}) &= U_{m2} \cos \theta_x + j I_{m2}(U_{m2}) Z_0 \sin \theta_x = \\ &= U_{m2} [\cos \theta_x + j G_2(U_{m2}) Z_0 \sin \theta_x], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{mx} (U_{m2}) &= I_{m2}(U_{m2}) \cos \theta_x + j U_{m2} Y_0 \sin \theta_x = \\ &= U_{m2} [G_2(U_{m2}) \cos \theta_x + j Y_0 \sin \theta_x], \end{aligned} \quad (4)$$

поскольку переносимая колебательная мощность определяется через произведение переменного напряжения и тока. Здесь $\theta_x = \beta x$ – электрическая длина линии в точке наблюдения, имеющей координату x , а переменные U_{m2}, I_{m2} являются действительными числами. Внутренняя проводимость генератора ЭДС равна волновой проводимости $G_1 = Y_0 = 1/Z_0$ отрезка линии передачи. Поэтому дополнительное когерентное вторичное возмущение линии первичным источником сигнала отсутствует.

Результаты и обсуждения. Из формул (3), (4) следует, что амплитуду $\dot{U}_{mx} = \text{Re} \dot{U}_{mx} + j \text{Im} \dot{U}_{mx}$ можно рассматривать как сумму падений напряжений на активном и реактивном сосредоточенных элементах, последовательно включенных друг с другом между зажимами x - x' волновой ветви в однопортовой схеме замещения (см. рис. 2). В то же время зависимая переменная $\dot{I}_{mx} = \text{Re} \dot{I}_{mx} + j \text{Im} \dot{I}_{mx}$ соответствует результирующему току параллельного соединения двухполосников в узлах x - x' эквивалентного контура с НЭ. Слагаемые в соотношениях (3),(4) являются одновременно функциями нескольких параметров θ_x, U_{m2}, I_{m2} макромодели, синтезированной в рамках теории цепей Кирхгофа. Например, вариация активной проводимости G_2 меняет знак и величину реактивной компоненты \dot{U}_{mx} напряжения и действительной составляющей тока \dot{I}_{mx} . Резонансный режим одномерной электронной цепи наблюдается при выполнении равенств: $\sin \theta_x = 0$, $\theta_x = \pi n$

($n=1,2,3\dots$), характеризующих частоты и моды собственных колебаний поля и зарядов в ней. Таким образом, графические (рис. 1, 2) и аналитические операторы (3),(4) только совместно в символьно-знаковой и буквенно-цифровой форме иллюстрируют возможность целенаправленного управления равновесным электрическим состоянием цепи при регулировке параметров резистивно-негатронной модели НЭ в ходе суммирования и вычитания сигналов. Коэффициенты соотношений (3), (4) не являются произвольными постоянными и зависят друг от друга. Поэтому КЧХ идеализированных цепей, описываемые формулами (3), (4) в виде уравнения эллипса в комплексной форме при заданном типе нелинейности $I_{m2}=f(U_{m2})$, могут быть многозначными (т.е. иметь S и N -образные участки, гистерезисные петли) [10, 16–19]. Кроме того, из решений (3), (4) видно, что элементы S - и A -матриц эквивалентных четырехполюсников (рис. 2, 3) зависят от тока и напряжения I_{m2}, U_{m2} активного сосредоточенного НЭ, который играет роль вторичного когерентного источника сигнала. При этом искомая реакция многомодовой цепи с распределенными параметрами представляет результат нелинейной композиции волн, бегущих навстречу друг другу и в одном направлении вдоль или между, например, микрополосковых СВЧ-трактов и токонесущих проводников с ПП, преобразующими энергию источника питания (см. рис. 1). Вместе с тем явление дифракции приводит к тому, что результирующее ЭМ-колебание изменяет свою амплитуду и фазу от точки к точке в окружающей среде, что сопровождается перераспределением интенсивности сигналов в ней. Например, для случая проводимости $G_{н2}-G_{e2}(U_{m2})=0$ наблюдается максимум переменного электрического поля в конце регулярной соединительной линии, а при выполнении неравенства $G_{н2}-G_{e2}(U_{m2})\gg 0$ реализуется минимум напряжения на НЭ. Следовательно, входные и передаточные характеристики макромоделей трактов радиотехнических устройств (рис. 1–4) определяются наложением прямых и обратных волн напряжения и тока, а граничные условия – мощностью суммарного сигнала, свойствами волноведущего канала, типом источника воздействия и нагрузки.

При данных обстоятельствах изучаемая одномерная электронная цепь является необратимой, что не позволяет применить известную теорию многополюсников в сочетании с принципом суперпозиции и независимости действия при неоднозначном решении уравнений ее устойчивого многомодового состояния [10, 11, 15]. Топология идеализированных схем и вид КЧХ микрополосковой конструктивной единицы (рис. 1), степень и характер (положительный или отрицательный) кондуктивных и беспроводных связей в ней зависят от коллективного возмущения общего ЭМ-поля носителями заряда ЛПД. В то же время графические операторы (рис. 2, 3) в виде одностороннего и двухстороннего четырехполюсников не конкретизируют влияние интерференции и параметров (Y_0, β, l) линии связи в явном виде. Поэтому, с одной стороны, постоянные и пределы интегрирования при решении дифференциальных уравнений (1), (2) не могут выбираться в соответствии с современными методиками [16–21]. С другой стороны, замещение нагруженной регулярной линии (рис. 4) сосредоточенной цепью Кирхгофа (состоящей из элементарных конденсаторов, индуктивностей, сопротивлений, источников напряжения и тока), активных или пассивных двух и четырехполюсников в режиме стационарного равновесия не является однозначным [1, 2]. Регулировка амплитуды U_{m2} , проводимости $G_{н2}-G_{e2}(U_{m2})$ НЭ и размера θ_x линии меняет СВЧ-параметры и геометрию связей эквивалентной схемы фрагмента радиоэлектронного изделия в реальном масштабе времени. Поэтому необходимо разработать способ формализации составления операторов и методики алгоритмизации решения компонентных и топологических уравнений электронной цепи. Они позволят рассчитать законы управления его мгновенной реакцией с учетом осцилляции графиков КЧХ, вызванных композицией когерентных сигналов и перемещением «рабочей» точки по динамической ВАХ НЭ [22].

С точки зрения авторов, одномерная электронная цепь, в резистивно-негатронном элементе которой полностью пренебрегают явлениями запасания электрической или магнитной энергии, а в отрезке линии – диссипативными потерями и дисперсией, образует электрический «кластер». Он обладает одновременно волновыми и нелинейными, и, соответственно, амплитудно-зависимыми энергоемкими и невязными, диссипативными и активными свойствами, отсутствующими у составляющих элементов. Они появляются только в результате их объединения при совместном коррелированном взаимодействии первичного и вторичного источников ЭДС одного и разного типа. Поэтому совокупность операторов, представленную рис. 1–4 и формулами (1)–(4), можно рассматривать в рамках современной теории цепей с распределенными параметрами как самостоятельный инвариант в виде идеализированного волнового НЭ, моделирующего расположение упомянутого ранее ЛПД относительно максимума или минимума электрического поля в пространстве. По мнению авторов, аналитическое исследование многомодовой электронной цепи с учетом закономерностей изменения напряжения и тока в продольном сечении длинной линии должно предшествовать ее временному анализу численными машинными методами. Такой способ математического моделирования механизма волновых процессов в любой открытой конструкции изделия когерентной электроники дает возможность в гармоническом приближении рассчитать коэффициенты уравнений (3),(4), а не задавать нелинейные и когерентно взаимосвязанные условия в ПП. Например, для переменных $\theta_x = \pi l$, $x=l$, $I_{m2}(U_{m2}) = U_{m2} [G_{n2} - G_{e02}(1 + \nu U_{m2}^2)]$, где операторы G_{e02} , $\nu < 0$ – малосигнальная проводимость и параметр нелинейности негатрона [1–4, 6, 7], из формул (3), (4) и равенства нулю входной проводимости волнового НЭ получаем равенство: $\nu U_{m1}^2 = \nu U_{m2}^2 = 1 - G_{n2}/G_{e02}$. Установлено, что когда нормированная мощность поля $\nu U_{m1}^2 > 1 - G_{n2}/G_{e02}$, а проводимость $G_{n2} - G_{e02} < 0$, разность величин $G_{n2} - G_{e2}(U_{m2}) > 0$ и НЭ потребляет ЭМ-энергию. Однако при значениях интенсивности $\nu U_{m1}^2 < 1 - G_{n2}/G_{e02}$ сигнала возможно самовозбуждение одномерной цепи, так как проводимость электронной ветви $G_{n2} - G_{e2}(U_{m2}) < 0$. Следовательно, решение многопараметрической задачи анализа вышеупомянутого кластера в символьно-знаковой и буквенно-цифровой форме позволяет при изучении законов управления амплитудной динамикой коммутационных процессов на его «виртуальных» границах, адекватно формировать инварианты и верифицировать равновесные энергетические режимы микроволновых радиотехнических и сверхскоростных вычислительных устройств в частотной области.

Заключение. Таким образом, продемонстрирован алгоритм графоаналитического описания интеграции ПП, связанных отрезками кондуктивных и беспроводных длинных линий в единое целое. Синтезирована модель эквивалентного однородного тракта фрагмента радиотехнического устройства СВЧ в виде одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи, возбуждаемой первичным и вторичным источниками произвольного типа. Для методов анализа, ориентированных на применение электронных вычислительных машин, данная модель позволяет корректно устранить числовую неустойчивость расчета волновых и колебательных характеристик, граничных условий фрагмента цепи, обусловленную явлениями дифракции, композиции и интерференции, неоднозначностью «рабочей» точки на ВАХ резистивно-негатронного НЭ и недетерминированностью внутренних сопротивлений и ЭДС управляемых когерентных источников аналоговых и цифровых сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Методология математического моделирования нелинейных волновых и колебательных электрических процессов в изделиях когерентной радио-, микро- и наноэлектроники. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 110 с.
2. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Основы системного моделирования электрической структуры интеграции сверхбыстродействующих электронных приборов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 94 с.
3. *Волощенко П.Ю.* Анализ трансформации амплитуды волн нелинейным элементом, размещенным в длинной линии // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 3-5.
4. *Волощенко П.Ю.* Обращенный анализ электромагнитных процессов в длинной линии с активным нелинейным элементом // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 21-24.
5. *Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В.* Обратные задачи электротехники // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – 211 с.
6. *Волощенко Ю.П.* Алгоритмы анализа волновых процессов в длинной линии с активными нелинейными двухполюсниками: Автореф.: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05. – Новочеркасск, 2009. – 20 с. <http://elibrary.ru/item.asp?id=19204803>.
7. *Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П.* Моделирование электрического поля фрагмента сверхскоростной интегральной схемы // Нелинейный мир. – 2007. – № 10–11. – С. 689-696.
8. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники. – М.–Л.: Энергия, 1966. – Т. 1. – 522 с.; – Т. 2. – 408 с.
9. *Зернов Н.В., Карпов В.Г.* Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
10. *Попов В.П.* Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985. – 496 с.
11. *Никольский В.В.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978. – 544 с.
12. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ / под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
13. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.
14. *Басан С.Н.* Основные теоремы теории линейных схем замещения электрических и электронных цепей. – Таганрог: ТРТУ, 1994. – 109 с.
15. *Davis W. Alan.* Microwave semiconductor circuit design. – New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984. – 415 p.
16. *Андреев В.С.* Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
17. *Vendelin G.D., Pavidio A.M., Rohde U.L.* Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005. – 1058 p.
18. *Maas S.A.* Nonlinear Microwave and RF Circuits. – Norwood, MA: Artech House, 2003. – 582 p.
19. *Srivastava G.P., Gupta V.L.* Microwave devices and circuit design. – Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2006. – 480 p.
20. *Snowden C.M., Miles R.E.* Compound Semiconductor Device Modelling. – Berlin: Springer Science & Business Media, 1993. – 286 p.
21. *Kurokawa K.* An Introduction to the Theory of Microwave Circuits. – London: Academic Press, 1969. – 446 p.
22. *Pivnev V.V., Basan S.N., Voloshchenko Y.P.* The Application of Approximation Characteristics Non-Linear Resistor Implement the Required Current-Voltage Characteristics // Proceedings of International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), The proceedings series Advances in Engineering Research (AER) (ISSN 2352-5401) Amsterdam-Beijing-Paris: Atlantis Press, 2015. <http://dx.doi.org/10.2991/aeece-15.2015.2>.
23. *Alexander C., Sadiku M.* Fundamentals of Electric Circuits. – Columbus, OH: McGraw-Hill Science, 2008. – 935 p.
24. ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 34 с.
25. ГОСТ Р 52161.1-2004. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 96 с.
26. ГОСТ Р МЭК 60745-1-2005. Машины ручные электрические. Безопасность и методы испытаний. – М: Стандартинформ, 2006. – 89 с.

REFERENCES

1. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P.* Metodologiya matematicheskogo modelirovaniya nelineynykh volnovykh i kolebatel'nykh elektricheskikh protsessov v izdeliyakh kogerentnoy radio-, mikro- i nanoelektroniki [The methodology of mathematical modeling of nonlinear wave and oscillatory electrical processes in the coherent products of radio-, micro- and nanoelectronics]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 110 p.
2. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P.* Osnovy sistemnogo modelirovaniya elektricheskoy struktury integratsii sverkhbystrodeystvuyushchikh elektronnykh priborov [Basics of system modeling electrical structure of the integration ultrafast electronic devices]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2014, 94 p.
3. *Voloshchenko P.Yu.* Analiz transformatsii amplitudy voln nelineynym elementom, razmeshchennym v dlinnoy linii [The analysis of the transformation amplitude waves nonlinear element, aligned in a long line of], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2010, No. 4, pp. 3-5.
4. *Voloshchenko P.Yu.* Obrashchennyy analiz elektromagnitnykh protsessov v dlinnoy linii s aktivnym nelineynym elementom [The inverted analysis of electromagnetic processes in a long line with an active nonlinear element], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2010, No. 6, pp. 21-24.
5. *Bakhvalov Yu.A., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V.* Obratnye zadachi elektrotehniki [The inverse problem of electrical engineering], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2014, 211 p.
6. *Voloshchenko Yu.P.* Algoritmy analiza volnovykh protsessov v dlinnoy linii s aktivnymi nelineynymi dvukhpolyusnikami: avtoreferat: dis. ... kand. tekhn. nauk [Algorithms for the analysis of wave processes in long line with an active nonlinear two-terminal: abstract: Cand. of eng. sc. diss.] 05.09.05. Novocheerkassk, 2009, 20 p. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19204803>.
7. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P.* Modelirovanie elektricheskogo polya fragmenta sverkhskorostnoy integral'noy skhemy [Modeling of the electric field of the fragment ultrafast integrated circuits], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2007, No. 10–11, pp. 689-696.
8. *Neyman L.R., Demirchyan K.S.* Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow–Leningrad: Energiya, 1966, Vol. 1, 522 p.; Vol. 2, 408 p.
9. *Zernov N.V., Karpov V.G.* Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey [The theory of radio circuits]. Leningrad: Energiya, 1972, 816 p.
10. *Popov V.P.* Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of theory of circuits]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 496 p.
11. *Nikol'skiy V.V.* Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln [Electrodynamics and wave propagation]. Moscow: Nauka, 1978, 544 p.
12. *Lebedev I.V.* Tekhnika i pribory SVCh [Appliances and microwave devices], Ed. by N.D. Devyatkova. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 440 p.
13. *Baskakov S.I.* Radiotekhnicheskie tsepi s raspredelennymi parametrami [Radio technical chains with distributed parameters]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 152 p.
14. *Basan S.N.* Osnovnye teoremy teorii lineynykh skhem zameshcheniya elektricheskikh i elektronnykh tsepey [Basic theorems of the theory of linear electrical circuits and electronic circuits]. Taganrog: TRTU, 1994, 109 p.
15. *Davis W. Alan.* Microwave semiconductor circuit design. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984, 415 p.
16. *Andreev V.S.* Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [The theory of nonlinear electrical circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 280 p.
17. *Vendelin G.D., Pavid A.M., Rohde U.L.* Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005, 1058 p.
18. *Maas S.A.* Nonlinear Microwave and RF Circuits. Norwood, MA: Artech House, 2003, 582 p.
19. *Srivastava G.P., Gupta V.L.* Microwave devices and circuit design. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2006, 480 p.
20. *Snowden C.M., Miles R.E.* Compound Semiconductor Device Modelling. Berlin: Springer Science & Business Media, 1993, 286 p.
21. *Kurokawa K.* An Introduction to the Theory of Microwave Circuits. London: Academic Press, 1969, 446 p.

22. Pivnev V.V., Basan S.N., Voloshchenko Y.P. The Application of Approximation Characteristics Non-Linear Resistor Implement the Required Current-Voltage Characteristics, *Proceedings of International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), The proceedings series Advances in Engineering Research (AER) (ISSN 2352-5401) Amsterdam-Beijing-Paris: Atlantis Press, 2015*. Available at: <http://dx.doi.org/10.2991/aece-15.2015.2>.
23. Alexander C., Sadiku M. Fundamentals of Electric Circuits. Columbus, OH: McGraw-Hill Science, 2008, 935 p.
24. GOST 19880-74. Elektrotehnika. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya [State Standard 19880-74. Electrical engineering. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1974, 34 p.
25. GOST R 52161.1-2004. Bezopasnost' bytovykh i analogichnykh elektricheskikh priborov [State Standard R 52161.1-2004. Safety of household and similar electrical appliances]. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2004, 96 p.
26. GOST R MEK 60745-1-2005. Mashiny ruchnye elektricheskije. Bezopasnost' i metody ispytaniy [State Standard R MEK 60745-1-2005. Machines manual electric. Safety and test methods]. Moscow: Standartinform, 2006, 89 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Жорник.

Волощенко Петр Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: petrvoloshchenko@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371629; кафедра радиотехнической электроники; к.т.н.; доцент.

Волощенко Юрий Петрович – e-mail: yvoloshchenko@yandex.ru; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Мальков Станислав Борисович – e-mail: stiff@tgn.sfedu.ru; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Voloshchenko Peter Yurievich – Southern Federal University; e-mail: petrvoloshchenko@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371617; the department of radioengineering electronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Voloshchenko Yuri Petrovich – e-mail: yvoloshchenko@yandex.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Malkov Stanislav Borisovich – e-mail: stiff@tgn.sfedu.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.37; 575.3; 519-21.519-27

А.М. Макаров, А.С. Ермаков

ОПТИМАЛЬНЫЙ СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА НА ФОНЕ ШУМА С НЕИЗВЕСТНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИЕЙ

К настоящему времени одной из нерешенных задач теории обнаружения сигналов является задача синтеза оптимального обнаружения сигналов на фоне шумов с полностью неизвестной автокорреляционной функцией. Особенно актуально решение такой задачи для обнаружения сложных широкополосных сигналов. В работе предложен подход, основанный на синтезе согласованного фильтра в пространстве сигналов интегрального преобразования Меллина исходной аддитивной смеси сигнала и шума. Как показано авторами в предыдущей работе эта возможность появляется на основании того факта, что корреляционная функция случайных процессов после интегрального преобразования Меллина инвариантна к виду исходной автокорреляционной функции. Приведены основные математические соотношения, доказывающие свойство инвариантности и приводится основная