

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн / Я. Шифрин. – М. : Сов. радио, 1970. – 384 с.
2. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры – М. : Мир, 1977. – 243 с.
3. Артюшенко Б. А. Допусковый анализ фракталоподобной антенны с применением метода моментов / Артюшенко Б. А., Шило Г. Н., Кришук В. Н., Романенко С. Н. // Матеріали 17-ї Міжнародної Кримської конференції «СВЧ техніка і телекомунікаційні технології» (КрыМиКо2007). – Севастополь, 2007. – С. 402–403.
4. Антонов А. Н. Эффективная организация параллельных распределенных вычислений на основе кластерных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.15 / Антонов А. Н. – Пенза, 2005. – 243 с.

Надійшла 20.01.2010
Після доробки 11.03.2010

Артюшенко Б. А., Ильяшенко М. Б., Головатый А. И.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ГРАНЕЙ

Предложен новый метод параллельного анализа влияния допусков на параметры вибраторных антенн – анализ граней. Метод базируется на свойствах антенн: небольшой величине допусков, взаимозависимости, монотонности зависимости характеристик диаграммы направленности от

одного из параметров в пределах допускной области. Разработанный метод анализа граней базируется на методе бисекций, но вычисляет значения выходных функций лишь на вершинах допускной области. С целью снижения времени вычислений разработана процедура распараллеливания.

Ключевые слова: допусковый анализ, многопараметрический анализ, диаграмма направленности, параллельные вычисления, антенны.

Artyushenko B. A., Ilyashenko M. B., Holovatyj A. I.

DETERMINATION OF ANTENNA PARAMETERS DEVIATION INFLUENCE ON ANTENNA PATTERN CHARACTERISTICS USING THE METHOD OF PARALLEL BOUNDS ANALYSIS

A new parallel analysis method is proposed for determining the influence of tolerances on the dipole antenna parameters. The method is based on antennas characteristics: small tolerances, interdependence and monotone dependence of radiation pattern on one of the parameters within the tolerance domain. The bound analysis method is based on the bisection method, but it computes output functions only at the vertexes of the tolerance domain. To reduce the time of calculation, a parallelization procedure is developed.

Key words: tolerance analysis, polyvalent analysis, radiation pattern, parallel computation, antenna.

УДК 621.372.001.24:78

Гулин С. П.¹, Гулин А. С.², Дмитренко В. П.¹, Пиза Д. М.³

¹Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

²Аспирант Запорожского национального технического университета

³Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ, СТРУКТУР И УСТРОЙСТВ

На основе математического аппарата функциональных рядов Вольтерры – Гаусса (ФРВГ) и функций динамического насыщения (ФДН) предложена концепция управляемого динамического насыщения, реализующая обобщенный подход при исследовании и моделировании микроэлектронных нелинейных инерционных цепей и систем (НИЦС) в условиях многочастотного полиамплитудного воздействия. На ряде примеров состоятельность предложенной концепции подтверждена как с математической, так и с физической точки зрения.

Ключевые слова: нелинейные инерционные цепи и системы, концепция управляемого динамического насыщения, функциональные ряды Вольтерры – Гаусса, обобщенная мгновенная динамическая характеристика, установившийся отклик, многочастотное полиамплитудное воздействие.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе разработки микроэлектронных (и других) систем в целом часто возникает необходимость

всесторонне исследовать поведение отдельных их компонентов, структур и устройств в условиях многочастотных полиамплитудных воздействий в режимах,

© Гулин С. П., Гулин А. С., Дмитренко В. П., Пиза Д. М., 2010

в которых наиболее полно проявляются их возможности и свойства. При этом широко используются различные методы из арсеналов экспериментальной физики и прикладной математики [1–4].

Объектами исследования могут служить как отдельные активные компоненты и структуры (диоды, транзисторы, электронные лампы, оптоэлектронные преобразователи и пр.), так и устройства и функциональные модули (ФМ): операционные, параметрические и непараметрические усилители, умножители, делители и преобразователи частоты, амплитудные ограничители, управляемые аттенюаторы, модуляторы, детекторы, компрессоры, экспандеры и конвертеры различного рода сигналов. При этом получение необходимых результатов возможно лишь на базе некоторой обобщающей концепции, которая бы позволяла всесторонне исследовать процессы, происходящие в условиях возможных вариаций параметров воздействия и окружающей среды, а также выявлять особенности и закономерности их проявлений.

Анализ многочисленных публикаций данного направления подчеркивает необходимость и значимость разработки и развития обобщенной концепции для решения сформулированных выше задач. Тем более что в процессе проведения узкоспециализированного эксперимента зачастую оказывается, что ряд факторов, характеризующих объект исследования, режим его функционирования, особенности протекания самого процесса, учтен в недостаточной степени или же не учтен вовсе.

Примером, подтверждающим необходимость разработки обобщающего подхода, является работа [5], посвященная моделированию негармонических процессов в энергетике.

Создание подобной концепции подразумевает решение четырех основных задач:

- разработки и развития методов анализа режимов нелинейных цепей и систем, обладающих достаточной степенью общности;
- разработки методов и устройств измерения многомерных параметров нелинейных цепей и систем в условиях многочастотного полиамплитудного воздействия;
- создания обобщенной математической модели для объектов исследуемых классов;
- разработки методов структурной и параметрической идентификации этой модели на основе данных эксперимента.

В данной работе предлагается один из возможных путей решения указанной проблемы – создание обобщающей концепции управляемого динамического насыщения (КУДН) для характеристики, модели-

рования и исследования режимов микроэлектронных активных компонентов, структур, устройств и систем с сосредоточенными параметрами в условиях действия многочастотных сигналов на основе математического аппарата ФРВГ и ФДН.

РЕШЕНИЕ

С целью устранения возможных просчетов и ошибок при разработке обобщающего подхода и концепции для рассматриваемой области исследований на начальном этапе предлагается физические и математические аспекты сформулированной задачи рассматривать отдельно, строго подходить к формулировкам соответствующих ограничений.

Исходя из теории и практики микроэлектронных компонентов и ФМ, работающих в многочастотных режимах, можно сформулировать следующие ограничения, с учетом которых должна решаться задача синтеза их моделей с физической точки зрения:

- физическую основу процесса моделирования ФМ однозначно определяет интегральная технология их производства;
- ФМ выполнены на базе схемотехники усилителей постоянного тока, что позволяет решать задачу анализа режимов и идентификации ФМ с единых методологических позиций;
- поскольку объекты исследования – реальные устройства, то условия физической реализуемости, накладываемые при синтезе их моделей, не являются определяющими;
- внутренняя структура ФМ известна лишь приближенно, что объясняется наличием неконтролируемых паразитных элементов и несовершенством технологии изготовления интегральных компонентов: p - n -переходов, конденсаторов, резисторов;
- объектом идентификации является интегральная схема, представляющая собой, в общем случае, нелинейный инерционный многополосник (НИМ) с несколькими входами и выходами, принадлежащий к классу $ARCL$ -цепей с сосредоточенными параметрами;
- доступными для методов идентификации являются лишь внешние выводы интегральной схемы ФМ, поскольку непосредственное измерение параметров образующих их компонентов неразрушающими методами контроля крайне затруднено и/или невозможно;
- двунаправленности передачи информационного сигнала, которая, однако, для устройств низкочастотного и высокочастотного диапазонов (например, операционных усилителей (ОУ), аналоговых перемножителей) может иметь однонаправленный характер;

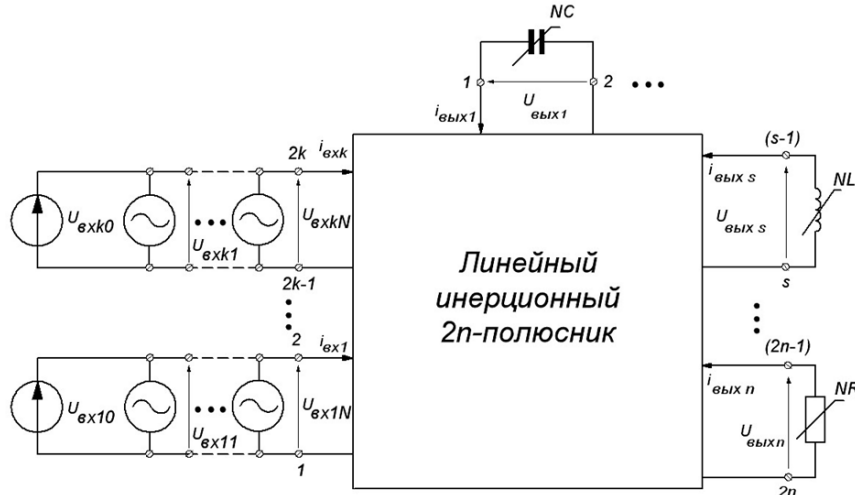


Рис. 1. Модель НИЦ:

$U_{вхl,0}$, $U_{вхl,i}$ – величина постоянной составляющей и амплитуда i -гармонической компоненты воздействия на l -м входе, $l = \overline{1, k}$;
 $i_{вхl}$ – мгновенное значение тока на l -м входе; $u_{выхj}$, $i_{выхj}$ – мгновенные значения напряжения и тока на j -выходе, $j = \overline{1, n}$

- режим объектов исследования предполагается нелинейным и установившимся;
- класс исследуемых объектов здесь ограничивается конвергентными НИЦС;
- воздействие, удовлетворяющее условию узкополосности, представляет собой многочастотный полиамплитудный тестовый сигнал (МПТС) вида

$$x(t) = X_0 + \sum_{i=1}^N X_i \cdot \cos\left(\sum_{j=1}^N n_j \cdot \omega_j \cdot t + \sum_{j=1}^N n_j \cdot \varphi_j\right), \quad (1)$$

где $X_0 = \text{const}$; X_i , ω_i , φ_i – амплитуда, круговая частота и начальная фаза i -компоненты воздействия, $i, j = \overline{1, N}$; n_j – целочисленные коэффициенты, удовлетворяющие условию $n_j \in [-N; N]$; частоты ω_i несоизмеримы между собой и образуют монотонно-возрастающий лексикографический ряд $0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$ [3, 6].

С учетом сформулированных ограничений в качестве обобщенной модели нелинейной инерционной цепи (НИЦ) рассматриваемого класса предлагается цепь, представленная на рис. 1.

НИЦ рис. 1 должна удовлетворять следующим ограничениям на вырожденные виды топологии ее эквивалентной схемы и типы управляющих переменных:

1. Граф цепи не должен содержать контуры, образованные только из независимых и (или) управляемых источников напряжения (E -контур [7]).
2. В графе цепи не должны существовать сечения, содержащие только независимые и (или) управляемые источники тока (I -сечения) [7].

3. Топология НИЦ задана графом эквивалентной схемы, который содержит s узлов и p ветвей. При этом полагаем, что цепи с взаимоиндукцией отсутствуют.

4. Число нелинейных элементов (НЭ) W , из которых n_G , n_C и n_L являются, соответственно, нелинейными проводимостями, емкостями и индуктивностями, ограничено числом независимых контуров: $W = n_G + n_C + n_L \leq p - s + 1$.

5. Параметры линейных двух- и четырехполюсников известны, а их комплексные сопротивления (проводимости) могут быть вычислены для любой частоты.

6. Управляемый источник, принадлежащий CE -контур или LI -сечению, должен зависеть только от напряжения на емкости дерева или от тока индуктивности антидерева [7].

7. Соотношение «вход – выход» нелинейной емкости должно определяться функцией напряжения на ней, т. е. $q_{NC} = q_f(u)$, а нелинейные индуктивности – током, т. е. $\psi_{NL} = \psi(i)$.

Для расширения класса исследуемых НИЦ допускается применение в качестве ветви ее графа обобщенной нелинейной цепи на рис. 2.

Соотношения «вход – выход» НЭ заданы в виде

$$i_{Nw} = i_{Nw}(u_w), \quad i_{Nw} = i_{Nw}(i_w), \quad i_{Nw} = i_{Nw}(\psi_w), \\ q_{Nw} = q_{Nw}(u_w), \quad w = \overline{1, W} = (1, 2, \dots, W), \quad (2)$$

где i_{Nw} , q_{Nw} – мгновенные значения тока и заряда в НЭ; i_w , u_w , ψ_w – мгновенные значения управляющего тока, напряжения и потокосцепления НЭ.

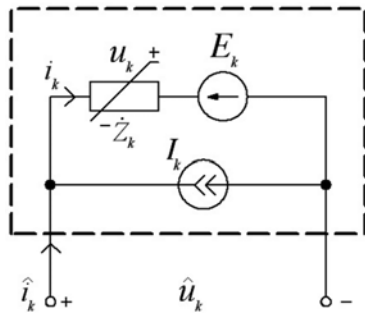


Рис. 2. Обобщенная k -ветвь графа НИЦ, содержащая независимый источник напряжения E_k , независимый источник тока I_k и нелинейное сопротивление Z_k с двумя выводами (или управляемый напряжением источник тока)

При обобщении и унификации моделей НЭ возникла задача поиска гипотетической «универсальной» аналитической функции (или функций), которая бы описывала поведение их соотношений «вход – выход» с достаточной точностью, была бы относительно простой и, что самое главное, включала ряд параметров, вариация которых обеспечивала бы необходимую гибкость в изменении ее формы в широком диапазоне значений аргумента.

В [6] была определена система требований, которым должна удовлетворять гипотетическая универсальная функция аппроксимации. В соответствии с этими требованиями, эта функция должна:

- быть линейной для малого сигнала;
- при неограниченном возрастании ее аргумента асимптотически стремиться к некоторому регулируемому уровню насыщения;
- иметь замкнутую аналитическую форму;
- позволять варьировать крутизну наклона линейного участка функции и кривизну участка перехода от малосигнального режима к режиму среднего и большого сигнала;
- обеспечивать возможность перемещения и изменения графика функции в любом направлении оси соответствующей системы координат;
- иметь обратный оператор, выраженный в аналитическом виде;
- обеспечивать требуемую точность аппроксимации в области изменения аргумента.

С учетом сформулированных выше жестких ограничений, сформулированная задача была решена в [6, 8, 9], где для описания соотношений «вход – выход» (2) НЭ были предложены следующие функции и их модификации:

$$F1[x(t)] = F_{0,N} + A_N \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{B_N}{x(t)} \right]^{p_N} \right\}^{-S_N^{-1}},$$

$$F2[x(t)] = F_{0,N} \cdot x(t) + A_N \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{B_N}{x(t)} \right]^{p_N} \right\}^{-S_N^{-1}}; \quad (3)$$

$$Y1[x(t)] = Y_{0,N} - A_N \cdot \ln[1 + B_N/\exp(x(t))],$$

$$Y2[x(t)] = Y_{0,N} \cdot x(t) - A_N \cdot \ln[1 + B_N/\exp(x(t))], \quad (4)$$

где $F_{0,N}$, S_N , p_N , A_N , B_N – параметры ФДН (3), а $Y_{0,N}$, A_N , B_N – параметры ФДН (4); индекс « N » в обозначении параметров, в зависимости от типа НЭ, принимает значения G , R , C , L . В дальнейших выкладках для НЭ, управляемых напряжением, в соотношениях (3)–(4) « x » заменяется « U », а для НЭ, управляемых током, « x » заменяется « I ».

Результаты применения ФДН для решения задач аппроксимации характеристик НЭ различной физической природы показали высокую эффективность методов, основанных на принципе управляемого динамического насыщения [10–13]. Однако решения лишь задачи аппроксимации произвольной аналитической функции для становления и дальнейшего развития КУДН недостаточно.

Необходимая методологическая основа КУДН заложена в работах [6, 14–20]. Так, в [6, 14] на основе принципа управляемого динамического насыщения были разработаны методы анализа установившегося отклика безынерционной нелинейности на многочастотное воздействие, в котором описание соотношений «вход – выход» НЭ осуществлялось с помощью ФДН. В [9] обоснована возможность применения ФДН для характеристики НЭ и ФМ. В дальнейшем предложенный в [6, 14] алгоритм характеристики был распространен на резистивные и реактивные НЭ различных типов управления и нелинейные управляемые источники [17, 18]. В [19] разработана методика расчета общего числа комбинационных колебаний (КК), включая компоненты постоянной составляющей (DC -компоненты), установившегося отклика НИЦ на воздействие (1). Физически DC -компоненты могут возникать, например, в результате паразитного детектирования некоторых КК. При этом учитывается динамика рабочей точки НЭ. Недавно данный метод получил свое матричное обобщение применительно к анализу установившихся многочастотных режимов конвергентных НИЦ общего вида с НЭ, соотношения «вход – выход» которых представлены трансцендентными ФДН при любом способе задания исходных экспериментальных данных, включая табличный [20].

Полученные результаты позволяют одну из форм математической модели НИЦ (рис. 1) в однородном

У-координатном базисе представить следующей системой уравнений [20]:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{N, \tilde{n}_{m,0}} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{J}_0 + \mathbf{F}^{-1} \cdot [\mathbf{A} \mathbf{Y}_{b,0} \mathbf{A}^t] \cdot [\mathbf{U}_{T, \tilde{n}_{m,0}} - \mathbf{E}_{\tilde{n}_{m,0}}]; & (5a) \\ \mathbf{I}_{N, \tilde{n}_{l,+}} = \mathbf{F}^{-1} \cdot [\mathbf{A} \mathbf{Y}_{b,l+} \mathbf{A}^t] \cdot [\mathbf{U}_{T, \tilde{n}_{l,+}} - \mathbf{E}_{\tilde{n}_{l,+}}], & (5b) \end{cases}$$

где $\mathbf{I}_{N, \tilde{n}_{m,0}}$ и $\mathbf{I}_{N, \tilde{n}_{l,+}}$ – векторы нелинейных токов, являющиеся функциями напряжений на линейных элементах дерева графа НИЦ, параллельно которым включены инкрементальные НЭ порядка $k \geq 2$, при расчете величин DC -компонент и комплексных амплитуд КК на выходах НИЦ, соответственно; \mathbf{F} -матрица главных контуров графа эквивалентной схемы НИЦ; $\tilde{n}_{m,0}$ и $\tilde{n}_{l,+}$ – индексы векторов, соответствующих DC -компонентам с частотами $\omega_{\tilde{n}_m} = 0$ и КК с частотами $\omega_{\tilde{n}_l} > 0$ в уравнениях (5a) и (5б); \mathbf{J}_0 – вектор-столбец, учитывающий присутствие постоянных источников тока обобщенных ветвей графа НИЦ; \mathbf{A} – матрица инцидентий графа НИЦ; $\mathbf{Y}_{b,0}$, $\mathbf{Y}_{b,l+}$ – диагональная матрица проводимостей линейных двухполюсников в (5a) и (5б); $\mathbf{A} \mathbf{Y}_{b,l+} \mathbf{A}^t$ – матрица узловых проводимостей эквивалентной схемы НИЦ, рассчитываемая на частотах КК; $\mathbf{U}_{T, \tilde{n}_{m,0}}$ и $\mathbf{U}_{T, \tilde{n}_{l,+}}$ – векторы амплитуд напряжений на линейных элементах фундаментального дерева графа НИЦ; $\mathbf{E}_{\tilde{n}_{m,0}} = [0, \dots, \dot{E}_{j, \tilde{n}_{m,0}}, \dots, 0]^t$ – вектор-столбец узловых напряжений дерева графа НИЦ, ненулевой элемент которого, соответствующий j -узлу, содержит постоянную составляющую воздействия (1) и гармоническую ЭДС с набором коэффициентов $\tilde{n}_{m,0}$, соответствующим m -й DC -компоненте отклика; $\mathbf{E}_{\tilde{n}_{l,+}} = [0, \dots, \dot{E}_{j, \tilde{n}_{l,+}}, \dots, 0]^t$ – вектор-столбец узловых напряжений дерева графа, ненулевой элемент которого, соответствующий j -узлу, содержит гармоническую ЭДС \dot{E}_{j, \tilde{n}_l} , частота которой равна частоте l -го КК. В том случае, когда элемент дерева графа НИЦ не содержит источника постоянной ЭДС (источника постоянного тока), соответствующая ему координата вектора $\mathbf{E}_{k, \tilde{n}_l}$ (соответственно, \mathbf{J}_0) равна 0.

Уравнение (5a), согласно [20], описывает $N_{\Sigma DC}$ DC -компонент установившегося отклика НИЦ, а уравнение (5б) характеризует $N_{(2\beta+n)}$ комбинационных и гармонических колебаний установившегося отклика.

Предложенный в [20] метод решения приведенной матричной системы уравнений (5) позволяет определить любые характеристики исследуемой НИЦ в условиях воздействия (1) с произвольным спектром, минуя расчет переходного режима и спектрального

анализа. В отличие от предложенных ранее, данный метод является, по сути дела, аналитическим и имеет перспективы своего дальнейшего развития для других классов НИЦ с учетом их режимов функционирования.

Одним из определяющих аспектов становления и дальнейшего развития КУДН является разработка методов и устройств измерения и определения параметров многомерных нелинейных передаточных функций и импульсных характеристик нелинейных устройств и систем с необходимой точностью и достоверностью. Существующие устройства, например [21, 22], не позволяют в полной мере решить данную задачу.

Для использования преимуществ предлагаемой КУДН и расширения функциональных возможностей измерителей параметров многомерных характеристик нелинейных устройств и систем, повышения точности и достоверности результатов измерений разработан новый подход и предложен ряд устройств, технические решения которых защищены патентами Украины, в частности [23, 24]. Эти устройства способны решать большинство задач, связанных с экспериментальными исследованиями установившихся многочастотных нелинейных процессов и явлений в различных областях техники.

При использовании всей совокупности составляющих предлагаемой КУДН (математические модели, методы, методики эксперимента, устройства измерения) появляется возможность определить параметры необходимых многомерных характеристик НИЦ, рассчитать частотные зависимости критериев нелинейных искажений (КНИ), комплексные амплитуды любой компоненты выходного сигнала, что позволяет с достаточной степенью корректности и строгости оценить потенциальные возможности разработанного устройства или ФМ и принять обоснованное решение по его эффективному применению.

Однако, при использовании структурных методов синтеза для разработки сложных микро- и радиоэлектронных систем существующий подход к принятию подобных решений теряет свой смысл, поскольку процесс разработки заключается в выборе совокупности ФМ, реализующих заданный алгоритм обработки входного сигнала и удовлетворяющих требуемым критериям качества из множества аналогичных устройств, предлагаемых различными фирмами-производителями. В этом случае необходимо ввести некоторые дополнительные характеристики для сравнения параметров и свойств объектов одноименного класса.

Для обоснования принятия эффективных решений в отношении качества используемых ФМ при структурном методе проектирования и разработки микро- и радиоэлектронных систем введем определенное обобщенное соотношение «вход – выход» для объектов исследования, относящихся к нелинейным неавтономным системам.

Сформулируем определение этой характеристики, которая в равной степени относится как к схемотехническим, так и к структурным конфигурациям.

Определение. Под обобщенной мгновенной динамической характеристикой (ОМДХ) по i -входу и j -выходу активного нелинейного инерционного многополюсника понимается функциональная зависимость мгновенного значения нормы отклика его j -го выхода от мгновенного значения нормы воздействия на i -м входе.

Введение ОМДХ позволяет решить несколько задач, связанных с обобщением и унификацией зависимостей подобного рода для объектов исследования самой различной физической природы. Для сравнения ОМДХ объектов исследования, принадлежащих одноименному классу, предлагается ввести понятие обобщенной нормированной ОМДХ (ОНМДХ), под которой понимается зависимость вида

$$\|W_{\text{вых}}(t)\|/\|W_{\text{вых}}(t)\|_{\text{max}} = F[\|W_{\text{вх}}(t)\|/\|W_{\lambda}\|], \quad (6)$$

где $\|W(\cdot)\|$ – норма сигнала, а $\|W_{\lambda}\|$ – норма входного сигнала, отвечающая эффекту пробоя активного компонента (например, пробоя электровакуумной лампы, лавинного пробоя p - n -перехода полупроводникового компонента).

Для практического введения ОМДХ и ОНМДХ необходимо использовать уже известные методы определения параметров постоянной составляющей, а также параметров гармонических и комбинационных компонент спектра отклика активного нелинейного безынерционного либо инерционного четырехполюсника на основе известного спектра воздействия. К ним можно отнести метод измерения параметров нелинейных искажений (например, критериев нелинейных искажений (КНИ) [3, 4]), методы измерения мощности с использованием датчиков Холла [1], а также устройства, методы и методики измерения и определения параметров многомерных характеристик НИЦ и систем, разработанные авторами [23, 24].

Следует подчеркнуть, что для корректной оценки потенциальных возможностей разработанного устройства, ФМ или системы, реализующих тот или иной алгоритм преобразования информационного сигнала, можно использовать модификации ОМДХ, учитывающие зависимость нормы выходного сигнала,

характеризующего результат полезного преобразования, от нормы воздействия, либо зависимость нормы компонент отклика, искажающих этот процесс, от нормы воздействия.

Основой для математического моделирования ОМДХ и ОНМДХ на основе КУДН и ФДН служат методы анализа, предложенные в [6, 14, 15, 20], а также методы структурной и параметрической идентификации нелинейных систем, разработанные в [25, 26].

Таким образом, задача исследования объектов рассматриваемого класса в рамках предлагаемой КУДН может быть сведена к решению задач структурной и параметрической идентификации НИЦ, эквивалентной объекту, и созданию ее обобщающей физико-математической модели.

Суммируя изложенное, сжатый смысл КУДН можно сформулировать так:

1. С точки зрения универсального информационного подхода объект исследования, принадлежащий заданному множеству, рассматривается как неавтономный нелинейный, в общем случае, инерционный $2N$ -полюсник с n входами и m выходами, а на структурном уровне – как неавтономная нелинейная, в общем случае, инерционная система с n входами и m выходами ($n, m \leq N$).

2. Внутренняя структура объекта исследования полагается либо полностью, либо частично неизвестной, т. е. объект исследования рассматривается либо как «черный», либо как «серый» ящик. В том случае, когда внутренняя структура объекта известна, процесс исследования объекта значительно упрощается, поскольку из алгоритма построения обобщающей физико-математической модели исключается ряд операций.

3. Воздействие по каждому из входов исследуемого объекта представляет собой МПТС вида (1) с конечным спектром и широким динамическим диапазоном (ДД).

4. Режим функционирования исследуемого объекта полагается установившимся.

5. Эквивалентный исследуемому объекту нелинейный инерционный $2N$ -полюсник представляется в виде двух каскадно-соединенных $2N$ -полюсников, один из которых является нелинейным безынерционным, а другой – линейным инерционным, что соответствует выводам теоремы, доказанной в [6].

6. Синтез обобщенной физико-математической модели исследуемого объекта на основе КУДН сводится к выполнению следующих операций:

а) экспериментального исследования соотношения «вход – выход» исследуемого объекта на задан-

ном множестве МПТС по каждой из пар «вход – выход»;

б) аппроксимации полученного множества характеристик «вход – выход» с помощью соответствующей ФДН;

в) полной и/или частичной идентификации внутренней структуры на основе полученного множества аппроксимированных характеристик «вход – выход»;

г) параметрической идентификации нелинейного безынерционного и линейного инерционного $2N$ -полосников с помощью множества аппроксимированных характеристик «вход – выход» и ФДН, учитывающих свойство неавтономности или автономности объекта;

д) определения комплексных амплитуд составляющих установившегося отклика на j -м выходе идентифицированного нелинейного $2N$ -полосника с n входами и m выходами ($n, m \leq N$) на МПТС его i -го входа, $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$;

е) расчета ОМДХ, полученной в результате структурной и параметрической идентификации нелинейного $2N$ -полосника, эквивалентного объекту исследования;

ж) сравнения расчетных и экспериментальных ОМДХ исследуемого объекта по каждой паре «вход – выход» и принятия решения по продолжению или же завершению итерационного процесса исследования по заданному критерию и заданной точности моделирования.

Таким образом, все этапы исследования, предусмотренные КУДН, достаточно наглядна, допускают достаточно простую физическую интерпретацию и при этом позволяют получить исчерпывающую информацию о характеристиках объекта, включая ОМДХ.

Возможная траектория ОМДХ, как одной из информационно емких характеристик исследуемого объекта, обусловлена прежде всего алгоритмами и принципами обработки информационного сигнала, заложенными в самом объекте исследования, а также характером физических процессов, сопровождающих их реализацию. Однако, при всем бесконечном разнообразии алгоритмов и принципов обработки информационного сигнала график функциональной зависимости «вход – выход» характеризуется неотрицательной крутизной.

Анализ результатов многочисленных работ данного направления позволяет выделить семь участков, которые охватывают весь возможный ДД по входному воздействию. График одной из возможных реализаций подобной обобщенной зависимости для объектов исследования данного класса приведен на рис. 3.

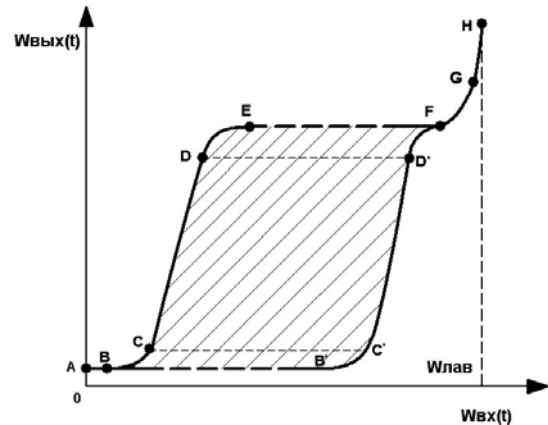


Рис. 3. ОМДХ нелинейной неавтономной системы при активном методе ее исследования

Три участка ОМДХ – АВ, CD, EF являются основными, а остальные четыре – переходными (вспомогательными). Заштрихованная область соответствует диапазону возможных изменений норм воздействия и отклика.

Каждому из семи участков ОМДХ или всей их совокупности можно поставить в частичное или полное соответствие участки статических и/или динамических характеристик микроселективных активных компонентов, структур, устройств и сред различного назначения. Используя первые пять участков ОМДХ, наиболее широко используемых на практике, можно определить значение нормы отклика, соответствующее нижнему и верхнему уровню входного воздействия, что позволяет определить соответствующие ДД по входу и выходу.

Одной из аналогий приведенной зависимости в радиотехнической литературе для переменных величин является амплитудная характеристика (АХ), а для режимов по постоянному току – семейства статических характеристик (входных, передаточных, выходных).

Как известно, экспериментальные статические характеристики полупроводниковых компонентов широко используются для характеристики их свойств в режимах постоянных токов и напряжений. Однако в технической литературе крайне редко можно найти аналитические соотношения, которые могли бы описать поведение отдельного активного прибора во всем диапазоне изменений напряжений и токов в статическом режиме. Это касается не только микроселективных полупроводниковых компонентов и структур, но и электровакуумных ламп и приборов СВЧ. Использование КУДН и ФДН позволяет решить эту задачу для активных компонентов различных видов. В [10] показана эффективность использования

ФДН для аппроксимации статических характеристик биполярных, полевых и СИТ-транзисторов.

Примером возможностей разработанной КУДН может служить решение задачи моделирования базового усилительного каскада на биполярном транзисторе, результаты которого приведены в [6]. Полученные результаты позволили решить задачу аппроксимации известной G -функции (введенной Э. Б. Грибовым в [27]) с помощью единственной трансцендентной ФДН, хотя сам автор этой функции считал эту задачу неразрешимой.

В качестве дополнительных подтверждений состоятельности КУДН рассмотрим несколько примеров из работ [11–13]. Например, в [11, 12] получено теоретическое соотношение для математического описания процессов, происходящих в фото- и терморегистрирующих средах, следующего вида

$$\alpha(t) = 1 - A \cdot \{1 + B \cdot \exp[-X(t)]\}, \quad (7)$$

где $\alpha(t)$ – степень превращения, A и B – взаимосвязанные нормировочные коэффициенты, определяемые начальными условиями процесса, которые характеризуют размерность протекания реакции в объеме реагента; $X(t) = \left(\int_0^t p(t) dt\right)$; $p(t)$ – функция оценки вероятности протекания процесса.

Более сложные виды кинетических кривых, часто наблюдаемые в ходе экспериментов и исследований топохимических превращений, описываются, согласно [12], модификацией соотношения (7) с аргументом $X(t) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \alpha_i \cdot t^{m_i}$, где $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$; α_i – весовое содержание (доля) i -го ингредиента; n – количество

ингредиентов; m_i – параметры интенсивности процесса.

Анализ соотношения (7) и его модификаций позволяет отнести его к классу ФДН.

Таким образом, суммируя изложенное, можно утверждать, что КУДН получила подтверждение своей состоятельности не только с математической, но и с физической точки зрения, т. е. на феноменологическом уровне.

В качестве примера комплексного применения методов КУДН приведем результаты моделирования установленного режима нелинейного безынерционного устройства преобразователя частоты (УПЧ) (рис. 4) на двузатворном полевом транзисторе (ПТ) типа 2П306Б при моно- и бигармоническом воздействии. На рис. 5 и 6 приведены семейства экспериментальных (точечные кривые: $I_{\text{drain}4}$, $I_{\text{drain}3}$, $I_{\text{drain}1}$ – по первому затвору и I_5 , I_4 , I_3 , I_1 – по второму затвору) и расчетных (непрерывные кривые: $Y_{\text{mod}4}$, $Y_{\text{mod}3}$, $Y_{\text{mod}2}$ – по первому затвору и $Y_{\text{mod}5}$, $Y_{\text{mod}4}$, $Y_{\text{mod}3}$, $Y_{\text{mod}2}$ – по второму затвору) графиков ВАХ 2П306Б.

ВАХ по первому затвору (рис. 5) аппроксимированы ФДН (3) с наборами параметров: $Y_{\text{mod}4} - B4 = 1,8$, $S4 = 3,2$, $A4 = 2,48$, $p4 = 1,3$; $Y_{\text{mod}3} - B3 = 0,9$, $S3 = 1,5$, $A3 = 4,8$, $p3 = 1,61$; $Y_{\text{mod}2} - B2 = 1,3$, $S2 = 1,65$, $A2 = 7,25$, $p2 = 1,6$. ВАХ по второму затвору (рис. 6) аппроксимированы ФДН (3) с наборами параметров, соответствующих графикам: $Y_{\text{mod}5} - Y50 = 0,06$, $B5 = 0,8$, $S5 = 3,2$, $A5 = 2,24$, $p5 = 3$; $Y_{\text{mod}4} - Y40 = 0,03$; $B4 = 1,25$, $S4 = 1,8$, $A4 = 5,3$, $p4 = 1,95$; $Y_{\text{mod}3} - Y30 = 0,025$, $B3 = 1,8$, $S3 = 2,1$,

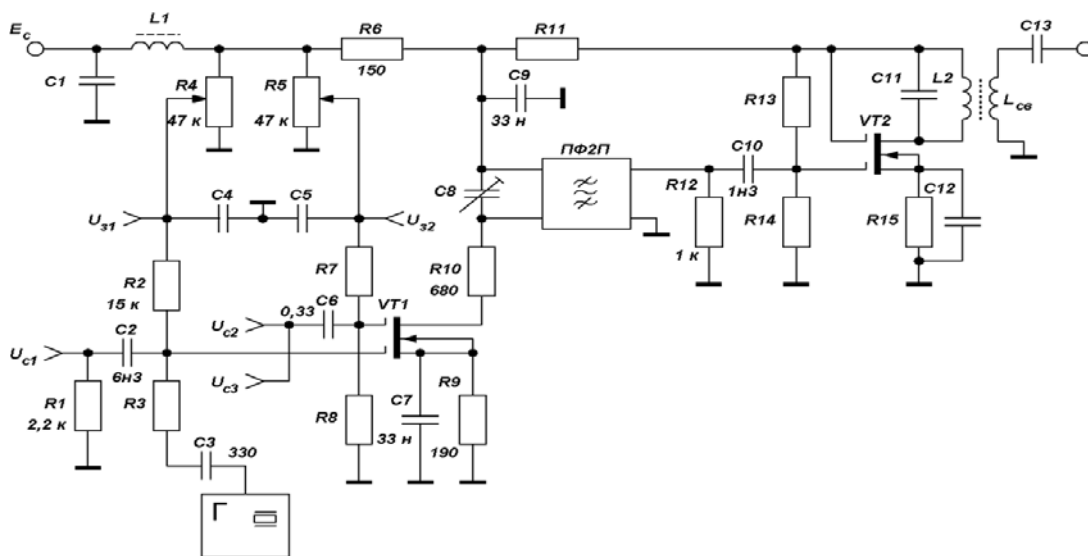


Рис. 4. Принципиальная схема УПЧ

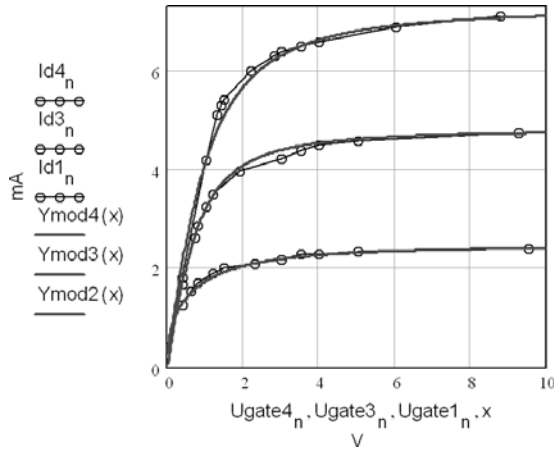


Рис. 5. ВАХ ПТ по первому затвору

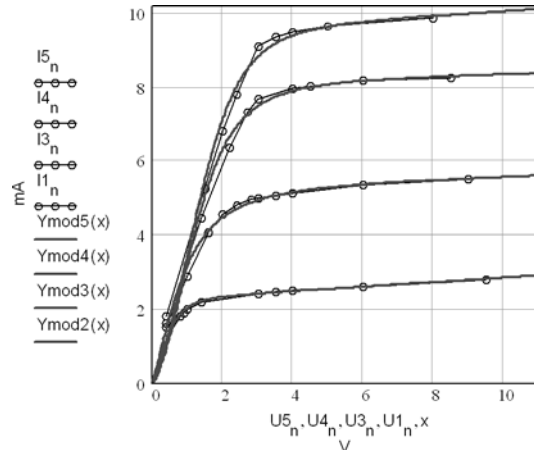


Рис. 6. ВАХ ПТ по второму затвору

$A_3 = 8,1$, $p_3 = 3,05$; $Y_{mod2} - Y_{20} = 0,055$; $B_2 = 2,2$, $S_2 = 2,9$, $A_2 = 9,5$, $p_2 = 3,7$.

Из рис. 5 и 6 следует, что свойства квадратичности ВАХ по каждому из затворов не наблюдается, как это было принято считать ранее, например в [4]. Этим и объясняется присутствие в спектре отклика УПЧ КК выше второго порядка [28].

На рис. 7 приведены графики АХ УПЧ: точечная кривая – эксперимент, а сплошная – аппроксимация; прямая линия – АХ идеального линейного ПЧ. Для ее моделирования использовалась ФДН $Y_{mod}(x)$ (3) с набором параметров: $Y_0 = 0$; $A = 2,35$; $p = 2,5$; $S = 2,35$; $B = 600$. Определение параметров ФДН осуществлялось с помощью методики [8]. Точность моделирования АХ – не ниже 0,9 %.

На рис. 8 приведены нормированные (относительно нормы воздействия) зависимости амплитуд КК первых трех порядков на выходе кварцевого фильтра: точечные кривые – результаты эксперимента, а непрерывные зависимости получены расчетным путем с применением ФДН (3), модели [16] и метода анализа спектра отклика на воздействие (1) [14].

Графики 1–3 (зависимости $dB_{1n} = F(U_{1n})$, $dB_{2n} = F(U_{2n})$, $dB_{4n} = F(U_{4n})$) соответствуют КК вида $f_1 - f_r$, графики 4–6 (зависимости $dB_{6n} = F(U_{6n})$, $dB_{12n} = F(U_{12n})$, $dB_{13n} = F(U_{13n})$) – КК вида $f_1 + f_2 \pm f_r$, а графики 7–9 (зависимости $dB_{8n} = F(U_{8n})$, $dB_{10n} = F(U_{10n})$, $dB_{11n} = F(U_{11n})$) – КК вида $f_1 - f_2$. Нумерация графиков соответствует их расположению сверху вниз. Режим ПТ по постоянному току определяется следующими величинами: $E_{31} = 0,85$ В, $E_{32} = 0,85$ В; ток стока $I_c = 1$ мА. Частота гетеродина $f_r = 1,344$ МГц.

Частоты компонент двухтонового сигнала равны: при преобразовании «вверх» – $f_{b1} = 995$ кГц, $f_{b2} =$

$= 161$ кГц, при преобразовании «вниз» – $f_{n1} = 1995$ кГц, $f_{n2} = 1849$ кГц.

Центральная частота фильтра $f_0 = 2,5$ МГц. Приведенные характеристики для КК вида $f_{пч} = f_{b1} + f_{b2} + f_r$ и $f_{пч} = f_{n1} + f_{n2} - f_r$ отличаются по амплитуде менее чем на 3,5 %, что позволяет рассматривать УПЧ в режиме безынерционного нелинейного преобразования. Граничная частота по крутизне f_s для ПТ лежит в диапазоне нескольких сот МГц.

Соответствие приведенных экспериментальных и теоретических результатов, характеризующих режим УПЧ, и отсутствие нулевых значений в графиках нормированных зависимостей КНИ, использующих КК третьего порядка в моделях НЭ на основе ФДН (3), подтверждает корректность применения предложенной математической модели, параметры которой рассчитывались на основе КУДН с помощью метода [8] и с учетом условий теоремы [9].

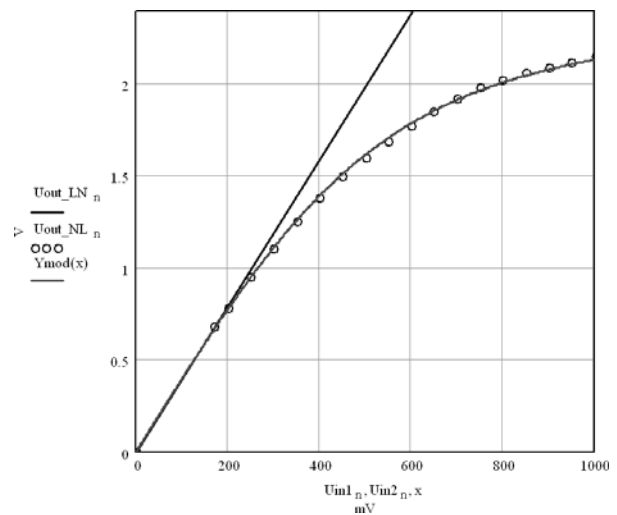


Рис. 7. Амплитудная характеристика УПЧ

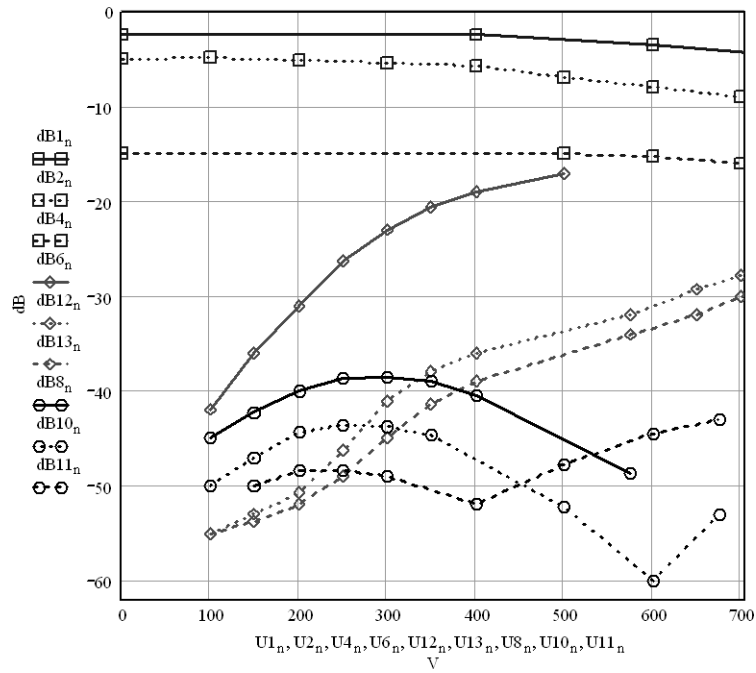


Рис. 8. Нормированные зависимости амплитуд КК 2-го и 3-го порядка

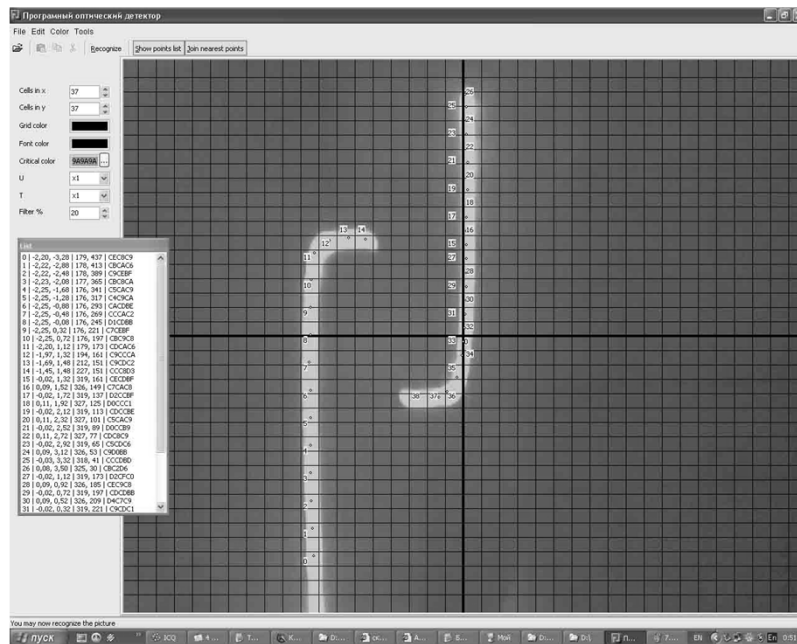


Рис. 9

В качестве заключительных примеров, подтверждающих эффективность моделирования динамических характеристик более сложных структур и устройств с помощью ФДН, приведем экспериментальные и аппроксимированные характеристики ОМДХ негаваристора [29] (рис. 9) и одного из вариантов схемы аттрактора Л. Чуа [30] (рис. 10).

На рис. 9 приведена экспериментальная ОМДХ (сплошная линия на экране осциллографа) и ее аппроксимация ФДН вида (3) (точечная кривая) для схемы негаваристора N -вида на негатроне R -типа [29].

На рис. 10 приведены изображения экспериментальной ОМДХ (сплошная линия на экране осциллографа) и ее аппроксимации трехсегментным графиком

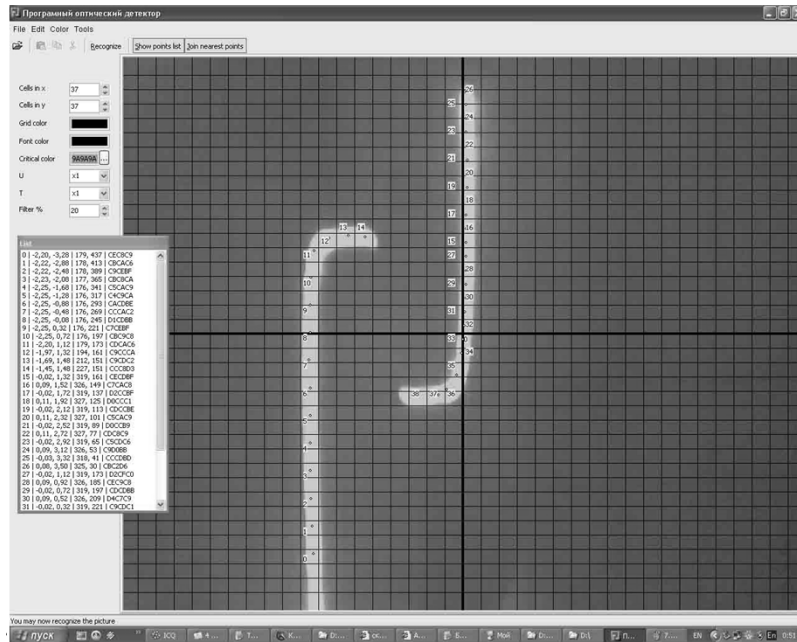


Рис. 10

ФДН вида (3) (точная кривая) для одной из схем трактора Л. Чуа [30]. Точечные кривые на рис. 9 и 10 получены с помощью специально разработанной программы цифровой обработки изображений.

Необходимо отметить, что теоретические и экспериментальные основы предложенной КУДН не претендуют на исчерпывающую полноту, хотя краеугольный камень их уже заложен. КУДН не противоречит подходу к моделированию негармонических процессов в энергетике на основе геометрического представления, изложенному в работе [5]. В то же время, даже приведенные примеры с исчерпывающей полнотой демонстрируют высокие потенциальные возможности предлагаемой КУДН для исследования и моделирования микрорелектронных НИЦ и систем в условиях многочастотного полиамплитудного воздействия.

ВЫВОДЫ

1. На основе математического аппарата ФРВГ и ФДН предложена обобщающая концепция управляемого динамического насыщения для отображения, моделирования и исследования режимов микрорелектронных активных компонентов, структур, устройств, принадлежащих к классам нелинейных неконвергентных цепей, на основе системного информационного подхода в условиях действия многочастотных сигналов с широким ДД. На ряде примеров состоятельность концепции подтверждена как с математической точки зрения, так и на феноменологическом уровне.

2. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является то, что использование ФДН, параметры которых могут быть определены непосредственно из эквивалентной схемы исследуемого объекта, позволяет целенаправленно изменять его характеристики в соответствии с выбранным критерием качества.

3. Предложенная концепция имеет перспективы широкого применения и развития, поскольку позволяет с единых позиций подходить к исследованию как сложных процессов преобразования информационных сигналов нелинейными объектами различной физической природы, так и взаимодействия волновых процессов с веществом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : в 2 т. : пер. с франц. / Ж. Макс. – М. : Мир, 1983. – 2 т.
2. Голяницкий И. А. Математические модели и методы в радиосвязи / под ред. Ю. А. Громакова / И. А. Голяницкий. – М. : Эко-трендз, 2005. – 440 с. : ил.
3. Сверкунов Ю. Д. Идентификация и контроль качества нелинейных элементов радиоэлектронных систем (спектральный метод) / Ю. Д. Сверкунов. – М. : Энергия, 1975. – 96 с. : ил.
4. Богданович Б. М. Методы нелинейных функционалов в теории электрической связи / Б. М. Богданович, Л. А. Черкас, Е. В. Задедюрин, Ю. М. Вувуникян. – М. : Радио и связь, 1990. – 280 с.
5. Горбачев М. Н. Новая концепция развития теории математического моделирования негармонических электроэнергетических процессов в управляемых электрических и радиотехнических цепях и системах на основе геометрических представлений / М. Н. Горба-

- чев, А. Д. Милка // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2002. – № 2. – С. 134–138.
6. Гулін С. П. Анализ спектра отклика нелинейности, представленной аналитической трансцендентной функцией, на многочастотное воздействие большой нормы / С. П. Гулін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2004. – № 1. – С. 21–28.
 7. Чуа Л. О. Машинный анализ электронных схем : алгоритмы и вычислительные методы : пер. с англ. / Л. О. Чуа, Пен-Мин Лин. – М.: Энергия, 1980. – 640 с. : ил.
 8. Гулін С. П. Определение параметров адаптивной модели нелинейных компонентов, представленной аналитической трансцендентной функцией, на основе экспериментальных характеристик / С. П. Гулін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2005. – № 2. – С. 25–32.
 9. Гулін С. П. Условия применимости модели динамического насыщения в задачах анализа спектра отклика нелинейных устройств / С. П. Гулін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2005. – № 2(14). – С. 21–28.
 10. Гулін С. П. Аппроксимация нелинейных зависимостей аналитической трансцендентной функцией высшего порядка / С. П. Гулін, А. С. Гулін. // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», сентябрь 19–23, МРФ–2005 : сб. научн. тр. Т. 5. СВЧ и оптоэлектроника. – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – С. 121–124.
 11. Шустов М. А. Кинетика и формулировки законов фотохимических превращений / М. А. Шустов // Известия Томского политехнического института. – 2001. – Т. 304, вып. 1. – С. 117–122.
 12. Бойченко А. П. Основы газоразрядной фотографии / А. П. Бойченко, М. А. Шустов. – Томск : STT, 2004. – 312 с.
 13. Шустов М. А. Приборы, методы и среды регистрации и обработки информации на основе бистабильных и промежуточных состояний [Электронный ресурс] : дис. ... доктора техн. наук : 01.04.01 : защищена 14.06.07 : утв. 18.01.08 / Шустов Михаил Анатольевич. – Электрон. дан. – М. : РГБ, 2007. – 286 с. : ил. Режим доступа: <http://diss.rsi.ru/07/0806/070806026.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
 14. Гулін С. П. Анализ спектра отклика нелинейности, представленной функцией динамического насыщения, при многочастотном воздействии / С. П. Гулін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 1. – С. 31–37.
 15. Гулін С. П. Расчет спектра отклика нелинейности, представленной логарифмической функцией динамического насыщения, при многочастотном воздействии // С. П. Гулін, А. С. Гулін // Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 373–376.
 16. Gulin S. P. Generalized model of radio engineering link on basis principle of the guided run-time saturation / S. P. Gulin, A. S. Gulin. // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку (УНДІЗ). – 2009. – № 4(12). – С. 52–58.
 17. Гулін С. П. Характеризация резистивных нелинейных элементов на основе концепции управляемого динамического насыщения / С. П. Гулін, А. С. Гулін. – Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 31–37.
 18. Гулін С. П. Характеризация реактивных нелинейных элементов на основе концепции управляемого динамического насыщения / С. П. Гулін // Радиотехника. – 2010. – № 161. – С. 131–142.
 19. Гулін С. П. Расчет числа компонент установившегося отклика нелинейной инерционной цепи на многочастотное воздействие, содержащее постоянную составляющую / С. П. Гулін, А. М. Гулін. – Радиотехника. – 2010. – № 162. – С. 66–77.
 20. Гулін С. П. Метод анализа установившегося многочастотного режима конвергентной нелинейной цепи на основе функционального ряда Вольтерры – Гаусса и функций динамического насыщения / С. П. Гулін. – Радиотехника. – 2010. – № 163. – (в печати).
 21. Устройство для измерения многомерных передаточных функций высокочастотных узкополосных нелинейных систем : а. с. № 1532887 СССР : МКВ 5G 01 R 27/28 / Б. И. Ивлев, С. Ю. Матвеев, В. Р. Снурницын, С. В. Трушин (СРСР). – Заявл. 12.04.88 ; опубл. 30.12.89, Бюл. № 48. – 11 с.
 22. Устройство для измерения многомерных передаточных функций нелинейных систем : а. с. № 1626199 СССР, МКВ 5G 01 R 27/28 / Б. И. Ивлев, С. Ю. Матвеев, В. Р. Снурницын, С. В. Трушин (СРСР). – Опубл. 07.02.91, Бюл. № 5. – 8 с.
 23. Пристрій для визначення N -вимірних характеристик нелінійних систем : пат. 88065 Україна : МПК₈ G01 R 27/28 // С. П. Гулін, О. С. Гулін, В. П. Дмитренко, Д. М. Піза ; заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – Заявл. 26.10.2007 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17. – 16 стр.
 24. Пристрій для визначення параметрів N -вимірних функцій високочастотних вузькосмугових нелінійних систем : пат. 47356 Україна : МПК₇ G01 R 27/28 / С. П. Гулін, О. С. Гулін, В. П. Дмитренко ; заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – Заявл. 25.08.2009 ; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2. – 20 стр.
 25. Богатырев Е. А. Структурное отождествление макромоделей микрорезонаторных устройств / Е. А. Богатырев, С. П. Гулін // Радиотехника. – 1985. – № 6. – С. 39–42.
 26. Гулін С. П. Параметрична ідентифікація лінійного $2N$ -полосника в частотній області із застосуванням розгалуженого дробу / С. П. Гулін, О. С. Гулін // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», сентябрь 19–23, МРФ–2005 : сб. научн. тр. Т. 3. Информационные технологии и сети. – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – С. 251–254.
 27. Грибов Э. Б. Нелинейные явления в приемопередающем тракте аппаратуры связи на транзисторах / Э. Б. Грибов. – М. : Связь, 1971. – 368 с.
 28. Бобков А. М. Аппроксимация характеристик нелинейного безынерционного элемента / А. М. Бобков, Н. Н. Яковлев // Радиотехника. – 1986. – № 5. – С. 25–26.
 29. Гулін С. П. Экспериментальное исследование характеристик двухтранзисторного эквивалента R -негатрона N -типа для систем передачи информации с хаотической несущей / С. П. Гулін, А. С. Гулін // Тезиси V Международной научно-технической конференции «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології», 5–9 жовтня 2009 р., COMINFO «2009-Livadia». – Ливадия, 2009. – С. 69–70.
 30. Chua L. O. Panoramic views of strange attractors (display instrument) / L. O. Chua, T. Sugawara // Proceedings of the IEEE. – Aug. 1987. – Vol. 75, No. 8. – Pp. 1107–1120.

Надійшла 21.01.2010
Після доробки 08.04.2010

Гулін С. П., Гулін О. С., Дмитренко В. П., Піза Д. М.

КОНЦЕПЦІЯ КЕРОВАНОВОГО ДИНАМІЧНОГО НАСИЩЕННЯ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ БАГАТОЧАСТОТНИХ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ, СТРУКТУР І ПРИСТРОЇВ

На основі математичного апарату функціональних рядів Вольтерри – Гаусса (ФРВГ) і функцій динамічного насичення (ФДН) запропоновано концепцію керованого динамічного насичення, що реалізує узагальнений підхід до дослідження і моделювання микрорезонаторних нелінійних інерційних ланцюгів і систем (НІЛС) в умовах багаточас-

тотної поліамплітудної дії. На низці прикладів обґрунтованість запропонованої концепції підтверджена як з математичної, так і з фізичної точки зору.

Ключові слова: Нелінійні інерційні ланцюги і системи, концепція керованого динамічного насичення, функціональні ряди Вольтерри – Гаусса, узагальнена миттєва динамічна характеристика, усталений відгук, багаточастотна поліамплітудна дія.

Gulin S. P., Gulin A. S., Dmitrenko V. P., Piza D. M.

CONCEPT OF CONTROLLED DYNAMIC SATURATION FOR MODELING MULTIFREQUENCY STEADY STATE MODES OF MICROELECTRONIC COMPONENTS, STRUCTURES AND DEVICES

The authors propose the concept of controlled dynamic saturation based on the body of mathematics of Volterra – Gauss functional series and dynamic saturation functions, which realizes a generalized approach to investigation and modeling of microelectronic nonlinear inertial circuits and systems in conditions of multifrequency polyamplitude influence. A number of examples prove validity of the proposed concept from both mathematical and physical standpoint.

Key words: nonlinear inertial circuits and systems, concept of controlled dynamic saturation, Volterra – Gauss functional series, generalized instantaneous dynamic characteristic, steady-state response, multifrequency polyamplitude influence.

УДК 621.3.049

Жавжаров Є. Л.¹, Матюшин В. М.²

¹Канд. фіз.-мат. наук, доцент Запорізького національного технічного університету
²Д-р фіз.-мат. наук, професор Запорізького національного технічного університету

ВПЛИВ АТОМАРНОГО ВОДНЮ НА СТРУКТУРИ МЕТАЛ – НАПІВПРОВІДНИК. АДГЕЗІЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК

Досліджено вплив атомарного водню на зміну властивостей тонкоплівкових структур Cu-Si. Структури на основі тонких (20–500 нм) плівок міді піддавалися дії атомарного водню при концентраціях 10^{14} – 10^{19} м⁻³. Показано, що при такій взаємодії відбувається низькотемпературне відновлення оксиду міді, підвищуються адгезія та когезія плівок міді до підкладок Si.

Ключові слова: тонкі плівки, напівпровідник, кремній, атомарний водень, рекомбінація, адгезія, дифузія.

ВСТУП

Однією з проблем, що існують в тонкоплівковій технології мікро- та нанoeлектроніки, є адгезія плівок. Найпростішим способом збільшення адгезії є очищення поверхні підкладок від забруднюючих домішок. Адгезія підсилюється, якщо при контакті утворюється хімічний зв'язок або відбувається взаємна дифузія матеріалів.

Для досягнення високої адгезії застосовують різні методи, наприклад, між підкладкою і плівкою наносять спеціальні шари, що мають високий потенціал взаємодії як з підкладкою, так і з плівкою [1]. У якості підшарів в кремнієвій технології найчастіше використовують титан, хром і ванадій. У роботі [2] для підвищення адгезії плівок нікелю до кремнію запропоновано метод акустичної стимуляції, що дозволило збільшити адгезію на третину порівняно із стандартним методом осадження з газової фази. Для підвищення адгезії плівок використовують відпал, що ініціює дифузійні процеси на межі розділу [3], а також складні багатостадійні процеси [4], необхідні для

зміни та поліпшення їх фізичних, електричних та електрофізичних параметрів. Використання відпалу, дії частинок високих енергій [5] може супроводжуватися виникненням ряду негативних явищ, таких як перерозподіл вже введеної домішки в сусідніх ділянках, дифузія фонових домішок на велику глибину, виникнення і зростання паразитних плівок, виникнення значних механічних напруг на гетеромежі. При використанні частинок високих енергій у приповерхневих шарах може виникати і залишатися значна кількість дефектів.

Тому актуальним є створення альтернативних технологій підвищення адгезії плівок широкого кола металів до напівпровідникових підкладок.

Одним з перспективних напрямів, що дозволяють проводити цілеспрямовану зміну властивостей поверхні, є дія на неї активних газових часток, зокрема атомарного водню. Поверхня, будучи центром рекомбінації атомарного в молекулярний водень, виявляється під дією енергії, що виділяється при цьому

© Жавжаров Є. Л., Матюшин В. М., 2010