

Теоретическое исследование свойств невзаимного четырехполюсника

Ю.П. Волощенко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В данной статье приводится алгоритм моделирования системы электронных приборов СВЧ методом неавтономных блоков. Рассчитана ВАХ волнового нелинейного элемента, являющимся базовым элементом теории электронной волновой цепи.

Ключевые слова: электронный прибор СВЧ, электрическая цепь, волновой нелинейный элемент, четырехполюсник, вольтамперная характеристика, метод неавтономных блоков.

В теории цепей, описывающей разветвленные электрические схемы с активными элементами, используются разнообразные многополюсные модели [1-8]. Они считаются невзаимными, если содержат электронные приборы (ЭП), являющиеся управляемыми источниками электромагнитной (ЭМ) энергии. С другой стороны, при расчете КПД их взаимодействия отсутствует возможность применения теоремы наложения. Дело в том, что в общепринятом алгоритме исследования сложной системы СВЧ по частям наблюдается утрата информации о коллективных свойствах ЭП и соединений между ними [3,6]. Поэтому для анализа инерционных связей её участков необходимо синтезировать графические и аналитические модели интеграции ЭП и питающих проводников, совместно образующих кластер. Эволюционный синтез подобных микроволновых конструкций следует осуществлять методом неавтономных блоков, выделяя зависимые первичные и вторичные источники (ПИ и ВИ) сигналов. Он основывается на модели невзаимного четырехполюсника без конкретизации вольтамперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов (НЭ) любой топологии и теории электронной волновой цепи (ЭВЦ) [9-10].

Целью работы является разработка алгоритма символьного анализа и аналитического расчета динамической ВАХ волнового НЭ (ВНЭ) теории ЭВЦ. На первом этапе исследования установим в общем виде функции,

связывающие между собой входные и выходные комплексные изображения мгновенных напряжений $\dot{U}_1(U_1, I_1)$, $\dot{U}_2(U_2, I_2)$ и токов $\dot{I}_1(U_1, I_1)$, $\dot{I}_2(U_2, I_2)$ неавтономного блока. Здесь переменные U_1, I_1 и U_2, I_2 попарно иллюстрируют «рабочие» точки на ВАХ одно- и двухпортовой эквивалентных схем четырехполюсника (рис.1,2). В ходе вычисления действительной амплитуды переменного тока I_1 и напряжения U_1 в сечении 1-1' кластера не интересуемся внешней характеристикой и внутренним сопротивлением ПИ колебательной энергии. При данных обстоятельствах считаем воздействие U_1, I_1 на входных зажимах проходного четырехполюсника как вызывающее ток $\dot{I}_2(U_1, I_1)$ и падение напряжения $\dot{U}_2(U_1, I_1)$ в двухполюсном НЭ ВИ сигнала. Положительные направления напряжений и токов в ЭВЦ выберем, как показано на рис.1. Тогда на клеммах 1-1' схемы поток энергии СВЧ ПИ движется к четырехполюснику, а на зажимах 2-2' от него. Амплитудно-зависимые параметры неавтономного блока изучаем в аналитическом виде при установившихся монохроматических ЭМ возмущениях, ориентируясь на дальнейшее применение метода гармонической линеаризации ВАХ НЭ произвольного типа[2,4,5]. Дело в том, что исследование неоднотоновых сигналов в элементарном и составном четырехполюсном НЭ может быть сведено разложением в ряд Фурье и последующему анализу процессов для отдельных гармонических составляющих. В свою очередь подобный энергетический подход дает основание применить методы эквивалентных синусоид и комплексных амплитуд [1-8].

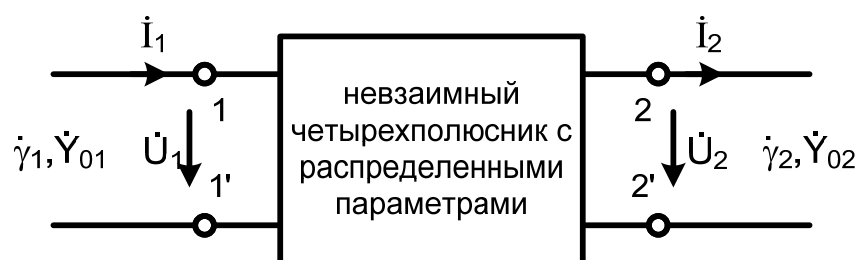


Рис.1. Графическое изображение невзаимного четырехполюсника

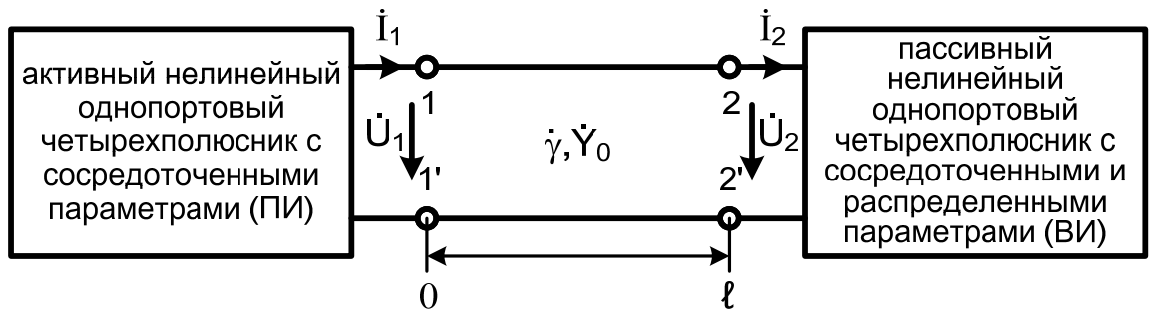


Рис.2. Эквивалентная схема соединения неавтономных блоков

С целью идентификации амплитудной и частотной зависимости инерционных изменений напряжений и токов ЭВЦ при возбуждении слева ПИ и справа ВИ, запишем её основные уравнения в А-форме:

$$\dot{U}_1(U_1, I_1) = A_{11}(U_1, I_1) \dot{U}_2(U_1, I_1) + A_{12}(U_1, I_1) \dot{I}_2(U_1, I_1) \quad (1)$$

$$\dot{I}_1(U_1, I_1) = A_{21}(U_1, I_1) \dot{U}_2(U_1, I_1) + A_{22}(U_1, I_1) \dot{I}_2(U_1, I_1) \quad (2)$$

Формулы (1), (2) наглядно иллюстрируют вынужденный колебательный режим неавтономного блока и композицию воздействий в нем при произвольной внешней нагрузке. Они имеют идентичный символичный вид, иллюстрирующий когерентность ПИ и ВИ энергии, обусловленную запаздыванием сигнала в разных областях устройства СВЧ.

Вместе с тем использовать равенства (1) и (2) в качестве основы инженерного расчета, направленного на однозначную оптимизацию энергетического состояния совокупности ЭП и непосредственное нахождение топологии кластера – невозможно. Во-первых, амплитудно-зависимые коэффициенты А-матрицы связаны между собой конкретной функцией, зависящей от длины соединений, интенсивности воздействия, нелинейности характеристик ЭП и т.д. Во-вторых, параметры четырехполюсного НЭ, иллюстрирующие его свойства, определяются экстремальной ситуацией холостого хода (ХХ) или короткого замыкания (КЗ) ветвей на границах кластера. Однако реализация предельных режимов в интеграции ЭП при экспериментальной детерминации её характеристик приводит к нежелательным последствиям и необходимости её перманентной

диагностики. Дело в том, что упомянутые выше краевые условия соответствуют «электрическому» и «тепловому» пробую, например, полупроводниковых ЭП.

Поэтому для наглядного и адекватного теоретического исследования системы ЭП СВЧ предлагается дополнительно выразить уравнения (1),(2) через характеристическое входное \dot{Z}_{01} и выходное \dot{Z}_{02} сопротивление, коэффициент трансформации $\dot{m}=\dot{Z}_{01}/\dot{Z}_{02}$ и постоянную передачи $\dot{g}=\alpha+j\beta$ несимметричного проходного четырехполюсника [2-8]:

$$\dot{U}_1(U_2, I_2)=\dot{m}[\dot{U}_2(U_2, I_2)\text{ch}\dot{g}+\dot{I}_2(U_2, I_2)\dot{Z}_{02} \text{sh}\dot{g}], \quad (3)$$

$$\dot{I}_1(U_2, I_2)=[\dot{U}_2(U_2, I_2)\dot{Y}_{02}\text{sh}\dot{g}+\dot{I}_2(U_2, I_2)\text{ch}\dot{g}]/\dot{m}. \quad (4)$$

В то же время коэффициенты уравнений (1) – (4), моделирующих динамическую ВАХ кластера в разных импедансных интервалах, взаимосвязаны четырьмя трансцендентными решениями. Два из них обычно игнорируются как не имеющие физического смысла в конвергентной электрической цепи, вынужденный периодический режима которой не зависит от начальных условий. Вместе с тем, выбор знаков аналитических операторов ЭВЦ следует осуществлять для её конкретного внутреннего строения. Поэтому применим методику сопоставления А-параметров невзаимного четырехполюсника и произвольно нагруженного волноведущего канала. В этом случае предлагается идентифицировать кластер как элементарный ВНЭ, содержащий двухпроводную линию (волновой проводимостью $\dot{Y}_0=1/\dot{Z}_0$) и амплитудно-зависимый двухполюсник на конце. Кроме того, совместим точку наблюдения с зажимами 1-1' составного НЭ при последующем обращенном символьном анализе стоячих волн в нем

$$\dot{U}_1(U_2, I_2)=[\dot{U}_2(U_2, I_2)\text{ch}\dot{\gamma}l+\dot{I}_2(U_2, I_2)\dot{Z}_0 \text{sh}\dot{\gamma}l], \quad (5)$$

$$\dot{I}_1(U_2, I_2)=[\dot{U}_2(U_2, I_2)\dot{Y}_0 \text{sh}\dot{\gamma}l+\dot{I}_2(U_2, I_2)\text{ch}\dot{\gamma}l], \quad (6)$$

Уравнения (5) – (6) корректно в общем виде характеризуют инерционную композицию сигналов, дисперсию и граничные условия кластера СВЧ, т.к. на

этой стадии символьного анализа вид ВАХ НЭ не конкретизирован.

Для корректной минимизации количества переменных математической модели системы ЭП рассмотрим идеализированное металлическое соединение без потерь ($\gamma=j\beta$), с негatronом $-G_{e2}(U_2)$, шунтированным линейным резистивным G_{n2} и энергоёмким B_2 двухполюсниками [1-6]

$$\dot{Y}_2(U_2) = \dot{I}_2(U_2)/\dot{U}_2(U_2) = G_2(U_2) + jB_2 = G_{n2} - G_{e2}(U_2) + jB_2.$$

(7)

Они определяют импедансное краевое условие в ЭВЦ при воздействии ПИ и ВИ волн напряжения. Считаем, что ВАХ НЭ описывается формулой $I_2(U_2) = U_2[G_{n2} - G_{e02}(1 - v(U_2)^2)]$, G_{e02} , v – малосигнальная проводимость и параметр нелинейности двухполюсника, соответствующие методу гармонической линеаризации. Тогда из соотношений (5) -(7), получаем:

$$\dot{U}_1(U_2) = \dot{U}_2(U_2)(\cos\theta + j\dot{Y}_2(U_2)Z_0\sin\theta) = \dot{U}_2(U_2)[(\cos\theta - B_2)\sin\theta + jG_2(U_2)Z_0\sin\theta], (8)$$

$$\dot{I}_1(U_2) = \dot{U}_2(U_2)(\dot{Y}_2(U_2)\cos\theta + jY_0\sin\theta) = \dot{U}_2(U_2)[G_2(U_2)\cos\theta + j(B_2\cos\theta + Y_0\sin\theta)], (9)$$

Здесь обозначение $\theta = \beta l$ отвечает электрической длине линии, интегрирующей в единое целое сосредоточенный НЭ и остальную ЭВЦ. Равенства (8),(9) связывают между собой в неявном виде инварианты проходного невзаимного четырехполюсника и ВНЭ, характеризующего неавтономный блок системы ЭП СВЧ. В этом случае графические (рис.1,2) и аналитические операторы (1) – (9) теории ЭВЦ позволяют не только корректно изображать, но и достоверно рассчитывать КПД преобразования колебательной мощности кластером в стационарном вынужденном режиме.

На рис.3 приведены результаты расчета динамической ВАХ $I_1 = f(U_1)$ ВНЭ при следующих параметрах $G_{n2} = 2Y_0$, $G_{e02} = 1,8Y_0$. Графики наглядно демонстрируют особенности трансформации его нелинейности и возможность управления ВАХ кластера любого типа, методика расчета которых подробно изложена в [6-8].

Таким образом, в статье изложен эволюционный алгоритм расчета

амплитуды переменного тока и напряжения на зажимах четырехполюсного НЭ и динамической ВАХ ВНЭ. Он заключается в корреляции процедуры синтеза графических и аналитических операторов кластера, содержащего длинную линию и сосредоточенный резистивно-негатронный НЭ на каждом этапе метода неавтономных блоков. В свою очередь они формируют семейство эквивалентных схем системы ЭП СВЧ в виде невзаимного четырехполюсника, элементарного и составного НЭ. Подобные базовые макромодели кластера, обладающих свойством инвариантности, позволяют реализовать корректный символьный анализ композиции сигналов в проходном четырехполюснике с учетом его электрического строения.

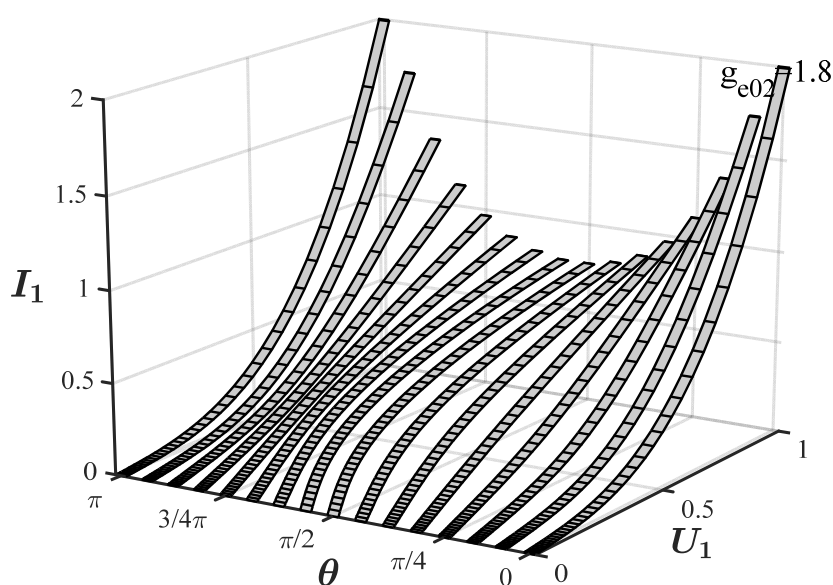


Рис. 3. – Динамическая ВАХ ВНЭ

Благодарности

Работа поддержана грантом Южного федерального университета "Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии" (ВнГр-07/2017-15).

Литература

1. Волощенко П.Ю. Анализ активной нелинейной распределенной



резонансной системы // Известия вузов. Электромеханика, 1995, №4. С.42-45.

2. Волощенко П.Ю. Обращенный анализ электромагнитных процессов в длинной линии с активным нелинейным элементом // Известия вузов. Электромеханика, 2010, №6. С.21-24.

3. Волощенко П.Ю. Исследование двухструктурного лавинно-пролетного диода монолитного интегрального генератора КВЧ // Известия ТРТУ. Таганрог: ТРТУ, 1998, № 3. С.123 – 124.

4. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П., Мальков С.Б. Моделирование композиции сигналов в одномерной электронной цепи // Известия ЮФУ. Технические науки, 2015, №11 (172). С.33-42.

5. Волощенко П.Ю. Анализ трансформации амплитуды волн нелинейным элементом, размещенным в длинной линии // Известия вузов. Электромеханика, 2010, №4. С.3-5.

6. Волощенко Ю.П., Негоденко О.Н. Моделирование интегрированной полупроводниковой структуры // Известия ТРТУ. Таганрог: ТРТУ, 2007, №1(73). С. 124-128.

7. Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P. Macromodeling of High-Frequency Microchip Material Structure. // Abstracts and Schedule of the 2017 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2017). Jabalpur: PDPM Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, 2017. pp.287-288.

8. Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Pivnev V.V. Modeling of the wave electromagnetic processes in the microwave microelectronic material. // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technology. :EAI, 2017. vol. 4 (10-12 2017). Issue 15. 10.4108/eai.13-12-2017.153471.

9. Басан С.Н., Пивнев В.В. К вопросу о разработке модели нелинейного двухполюсника с управляемой вольтамперной характеристикой // Инженерный вестник Дона, 2015, №3 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/



3203.

10. Басан С.Н., Пивнев В.В. Математическое моделирование нелинейных характеристик элементов применительно к задаче реализации двухполюсников с заданными нелинейными зависимостями // Инженерный вестник Дона, 2016, №4 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n4y2016/3857.

References

1. Voloshchenko P.Yu. Izvestiya vuzov Elektromekhanika, 1995, №4. pp.42-45.
2. Voloshchenko P.Yu. Izvestiya vuzov Elektromekhanika, 2010, №6. pp.21-24.
3. Voloshchenko, P.Yu., Izvestiya TRTU, 1998, №3. pp. 123-124.
4. Voloshchenko, P.Yu., Voloshchenko, Yu.P., Mal'kov, S.B. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki, 2015, №11 (172). С.33-42.
5. Voloshchenko P.Yu. Izvestiya vuzov Elektromekhanika, 2010, №4. pp. 3-5.
6. Voloshchenko Yu.P., Negodenko O.N. Izvestiya TRTU, 2007, №1(73). pp. 124-128.
7. Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P. Macromodeling of High-Frequency Microchip Material Structure. Abstracts and Schedule of the 2017 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2017). Jabalpur:PDPM Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, 2017. pp. 287-288.
8. Voloshchenko P.Yu., Voloshchenko Yu.P., Pivnev V.V. Modeling of the wave electromagnetic processes in the microwave microelectronic material. EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technology: EAI, 2017. vol. 4 (10-12 2017). Issue 15. 10.4108/eai.13-12-2017.153471.
9. Basan S.N., Pivnev V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n3y2015/3203.
10. Basan S.N., Pivnev V.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), Inzhenernyj vestnik



Dona (Rus), 2016, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3857.