

8. Capmany J. and Novak D. Microwave photonics combines two worlds, *Nat. Photonics*, 2007, No. 1, pp. 319-330.
9. Yao J. Microwave photonics, *J. Lightwave Technol.*, 2009, Vol. 27, No. 3, pp. 314-335.
10. Uricketal V.J. Long-haul analog photonics, *J. Lightwave Technol.*, 2011, Vol. 29, No. 1, pp. 182.
11. C.H. Cox III and E.I. Ackerman. Recent advances in high-frequency (> 10 GHz) microwave photonic links, in *Optical Fiber Telecommunications VIB, I.P. Kaminow, T. Li and A.E. Willner, Eds., Academic Press, 2013*.
12. Manley J.M., Rowe H.E. Proc. Inst. Radio Eng. 44 (1956) 904.
13. Osadchiy E.N., Chervyakov G.G. Nizkochastotnyy shum v rezistivnykh smesitelyakh SVCh na getostrukturnykh NEMt–tranzistorakh [Low-frequency noise in resistive mixers microwave on geostructure NEMt–transistors] *Trudy NTK. Ch. 2. Nanotekhnologii 2010, 19-24 sent. 2010 – Divnomorskoe, Rossiya, 2010* [Proceedings of the STC. Part 2. Nanotechnology 2010, 19-24 Sept. 2010 – Divnomorskoe, Russia, 2010], pp. 127-129.
14. Marpaung D. et al. Integrated microwave photonics, *Laser Photonics Rev.*, 2013, No. 7, pp. 506.
15. Urick V.J., McKinney J.D. and Williams K.J. Fundamentals of Microwave Photonics, John Wiley & Sons (December 2014).
16. Belousov A.A., Vol'khin Yu.N., Dubrovskaya A.A. Obzor i issledovanie vozmozhnykh variantov realizatsii sverkhshirokopolosnykh detektorov, smesiteley i drugikh analogovykh protsessorov diapazona SVCh s ispol'zovaniem metodov i sredstv radiofotoniki [Survey and exploration of possible options for the implementation of UWB detectors, mixers, and other analog processors range microwave with use of methods and means of radio Photonics], *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem: materialy nauch.-tekh. konf.* [Exchange of experience in the field of ultra-wideband radio-electronic systems: materials of the scientific-technical conference]. Omsk: TsKBA, 2014, pp. 37-61.
17. Ma L., Ghelfi P., Yao M., Berizzi F., and Bogoni A. Demonstration of optical sample parallelisation for high speed photonic assisted ADCs, *Electron. Lett*, 2011, Vol. 47 (5), pp. 333-335.
18. Ghelfi P., Scotti F., Nguyen A.T., Serafino G., and Bogoni A. Ultra stable radar signal from a photonics-assisted transceiver based on single vode-lockinglaser, in *Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOTC'11), 2011*.
19. Doyle J.K., Heck M.J.R., Bovington J.T., Peters J.D., Coldren L.A., and J.E. Bowers. Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator, *Opt. Express.*, 2011, Vol. 19 (22), pp. 21595-21604.
20. Llorente R., Morant M., Amiot N., and Uguen B. Novel photonic analog-to-digital converter architecture for precise localization of ultra-wide band radio transmitters, *IEEE J.Sel.Areas Comm.*, 2011, No. 29 (6), pp. 1321-1327.

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

Червяков Георгий Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: gchervyakov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: 88634371629; кафедра радиотехнической электроники; д.т.н.; профессор.

Chervyakov George Georgievich – Southern Federal University; e-mail: gchervyakov@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371629; the department of electronic devices; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.372.064

П.Ю. Волощенко, Ю.П. Волощенко

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМИРУЮЩИХ СВОЙСТВ СВЧ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КОГЕРЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Известно, что гибридные и монокристалльные интегральные схемы (ИС) гига- и терагерцевых диапазонов следует разрабатывать на основе макромоделей единичного объема композиционного материала. Электрическая структура циркуляции тока проводимости и смещения внутри и снаружи него формируется открытой совокупностью проводников, диэлектрических и полупроводниковых областей вакуумных и полупроводниковых микровол-

новых электронных приборов (ЭП), когерентно функционирующих в общем электромагнитном (ЭМ) поле. Для синтеза графоаналитических операторов ее математической модели используется теория одномерной нелинейной электрической цепи и электронной волновой цепи (ЭВЦ). Решение задачи минимизации энергопотребления и нагрева такого искусственного материала реализуется путем оптимизации положительных и отрицательных связей ЭП СВЧ на основе технологии когерентной микро-, нано- и радиоэлектроники и возможностей реального производства аналоговой и цифровой аппаратуры в России. Изучение амплитудной динамики инерционных электронных процессов для случая прохождения и наложения сигналов в структуре проводится методами эквивалентных схем, комплексных амплитуд и гармонической линеаризации. Приоритетной задачей исследования материала СВЧ является обязательное установление корректности графоаналитических операторов макромоделей с учетом амплитуды сигналов и электрического равновесия, описываемого законами Кирхгофа, теоремой Телледжена и условиями Пирса–Котельникова. Найдены импедансные условия на «виртуальных» границах ЭВЦ, при которых рост тока сопровождается уменьшением напряжения или они варьируются синхронно в ветвях микроволновой структуры. Показано, что отраженные ЭМ-волны могут иметь интенсивность, превышающую исходное воздействие, что обуславливает возможность самовозбуждения сверхскоростных ИС различного назначения.

Длинная линия; волновой нелинейный элемент; резистивно-негатронный двухполюсник; теория электронной цепи с распределенными параметрами

P.Yu. Voloshchenko, Yu.P. Voloshchenko

THE ANALYSIS OF TRANSFORMING PROPERTIES OF MICROWAVE STRUCTURE IN COHERENT ELECTRONICS COMPOSITE MATERIAL

It is known that hybrid and monolithic integrated circuits for gigahertz and terahertz wave ranges should be developed on the basis of macromodel presenting composite material as a single volume. The electric structure of conductivity and induction current circulation outside and inside it is formed by open array of conductors, dielectric and semi-isolating areas of tube and semiconductor microwave electronic devices which are coherently functioning in common electromagnetic field. The theory of a one-dimensional nonlinear electric circuit and electronic wave chain is used to synthesize the graphic-analytical operators for its mathematical model. The solution to the energy consumption minimization and heating problem of such artificial material is to optimize positive and negative connections of microwave electronic devices on the basis of coherent micro-, nano-, radioelectronics technology and analog and digital equipment producibility in Russia. The methods of equivalent circuit, complex amplitude and harmonic linearization are used to study amplitude dynamics of inertial electronic processes in case of signal overlapping and transmission in structure. Priority task of microwave material researching is obligatory correctness verification of macromodel graphic-analytical operators with regard to signal amplitude and electrical balance stated by Kirchhoff's laws, Telledzen's theorem and Pierce-Kotelnikov's conditions. On "virtual" borders of electronic wave circuit the impedance conditions are found under which the current growth is followed by voltage reducing and it varies synchronously in branches of microelectronic structure. It is shown that the reflected electromagnetic waves can have the intensity exceeding initial impact which creates the possibility for self-excitation of superfast integrated circuits for different applications.

Long line; wave nonlinear element; resistance-negatron two-terminal network; theory of distributed parameter electronic circuit.

Введение. Известно, что гибридные и монолитные интегральные схемы (ИС) гига- и терагерцевого диапазонов следует разрабатывать на основе макромоделей единичного объема композиционного материала, исходя из существующего конструктивно-технологического исполнения и возможности их производства в России [1, 2]. Электрическая структура циркуляции конвекционного и наведенного тока внутри и снаружи него формируется открытой совокупностью проводников, диэлектрических и полупроводниковых областей вакуумных и полупроводниковых микроволновых электронных приборов (ЭП), когерентно функционирующих в

общем электромагнитном (ЭМ) поле [3, 4]. При синтезе графоаналитических операторов математической модели структуры материала СВЧ используется теория электронной волновой цепи (ЭВЦ) [3–6]. Решение задачи минимизации энергопотребления и нагрева таких сверхскоростных ИС реализуется путем оптимизации параметров положительных и отрицательных связей ЭП на основе технологии когерентной микро-, нано- и радиоэлектроники. Наряду с этим коррелированное изменение импедансных свойств активных и пассивных электронных компонентов, расположенных на «виртуальных» границах «электрически негерметичной» конструкции ИС, происходит под воздействием единого постоянного и переменного электрического поля. Поэтому при символьном анализе инерционных процессов в разных точках схем замещения структуры искусственного материала существует проблема замены генераторов СВЧ-поля одного типа – другим, так как источники возмущения в ЭВЦ имеют неизвестные ЭДС и амплитудно-зависимое конечное внутреннее сопротивление. Кроме того ее нелинейные элементы (НЭ) могут обладать S и N, гистерезисными и другими видами вольтамперными характеристиками (ВАХ) [7–9].

Вместе с тем в современной электро- и радиотехнике расчет КПД любой идеализированной многоконтурной цепи рекомендуется проводить без рассмотрения уравнений электрического состояния каждого из них путем непосредственной модификации заданной топологии по определенным правилам [10–24]. Считается, что аналитические операторы энергетического равновесия разветвленной цепи следует составлять для ее обобщенной схемы замещения, которая должна иметь «простой» вид [13]. В то же время известный способ преобразования электрических чертежей, иллюстрирующих направления ЭДС, кондуктивные и беспроводные участки передачи сигналов и т.п., в классической теории цепей справедлив, если через все активные, пассивные и реактивные элементы протекает один и тот же ток или они находятся под одним и тем же напряжением. Однако при изучении когерентного множества зависимых управляемых источников и приемников колебательной энергии, обладающих квантованной коллективной реакцией на изменение интенсивности воздействия ЭМ-волн, эти условия не выполняются. Более того, перманентно варьируются свойства и условное графическое изображение макромодели структуры материала – схема цепи ИС, что затрудняет формулировку принципов «согласования» ее активных и пассивных участков, позволяющих оптимизировать величину отдаваемой колебательной мощности и энергии постоянного тока, расходуемой в цепи питания ЭП.

Трансформация топологии ЭВЦ основана на равносильных преобразованиях систем уравнений электрического равновесия, аналитически описывающих взаимодействующие электронные компоненты СВЧ. Поэтому предварительно следует исследовать амплитудную динамику НЭ в случае совместного прохождения и наложения сигналов методами эквивалентных схем и комплексных амплитуд [11–13]. Затем найти импедансные условия, при которых рост тока сопровождается уменьшением падения напряжения в ее ветвях или они варьируются синхронно. Такой порядок анализа контуров и методика синтеза операторов макромоделей открытой интеграции микроламп, транзисторов и диодов с отрицательным сопротивлением позволяют прогнозировать ее КПД независимо от принципа действия и устройства, напряжения и тока питания, результатов композиции воздействия и откликов, оптимизировать преобразование и транспортировку ЭМ-энергии по гальваническим и беспроводным соединениям в ней.

Описание модели. Для корректного определения входных и передаточных характеристик ЭП, прямых и обратных связей первичного и вторичного источников сигнала, графических и аналитических операторов в ЭВЦ изучим импедансные условия эквивалентности ее схем замещения с сосредоточенными и распреде-

ленными нелинейными параметрами. Комплексные схемы замещения циркуляции обобщенного и полного тока в единичном объеме искусственного СВЧ-материала в ЭМ-поле показаны на рис. 1, 2, а, б. Графические инварианты идеализированно отображают беспроводные и гальванические связи ЭП электрической структуры в виде символично-знакового семейства сосредоточенного и волнового НЭ (ВНЭ), используемого в теории ЭВЦ. Рис. 1 иллюстрирует топологию одномерной ЭВЦ, шунтированной на одном конце пассивным двухполюсником. Он характеризуется амплитудно-зависимым СВЧ-импедансом $Y_2(U_2, I_2)$ или $Z_2(U_2, I_2)$, связанным между собой следующим образом: $Y_2(U_2, I_2) = 1/Z_2(U_2, I_2) = \{[G_{н2} - G_{e2}(U_2)] + j B_2\} = 1/\{[R_{н2} - R_{e2}(U_2)] + jX_2\}$. На другом конце она возбуждается идеальным генератором мощности [14–16]. Такой активный элемент отражает преобразование энергии источника питания ЭП в ЭМ-колебания гига- и терагерцевого диапазонов и не имеет направления по определению. Его внутреннее сопротивление (или проводимость) равно волновому сопротивлению (либо проводимости) $Z_0 = 1/Y_0$ соединительного отрезка линии без потерь [14]. Обозначениям l, θ, β, ω соответствуют геометрическая и электрическая длина ВНЭ, волновое число и частота переменного тока и напряжения в нем, U_1, U_2, I_1, I_2 – комплексные амплитуды напряжения и тока в сечениях 1-1', 2-2' схемы замещения при воздействии разных типов источников ЭДС (рис. 1).

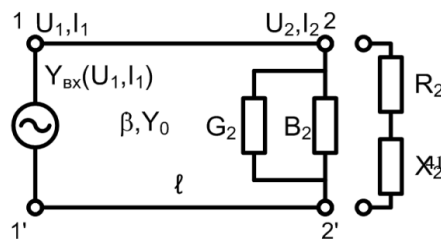


Рис. 1. Комплексная схема замещения ВНЭ

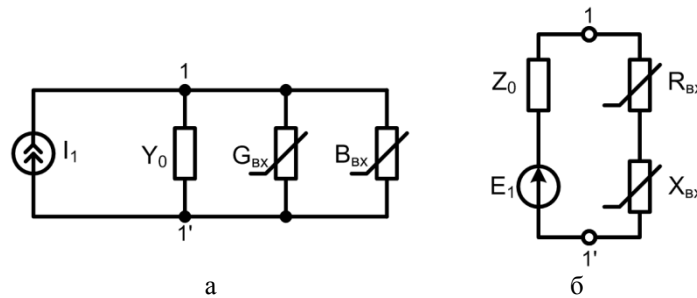


Рис. 2. Сосредоточенная макро модель ВНЭ

ВНЭ имеет большое число амплитудно-зависимых резонансов токов и напряжений на собственных частотах $\omega_{01}(U_1, U_2, I_1, I_2)$, $\omega_{02}(U_1, U_2, I_1, I_2)$ и т.д. до бесконечности. Однако они зависят от явлений дифракции и интерференции ЭМ-волн вдоль ЭВЦ, в отличие от известных длинных линий, нагруженных на комплексное сопротивление, характеризуемое законом Ома [11–13]. Поэтому в качестве макромоделей подобных изделий электронной техники в дальнейшем будем использовать одновременно параллельное включение проводимостей $Y_{вх} = G_{вх}(U_1, U_2, I_1, I_2) + jB_{вх}(U_1, U_2, I_1, I_2)$ и последовательное соединение сопротивлений $Z_{вх} = 1/Y_{вх} = R_{вх}(U_1, U_2, I_1, I_2) + jX_{вх}(U_1, U_2, I_1, I_2)$ сосредоточенных схем ВНЭ, изображенных на рис. 2, а, б. На них воздействует управляемый источник напряжения E_1 или тока I_1 ,

имеющие гармонические ЭДС, зависящие от композиции первичного и вторичного воздействия в линии. При этом одной из приоритетных задач символического анализа электрической структуры искусственного СВЧ-материала является обязательное установление корректности и эквивалентности параметров ее графоаналитических операторов с учетом когерентности СВЧ сигналов при электрическом равновесии, описываемом законами Кирхгофа и неравенствами Пирса–Котельникова. В начале аналитического изучения перераспределения тока и напряжения на входе ВНЭ (рис. 1) и сосредоточенных элементов (рис. 2,а,б) используем алгебраическую и тригонометрическую, а также показательную форму записи операторов ЭВЦ. Тогда для расчета интенсивности ЭМ-колебаний вдоль длинной соединительной ветви, управляющей величиной проводимости $y_2(U_2) = Y_2(U_2)/Y_0 = g_2(U_2) + jb_2(U_2)$ или сопротивления $z_2(I_2) = Z_2(I_2)/Z_0 = r_2(I_2) + jx_2(I_2)$ нагрузки, используем уравнения однородной эквивалентной линии передачи теории ЭВЦ [3, 4]:

$$U_1(U_2, I_2) = \operatorname{Re} U_1(U_2, I_2) + j \operatorname{Im} U_1(U_2, I_2) = |U_1(U_2, I_2)| \exp(j\varphi_A(U_2, I_2)) = U_2(I_2) \cos \theta + j I_2(U_2) Z_0 \sin \theta, \quad (1)$$

$$I_1(U_2, I_2) = \operatorname{Re} I_1(U_2, I_2) + j \operatorname{Im} I_1(U_2, I_2) = |I_1(U_2, I_2)| \exp(j\varphi_I(U_2, I_2)) = I_2(U_2) \cos \theta + j U_2(I_2) Y_0 \sin \theta, \quad (2)$$

где $|U_1(U_2, I_2)| = U_1(U_2, I_2)$, $|I_1(U_2, I_2)| = I_1(U_2, I_2)$, $\varphi_U(U_2, I_2)$, $\varphi_I(U_2, I_2)$ – модуль и аргумент комплексной амплитуды напряжения и тока в сечении 1-1' при фиксированной ω частоте. Формулы (1), (2), записанные в виде стоячих волн, аналитически описывают процесс интерференции. Они демонстрируют перемещение огибающей мгновенного тока и напряжения вдоль макромодели двухпроводной линии с произвольной нагрузкой и соответствуют компонентным уравнениям ЭВЦ.

Результаты и обсуждения. Инвариантные графические (рис. 1), (рис. 2,а,б) и аналитические операторы (1), (2) отображают нелинейное преобразование выходного и входного напряжений и тока $U_2 = \operatorname{Re} U_2 + j \operatorname{Im} U_2$, $I_1 = \operatorname{Re} I_1 + j \operatorname{Im} I_1$, $I_2 = \operatorname{Re} I_2 + j \operatorname{Im} I_2$, $I_1 = \operatorname{Re} I_1 + j \operatorname{Im} I_1$ ВНЭ на комплексной плоскости. Функции передачи и трансформации $U_1[U_2(I_2)]$, $I_1[I_2(U_2)]$ макромодели ЭВЦ по напряжению и току от зажимов 1-1' к полюсам 2-2' и в обратном направлении $U_2(U_1)$, $I_2(I_1)$ определяются отношением волнового сопротивления (проводимости) линии и импеданса сосредоточенного НЭ. При реактивных составляющих тока и напряжения, равных нулю в формулах (1)–(2), наблюдается резонанс ЭВЦ, зависящий от инерционного отклика смежных НЭ [3–8]. Для модификации ЭВЦ с энергетической точки зрения необходимо знать корреляцию этих величин в разных точках линии l с НЭ и диапазонах частот ω воздействия. Знаки вещественной и мнимой части U_1, I_1, U_2, I_2 свидетельствуют о том, в каком квадранте комплексной плоскости лежит изображающий эти параметры амплитудно-зависимый вектор, что позволяет судить о начальной фазе переменного тока и напряжения [12–16]. Кроме того, ее характеристики определяются результатами композиции ЭДС разнотипных управляемых генераторов сигналов, которые в свою очередь зависят от реакции ее смежных участков. Поэтому в дальнейшем символическом анализе ЭВЦ вместо них необходимо использовать сосредоточенную резистивно–негатронную макромодель НЭ без конкретизации его колебательной и внешней характеристики, внутреннего сопротивления и положения «рабочей» точки, потребляемой энергии источника питания и отдаваемой колебательной мощности. Она в самом общем импедансном виде моделирует источники мощности, напряжения и тока в комплексных схемах замещения ВНЭ. При этом одновременно требуется оценка условий самовозбуждения и устойчивости многомодовых нелинейных колебаний СВЧ. Следовательно, выражения (1), (2) можно рассматривать как сумму или разность напряжений и токов резистивного,

негатронного и энергоемкого элементов цепи Кирхгофа параллельной и последовательной схем замещения (рис. 2,а,б), к клеммам 1-1' которых подключены управляемые источники гармонического сигнала. В них идеализированные двухполюсные R-,G-,L-,C-элементы представлены комплексными проводимостями и сопротивлениями. При регулировке ЭДС первичного и вторичного источников разного типа эти операторы будут иметь активные (резистивные I_R, U_R и негатронные I_{Ge}, U_{Ge}) и реактивные (индуктивные I_L, U_L или емкостные I_C, U_C) характеристики. Они зависят от параметров $Y_2(U_2, I_2) = 1/Z_2(U_2, I_2)$ сосредоточенного НЭ, размещенного в правом конце линии (рис.1). Комплексы импеданса $Z_1(U_2, I_2) = 1/Y_1(U_2, I_2)$ в сечении 1-1' схемы связаны между собой следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_1(U_2, I_2) &= \{ R_1(U_2, I_2) + j[\omega L_1(U_2, I_2) - 1/\omega C_1(U_2, I_2)] \} = \\ &= \{ R_1(U_2, I_2) + j[X_{L1}(U_2, I_2) - X_{C1}(U_2, I_2)] \}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_1(U_2, I_2) &= \{ G_1(U_2, I_2) + j[\omega C_1(U_2, I_2) - 1/\omega L_1(U_2, I_2)] \} = \\ &= \{ G_1(U_2, I_2) + j[B_{C1}(U_2, I_2) - B_{L1}(U_2, I_2)] \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отметим, что подобный способ моделирования электрической структуры СВЧ-материала в ЭМ-поле обусловлен не «соображениями удобства расчетов и целесообразности» представления ВНЭ в виде эквивалентного колебательного контура с сосредоточенными постоянными [15]. Его необходимость определяется применением уравнений баланса токов и напряжений в теории ЭВЦ с учетом явлений дифракции и интерференции, условий устойчивости Пирса–Котельникова при наложении первичного и нескольких вторичных воздействий в ИС. Использование способа макро моделирования структуры материала СВЧ с помощью двух типов сосредоточенных резонансных цепей, источников колебательной мощности в элементном базисе Кирхгофа является его особенностью. Дело в том, что инварианты (рис. 2,а,б) не определяются размерами соединений и ЭП. Поэтому они позволяют изучать переходные и стационарные процессы сверхскоростных ИС при отсутствии исходных данных об импедансных условиях в них.

Тогда для параллельной сосредоточенной макро модели ВНЭ, соответствующей его входу (рис. 2,а) при воздействии источника напряжения, имеем

$$\begin{aligned} U_1(U_2) = U_G(U_2) = U_{L1}(U_2) = U_{C1}(U_2) = I_1(U_2) / \{ G_1(U_2) + j[\omega C_1(U_2) - 1/\omega L_1(U_2)] \} = \\ = U_2 \{ [\cos\theta - b_2(U_2)\sin\theta] + j[g_{n2} - g_{e2}(U_2)]\sin\theta \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_1(U_2) = I_{G1}(U_2) + I_{L1}(U_2) + I_{C1}(U_2) = U_1(U_2) \{ G_1(U_2) + j[\omega C_1(U_2) - 1/\omega L_1(U_2)] \} = \\ = U_2 Y_0 \{ [g_{n2} - g_{e2}(U_2)]\cos\theta + j[\sin\theta + b_2(U_2)\cos\theta] \}, \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ выражений (5), (6) показывает, что характер и величина тока и напряжения параллельной RGLC макро модели ВНЭ определяются амплитудно-зависимыми величинами $[g_{n2} - g_{e2}(U_2)]\sin\theta$ и $[\cos\theta - b_2(U_2)\sin\theta]$, $[g_{n2} - g_{e2}(U_2)]\cos\theta$ и $[\sin\theta + b_2(U_2)\cos\theta]$. Здесь нормированные переменные $g_2 = G_2(U_2)/Y_0 = g_{n2} - g_{e2}(U_2)$ и $r_2 = R_2(U_2)/Z_0 = r_{n2} - r_{e2}(U_2)$, $b_2 = B_2(U_2)/Y_0$, $x_2 = X_2(U_2)/Y_0$ характеризуют суммарный импеданс сосредоточенного НЭ в волновом масштабе. Они соответствуют его проводимости $G_2(U_2)$ и сопротивлению $R_2(U_2)$, емкости $B_{C2}(U_2) = \omega C_2(U_2)$, индуктивности $B_{L2}(U_2) = -1/\omega L_2(U_2)$, зависящих от вариации частоты и амплитуды колебаний.

При последовательном включении эквивалентных RGLC-элементов Кирхгофа в идеализированной цепи (рис. 2,б), возбуждаемой источником тока, получим

$$\begin{aligned} U_1(I_2) = U_{R1}(I_2) + U_{L1}(I_2) + U_{C1}(I_2) = I_1(I_2) \{ R(I_1) + j[\omega L(I_1) - 1/\omega C(I_1)] \} = \\ = I_2 Z_0 \{ [r_{n2} - r_{e2}(I_2)]\cos\theta + j[\sin\theta + x_2(I_2)\cos\theta] \}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_1(I_2) = I_{R1}(I_2) = I_{L1}(I_2) = I_{C1}(I_2) = U_1(I_2) / \{ R(I_2) + j[\omega L(I_2) - 1/\omega C(I_2)] \} = \\ = I_2 \{ [\cos\theta - x_2(I_2)\sin\theta] + j[r_{n2} - r_{e2}(I_2)]\sin\theta \}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из формул (7), (8) видно, что ток и напряжение в ней зависят от нормированных составляющих $[r_{n2}-r_{e2}(I_2)]\sin\theta$ и $[\cos\theta-x_2(I_2)\sin\theta]$, $[r_{n2}-r_{e2}(I_2)]\cos\theta$ и $[\sin\theta+x_2(I_2)\cos\theta]$, эквивалентных сопротивлению резистивно-негатронного $R_2(I_2)$ и энергоемких $X_{C2}(I_2)=-1/\omega C_2(I_2)$, $X_{L2}(I_2)=\omega L_2(I_2)$ элементов. Влияние сосредоточенной реактивности $x_2(I_2)$ НЭ сказывается одновременно на вещественной $\text{Re}U_1(I_2)$, $\text{Re}I_1(I_2)$ и мнимой $\text{Im}U_1(I_2)$, $\text{Im}I_1(I_2)$ компоненте комплексного напряжения и тока. Операторы $g_{n2} - g_{e2}(U_2)$ и $r_{n2} - r_{e2}(I_2)$, иллюстрирующие регенеративные свойства ВНЭ, также взаимосвязанно варьируют слагаемые $\text{Im}U_1(I_2)$, $\text{Re}I_1(I_2)$, $\text{Re}U_1(I_2)$, $\text{Im}I_1(I_2)$ в суммах (5)–(8). Когда величина переменных $b_2(U_2)=0$, $x_2(I_2)=0$, а разность $g_{n2}-g_{e2}(U_2)$ и $r_{n2}-r_{e2}(I_2)$ равна единице, в ЭВЦ реализуется режим бегущей волны. При импедансных условиях $g_{n2} - g_{e02} < 0$ и $r_{n2} - r_{e02} < 0$ амплитуда сигналов, отраженных резистивно-негатронным двухполюсником, может быть больше амплитуды первичного воздействия и в общем случае существует вероятность самовозбуждения ЭМ-колебаний в ВНЭ. Поэтому в нем наблюдается одновременное и коррелированное увеличение интенсивности волн напряжения и тока в линии за счет взаимодействия единого суммарного электрического поля и свободных зарядов в ЭП управляемого вторичного генератора ЭДС, имеющего внутреннюю проводимость $[g_{n2} - g_{e2}(U_2)]$. Отметим, что вышеупомянутые режимы невозможны в известных трансформаторах уровня СВЧ-сигналов без ЭП [15, 16, 20–24].

Выражения (1)–(8) только совместно в общем неявном виде и без утраты какой-либо информации о воздействии разных типов источников – мощности, напряжения или тока и реакции НЭ определяют амплитудную функцию электрических гармонических колебаний U_2, I_2 в сечении 2-2' невзаимной цепи, «рабочую» точку на ВАХ ВНЭ. Они инвариантно описывают законы синхронного амплитудно-зависимого перераспределения токов в ветвях параллельной и напряжений на двух участках последовательной одноконтурной эквивалентной схемы ВНЭ, одновременно задаваемые электрической длиной θ в волновом масштабе.

Однако на основе топологических уравнений ВНЭ, составленных с помощью законов Кирхгофа и компонентных уравнений (1)–(8) ЭВЦ, на этом этапе теоретического исследования нельзя рассчитать «рабочую» точку НЭ и оценить импедансные условия, обеспечивающие ее электрическое равновесие. Дело в том, что в ней первоначально неизвестна зависимость интенсивности первичного воздействия и ограничение амплитуды оклика сосредоточенным НЭ. Они не определяют в аналитическом виде законы управления трансформации входных и выходных сигналов линией передачи между зависимым источником тока либо напряжения и нелинейной нагрузкой. Поэтому дополнительно следует использовать теорему Телледжена [17], описывающую баланс мощностей или комплексных проводимостей и сопротивлений в ЭВЦ, аппроксимации $G_{e2}(U_2)=G_{e02}(1-v_U U_2^2)$, $R_{e2}(I_2)=R_{e02}(1-v_I I_2^2)$. Здесь буквами v_U и v_I обозначены коэффициенты нелинейности, а символами G_{e02} , R_{e02} – малосигнальные параметры НЭ, соответствующие методу гармонической линеаризации [19]. Например, из нее следует, что разность величин $g_{n2}-g_{e2}(U_2)$, $r_{n2}-r_{e2}(I_2)$ резистивно-негатронного двухполюсника может быть только больше нуля [1–8].

На рис. 3,а,б приведены кривые перераспределения составляющих комплексного напряжения U_1 ВНЭ при регулировке интенсивности $y=v_U U_1^2$ воздействия для случая переменных $g_{n2}=2$, $g_{e02}=1,5$, b_2 и $x_2=0$. Они получены при перемещении точки θ наблюдения в линии, замкнутой на активное нелинейное сопротивление, по направлению к источнику мощности СВЧ (рис.1) и демонстрируют управление ее трансформирующими свойствами с помощью резистивно-негатронного НЭ. Графики построены в соответствии с методикой расчета электрической структуры искусственного материала СВЧ, приведенной в [1–4]. Вариация вещественной и

мнимой компонент комплексного напряжения U_1 характеризует изменение свойств резистора и негatrona, емкости и индуктивности, вида ВАХ и колебательной характеристики ВНЭ, а соответственно, внешней характеристики и типа условного изображения генераторов сигналов на электрических чертежах ИС. Следует отметить, что энергетические расчеты ЭВЦ, основанные непосредственно на соотношениях (1) и (2), являются единственно верными. Дело в том, что, например, использование оператора добротности сосредоточенного колебательного контура (рис. 2,а,б), который определяется исходя из произвольного выбора типа активных элементов, как показано в [12], может привести к ошибочным результатам.

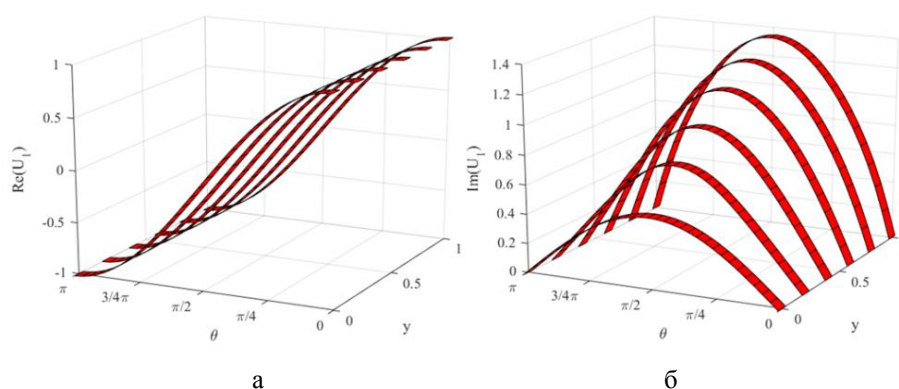


Рис. 3. Распределение составляющих комплексного напряжения

Таким образом, сформирован наглядный вид инвариантных графических и аналитических операторов ЭВЦ, совместно обеспечивающих символичный анализ энергоэффективности структуры композиционного материала СВЧ. Получены последовательная и параллельная обобщенные схемы замещения ее одномерной электронной цепи постоянного или переменного тока. В свою очередь такие макромоделли обуславливают адекватность использования теоремы Телледжена, первого и второго законов Кирхгофа, на базе которых исследуется композиция воздействий и откликов активных и пассивных участков как суммы или разности напряжений и токов ВНЭ. Продемонстрирована возможность управления импедансными свойствами ветвей структуры и ее равновесным электрическим состоянием с помощью резистивно-негатронной модели НЭ путем совместной регулировки длины соединений и частоты воздействия, интенсивности сигналов и режима питания ЭП. Полученные результаты необходимы при технической реализации ЭВЦ и конструктивного синтеза гига- и терагерцовых ИС по технологии когерентной электроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Vavilov V.G., Chernobrovny V.S.* Symbolic analysis of electric structure of material for analog and digital coherent electronics products // Abstracts and Schedule of the 2015 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2015). Azov, Russia, May 19–22, 2015 Southern Federal University Press: Rostov-on-Don, 2015. – P. 259-260.
2. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Vavilov V.G., Zaycev A.I.* Mathematical modeling of electromagnetic wave processes in materials of high-speed integrated circuits // Abstracts and Schedule of the 2015 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2015). Azov, Russia, May 19–22, 2015 Southern Federal University Press: Rostov-on-Don, 2015. – P. 260-261.

3. 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.
4. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Основы системного моделирования электрической структуры интеграции сверхбыстродействующих электронных приборов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 94 с.
5. Волощенко П.Ю. Анализ трансформации амплитуды волн нелинейным элементом, размещенным в длинной линии // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 3-5.
6. Волощенко П.Ю. Обращенный анализ электромагнитных процессов в длинной линии с активным нелинейным элементом // Известия вузов. Электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 21-24.
7. Волощенко Ю.П. Алгоритмы анализа волновых процессов в длинной линии с активными нелинейными двухполосниками: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 05.09.05. – Новочеркасск, 2009. – 20 с. <http://elibrary.ru/item.asp?id=19204803>.
8. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование электрического поля фрагмента сверхскоростной интегральной схемы // Нелинейный мир. – 2007. – № 10–11. – С. 689-696.
9. 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>.
10. Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Обратные задачи электротехники // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – 211 с.
11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. – М.–Л.: Энергия, 1966. – Т. 1. – 522 с., Т. 2. – 408 с.
12. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
13. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985. – 496 с.
14. Ортюзи Ж. Теория электронных цепей. Т. 1. Анализ. – М.: Мир, 1970. – 408 с.
15. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
16. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.
17. Басан С.Н. Основные теоремы теории линейных схем замещения электрических и электронных цепей. – Таганрог: ТРТУ, 1994. – 109 с.
18. Davis W. Alan. Microwave semiconductor circuit design. – New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984. – 415 p.
19. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
20. 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.
21. Maas S.A. Nonlinear Microwave and RF Circuits. – Norwood, MA: Artech House, 2003. – 582 p.
22. Srivastava G.P., Gupta V.L. Microwave devices and circuit design. – Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2006. – 480 p.
23. Snowden C.M., Miles R.E. Compound Semiconductor Device Modelling. – Berlin: Springer Science & Business Media, 1993. – 286p.
24. Kurokawa K. An Introduction to the Theory of Microwave Circuits. – London: Academic Press, 1969. – 446 p.

REFERENCES

1. Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Vavilov V.G., Chernobrovny V.S. Symbolic analysis of electric structure of material for analog and digital coherent electronics products, *Abstracts and Schedule of the 2015 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2015)*. Azov, Russia, May 19–22, 2015 Southern Federal University Press: Rostov-on-Don, 2015, pp. 259-260.

2. *Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Vavilov V.G., Zaycev A.I.* Mathematical modeling of electromagnetic wave processes in materials of high-speed integrated circuits, *Abstracts and Schedule of the 2015 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2015). Azov, Russia, May 19–22, 2015 Southern Federal University Press: Rostov-on-Don, 2015*, pp. 260-261.
3. *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.
4. *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.
5. *Voloshchenko P.Yu.* Analiz transformatsii amplitudy voln nelineynym elementom, razmeshchennym v dlinnoy linii [The analysis of the transformation amplitude waves nonlinear element, placed in a long line], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2010, No. 4, pp. 3-5.
6. *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.
7. *Voloshchenko Yu.P.* Algoritmy analiza volnovykh protsessov v dlinnoy linii s aktivnymi nelineynymi dvukhpolyusnikami: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Algorithms for the analysis of wave processes in long line with an active nonlinear two-terminal: autho. Cand. of eng. sc. diss. 05.09.05. Novochoerkassk, 2009. 20 p. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=19204803>.
8. *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.
9. *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>.
10. *Bakhvalov Yu.A., Gorbatenko N.I., Grechikhin V.V.* Obratnye zadachi elektrotekhniki [The inverse problem of electrical engineering], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2014, 211 p.
11. *Neyman L.R., Demirchyan K.S.* Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow–Leningrad: Energiya, 1966, Vol. 1, 522 p., Vol. 2, 408 p.
12. *Zernov N.V., Karpov V.G.* Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey [The theory of radio circuits]. Leningrad: Energiya, 1972, 816 p.
13. *Popov V.P.* Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of theory of circuits]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 496 p.
14. *Ortyuzi Zh.* Teoriya elektronnykh tsepey [The theory of electronic circuits]. Vol. 1. Analiz [Analysis]. Moscow: Mir, 1970, 408 p.
15. *Lebedev I.V.* Tekhnika i pribory SVCh [Appliances and microwave devices], ed. by N.D. Devyatkova. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 440 p.
16. *Baskakov S.I.* Radiotekhnicheskie tsepi s raspredelennymi parametrami [Radio technical chains with distributed parameters]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 152 p.
17. *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.
18. *Davis W. Alan.* Microwave semiconductor circuit design. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984, 415 p.
19. *Andreev V.S.* Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [The theory of nonlinear electrical circuits]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 280 p.

25. *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.
26. *Maas S.A.* Nonlinear Microwave and RF Circuits. Norwood, MA: Artech House, 2003, 582 p.
27. *Srivastava G.P., Gupta V.L.* Microwave devices and circuit design. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2006, 480 p.
28. *Snowden C.M., Miles R.E.* Compound Semiconductor Device Modelling. Berlin: Springer Science & Business Media, 1993, 286 p.
20. *Kurokawa K.* An Introduction to the Theory of Microwave Circuits. London: Academic Press, 1969, 446 p.

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

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.

Voloshchenko Peter Yurievich – Southern Federal University; e-mail: petrvoloshchenko@mail.ru; 44, Nekrasovsky, 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.