

5. Выводы

Научная новизна данной работы заключается в том, что в декартовой системе координат численное решение уравнения Пуассона конечно-разностным неявным итерационным методом находится быстрее, чем в цилиндрической системе координат при соизмеримом числе узлов соответствующих сеток. Представлены расчётные зависимости, которые дают количественную оценку скорости счёта при заданной дискретности сетки в обеих системах координат.

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности ускорения расчётов распределения потенциала, создаваемого электродами практически любой геометрии. В частности, результаты работы были использованы при моделировании электронных пучков в магнетронных пушках.

Сравнение использованного метода решения уравнения Пуассона с аналогичными методами показывает преимущество выбранного, поскольку он требует меньше оперативной памяти, которая ограничена.

Литература: 1. *Поттер Д.* Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 391 с. 2. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с. 3. *Молоковский С.И., Сушков А.Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. Ленинград: Энергия, 1972. 270 с. 4. *Волкову*

пов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Красноголовец М.А., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным металлическим катодом // ЖТФ, 2001, Т.71, №9. С.134-136. 5. *Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М.* Динамика нарушения магнитной изоляции и самоорганизация электронного потока в магнетронном диоде // ЖТФ. 2004. Т.74, №1. С.93-103.

Поступила в редколлегию 11.03.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Стасев Ю.В.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: Методы математического моделирования, СВЧ электроника и электродинамика, оптоэлектроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-057.

Старчевский Юрий Львович, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: физика электронных пучков, программирование, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 32-49-19.

Лебедев Олег Григорьевич, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры №304 ХИ ВВС. Научные интересы: радиолокация и навигация, аэродромное оборудование. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Клочковская, 228. тел. 30-82-14.

Новиков Николай Иванович, канд. военных наук, зам. начальника факультета по учебной и научной работе ХИ ВВС. Научные интересы: радиосвязь. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Клочковская, 228.

УДК 621.375.9

СЛОЖНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРОСТЫХ СИСТЕМ С S-ОБРАЗНОЙ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

*ЛОШИЦКИЙ П.П., НИКОЛОВ Н.А.,
АЛЬ СИНЖЛАВИ Ш.*

Рассматриваются преобразователи стохастичности, построенные на электронных приборах с S-образной вольтамперной характеристикой. Показывается, что для генераторов, построенных на таких элементах (ЛПД, неоновая лампа, динистор), возможна реализация перехода к хаосу по сценарию, связанному с инерционностью основных параметров активного элемента.

Явление хаотизации динамических процессов в детерминированных нелинейных системах, которое совсем недавно казалось невероятным в рамках традиционных взглядов теории колебаний, в настоящее время представляет собой не только хорошо теоретически обоснованный факт, но и получило широкое практическое применение.

Одной из областей такого применения детерминированного хаоса является создание генераторов стохастичности. Основное их отличие от обычных генераторов шума заключается в следующем. В генераторах шума имеется первичный источник

шума, случайный сигнал которого требует достаточно большого усиления, что ограничивает область его применения. В генераторах стохастичности первичный источник используется для управления регулярными колебаниями большой амплитуды, преобразуя их в стохастические. При этом генераторы стохастичности создают столь сложные динамические колебания, что они мало отличаются от шумового сигнала. Таким образом, отличия генераторов шума от генераторов стохастичности заключаются не только в величине выходной мощности сигнала, но и в механизмах его реализации [1]. В теории детерминированного хаоса генераторы стохастичности нестрого делят на преобразователи, усилители и генераторы стохастичности.

Для преобразователей стохастичности источниками первичной случайности могут быть микроплазмы в твердотельных приборах, флуктуации параметров в вакуумных приборах, а также различные инерционные процессы.

Флуктуации оказывают относительно слабое влияние на устойчивые системы, имеющие малые отношения рабочей поверхности к объему активного элемента и работающие в частотных диапазонах, далеких от частоты (времени) релаксации флуктуаций. В неустойчивых системах рабочие частоты соизмеримы с частотами релаксации флуктуаций, и развитые поверхности последних играют решающую роль в работе прибора, качественно меняя его параметры.

Целью данной работы является исследование преобразователей стохастичности на активных элементах, имеющих S-образную вольтамперную характеристику (ВАХ) и обладающих инерционностью основных параметров этих элементов; определение механизмов перехода к хаосу.

Среди простых усилителей и генераторов детерминированного хаоса в основном используются стохастические автоколебательные системы с активным элементом, имеющим N-образную ВАХ, в частности туннельный диод [2]. Обычно это трехточечный генератор, нагруженный на один или несколько туннельных диодов. Качественно работа такого генератора представляется следующим образом. Пока ток и напряжение на туннельном диоде малы, диод представляет собой омическое сопротивление и не оказывает существенного влияния на колебания в контуре, постепенно нарастающие. Когда ток на диоде достигает критического значения, соответствующего максимальному значению

тока ($\frac{dI}{dU} = 0$) на первой ветви N-образной вольтамперной характеристики, происходит мгновенное переключение диода на другую ветвь N-образной характеристики и устанавливается напряжение, соответствующее той же величине тока. Затем ток через туннельный диод уменьшается, и происходит его обратное переключение на ветвь вольтамперной характеристики с установлением малого тока и напряжения. В результате двух переключений диод почти полностью поглощает поступающую в контур энергию, и колебания начинают снова нарастать. Таким образом, генерируемый сигнал представляет собой последовательность цугов нарастающих колебаний. Будут ли установившиеся колебания периодическими или стохастическими, зависит от параметров схемы, в том числе и от того, что с уменьшением последовательного с туннельным диодом омического сопротивления увеличивается инкремент колебаний и уменьшается длительность цуга — в спектре сглаживаются пики на частотах повторения цугов. Практическая реализация стохастического сигнала в устройствах на туннельных диодах весьма проста, в то время как теоретический анализ, т.е. расчет номиналов схемы, представляет собой значительные трудности.

Представляет интерес исследовать возникновение стохастических колебаний при использовании приборов с S-образной характеристикой, особенно учитывая тот факт, что эти приборы имеют значительные собственные шумы [3].

Известно применение приборов с S-образными характеристиками (лавинно-пролетный диод, неоновая лампа) для реализации стохастических колебаний [4]. Однако до настоящего времени не исследованы фазовые портреты таких приборов и их связи с колебательными спектрами, позволяющие определить механизм возникновения стохастичности. В настоящей работе проведено исследование изменения фазовых портретов и колебатель-

ных процессов от изменения положения рабочей точки на обратной ветви вольтамперной характеристики ЛПД для преобразователей стохастичности на низких частотах, а также предложены механизмы перехода детерминированной системы к хаотическому режиму.

Квазистатические параметры обратной ветви вольтамперной характеристики ЛПД имеют сильную зависимость от температуры эффективного дифференциального сопротивления p-n перехода [3].

При изменении тока через диод меняется дифференциальное сопротивление диода, которое зависит от наличия микроплазм, изменения температуры p-n перехода, от приложенного переменного тока.

Температура ЛПД, от которой зависит дифференциальное сопротивление диода, определяется проходящим током (I), пробивным напряжением ($U_{\text{проб}}$) и тепловым сопротивлением диода (R_T):

$$T = R_T U_{\text{проб}}(T) I,$$

при этом пробивное напряжение зависит от температуры линейно [3]:

$$U_{\text{проб}}(T) = U_{\text{проб}}(T_0)[1 + b(T - T_0)],$$

где $b \approx 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ — температурный коэффициент.

Для качественного рассмотрения процесса изменения температуры достаточно предположить, что она складывается из температуры окружающей среды T_0 и температуры T , связанной с нагревом диода при прохождении через него токов: постоянного ($I_{\text{с}}$) и синусоидального ($\Delta I \sin(pt)$); а процесс охлаждения соответствует закону Ньютона.

Изменение температуры нагрева (T) диода описывается уравнением:

$$mc \dot{T} + kT = R_T U_{\text{проб}}(T_0)[1 + b(T - T_0)](I_{\text{с}} + \Delta I \sin pt), \quad (1)$$

где m — эффективная масса перехода и теплоотвода; c — эффективная теплоемкость; k — ньютоновский коэффициент теплопередачи.

Решение уравнения (1) при $t \gg \tau$ ($\tau = mc/k$ — постоянная времени установления температуры диода) представляет собой выражение:

$$T = (1 - bT_0) \left[\frac{I_{\text{с}}}{\alpha - bI_{\text{с}}} + \Delta I \frac{A}{\alpha^2 + p^2} \left\{ \sin(pt) - \frac{p}{a} \cos(pt) \right\} \right],$$

в котором введены обозначения:

$$\alpha \equiv \frac{k}{R_T U_{\text{проб}}(T_0)}; \quad A \equiv \frac{R_T U_{\text{проб}}(T_0)}{mc};$$

$$a \equiv AbI_{\text{с}} - \frac{1}{\tau}.$$

Из приведенных выражений следует, что на очень низких и на очень высоких частотах температура и соответственно дифференциальное сопротивление

p-n перехода будут постоянны в течение времени, но иметь различные числовые значения. На промежуточных частотах ($\tau^{-1} \approx p$) и температура, и дифференциальное сопротивление со временем меняются, что и приводит к петлям дифференциального сопротивления [3].

В эксперименте использовались ЛПД без массивных теплоотводов, что позволяло увеличить постоянную времени установления температуры диода до величины $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$ с. Данная величина оценивалась теоретически и проверялась экспериментально по частотной зависимости $R_d = R_d(p)$. Значение промежуточных частот для таких ЛПД составляло 2,5÷5 кГц.

Схема измерения фазовых портретов и колебательных процессов от тока, проходящего через диод, для преобразователя стохастичности представлена на рис. 1, где 1 – генератор стандартных сигналов; 2 – осциллограф; Д – ЛПД; С – разделительная емкость.

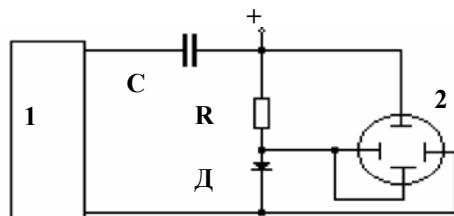


Рис. 1.

На горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа подавалось напряжение, соответствующее напряжению на диоде, а на вертикальные – напряжение, пропорциональное току диода $U_2 = IR$. Генератор стандартных сигналов использовался для обеспечения синусоидального сигнала заданной частоты $f = 3$ кГц. Параметры корпусного ЛПД (резонансная частота корпуса 37 ГГц) задавались постоянным током, подаваемым от источника тока. Цепи постоянного и переменного тока разделялись емкостью С. Характеристики, получаемые на осциллографе, фотографировались. На рис. 2 приведены фотографии эволюции траекторий, изображающие точки в пространстве состояний системы, которую в дальнейшем для краткости будем называть «фазовым портретом» выходного сигнала. Фотографии на рис. 2, а соответствуют случаю, когда на ЛПД не подается постоянный ток ($U_0 = 0$; $I_0 = 0$). Для переменного сигнала диод представляет большое омическое сопротивление. При постоянном смещении диода, равному пробойному напряжению, и при отсутствии постоянного тока ($U_0 = 30$ В; $I_0 = 0$) переменный сигнал создает условия для развития микроплазм, которые не только видны на фазовом портрете, но и несколько искажают форму выходного сигнала (рис. 2, б). Увеличение постоянного тока диода до $I_0 = 4$ мА смещает рабочую точку диода по дифференциальному сопротивлению, которое зависит от температуры, и, так как тепловая инерционность диода при малых токах меньше периода синусоидального сигнала, диффе-

ренциальное сопротивление для $I_0 + \Delta I_0$ и $I_0 - \Delta I_0$ будет разным. Другими словами, дифференциальное сопротивление расщепляется на два значения, что приводит к появлению двух эллипсов на фазовом портрете и соответственно двух сигналов на выходе (рис. 2, в). Особенности теплоотвода данного ЛПД оказались такими, что увеличение тока через диод и соответственно температуры p-n перехода приводит к уравниванию тепловых потоков и изменению дифференциального сопротивления, которое в данном интервале температур не расщепляется (рис. 2, г) при $I_0 = 10$ мА. Такой температурный баланс начинает меняться при $I_0 = 32,3$ мА. Происходит не только расщепление дифференциального сопротивления, но и образующие петли имеют участки отрицательного наклона. Фазовый портрет представляет собой границы более устойчивые состояния и промежуточные быстро меняющиеся состояния, однако колебания сигнала только раздвоены, но не размазаны (рис. 2, д). Малейший сдвиг теплового баланса в сторону повышения температуры увеличивает составляющую с отрицательным наклоном дифференциального сопротивления, и вся система становится неустойчивой в окрестности рабочей точки. Фазовый портрет и колебания становятся шумовыми. На фазовом портрете наблюдается «странный аттрактор» – шумовое образование в ограниченной окрестности (рис. 2, е), $I_0 = 32,5$ мА. Повышение постоянного тока до величины $I_0 = 42$ мА делает тепловой режим устойчивым, при этом разогрев p-n перехода столь значителен, что изменения, связанные с переменной составляющей, становятся настолько малыми, что не сказываются на параметрах диода, т.е. пробивное напряжение и дифференциальное сопротивление диода становятся зависимыми только от постоянного тока. Устройство переходит в режим усилителя гармонического сигнала.

Рассмотренная простейшая схема обладает инерционностью, которая связана с тепловым режимом ЛПД. Именно наличие такой инерционности и связанной с ней особенности дифференциального сопротивления обратного смещенного p-n перехода (образование петель с отрицательным наклоном) позволяет реализовать преобразователь стохастичности.

Другим примером простой схемы усилителя стохастичности на активном элементе с S-образной характеристикой является схема релаксационного генератора на неоновой лампе (или динисторе) с введенной дополнительной R_1C_1 -цепью, параллельной активному элементу Д [5] (рис. 3.). Основным условием преобразования и усиления собственных флуктуаций активного элемента, обуславливающих изменения величины пробивного напряжения в пределах 10%, является равенство времени инерционности переключения активного элемента τ и времени срабатывания каждой из RC-цепочек $R_0C_0 \approx R_1C_1 \approx \tau$. В настоящей работе проведены экспериментальное и теоретическое исследования данной схемы. Необходимость таких исследований вытекала из того, что в указанной

схеме вместо неоновой лампы ИНТ, имеющей пробивное напряжение 85-95В, использовался ди-нистор, позволяющий работать при напряжениях порядка 20В. Экспериментальные результаты качественно не отличаются от результатов, полученных в [6].

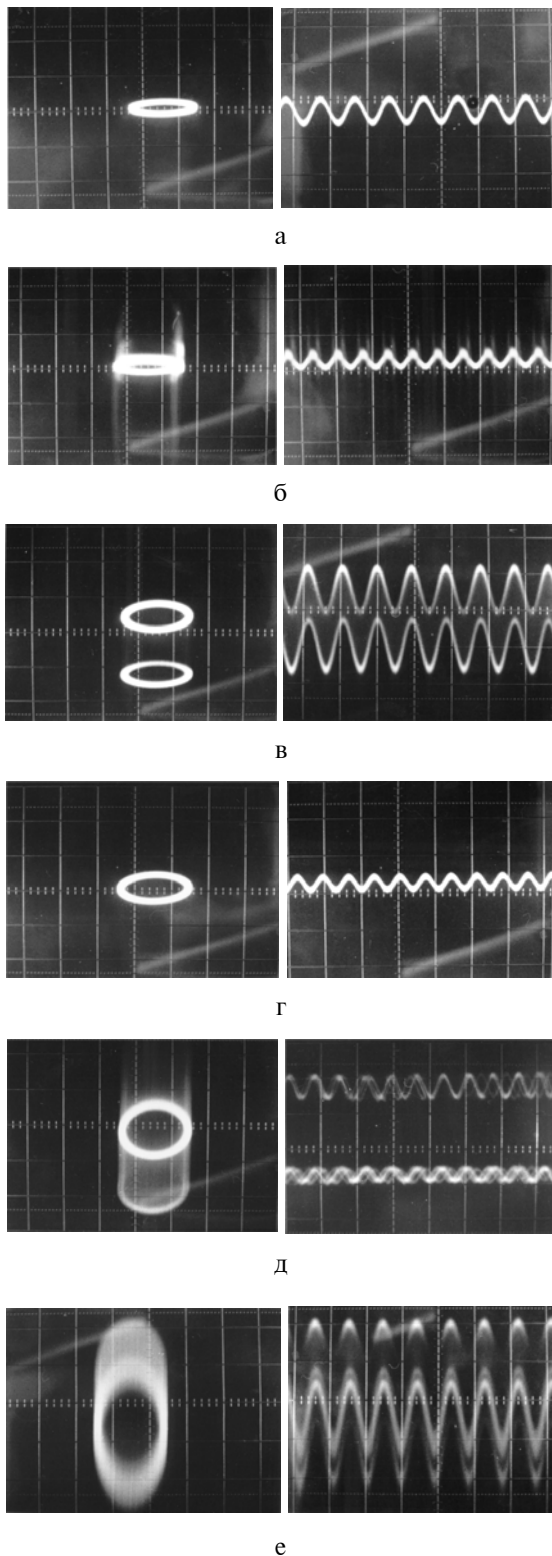


Рис. 2

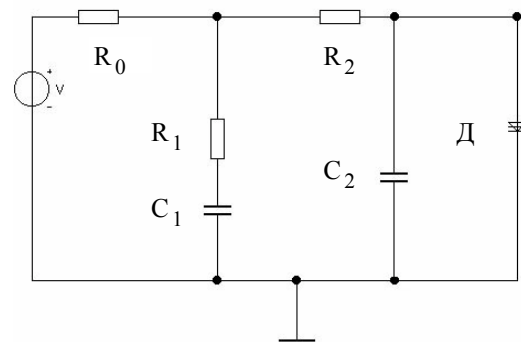


Рис. 3.

В целях теоретического анализа условий работы преобразователя стохастичности были оценены решения системы дифференциальных уравнений, аналогичные [6], имеющие следующий вид:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + A \frac{dU_c}{dt} + B \cdot U_c = U_0 B \quad (\text{при } U_{\text{проб}} \geq U_c), \quad (2)$$

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \left(A + \frac{1}{C_0 R_{\text{нэ}}} \right) \frac{dU_c}{dt} + B \left(1 + \frac{R_0 + R_1}{R_{\text{нэ}}} \right) \cdot U_c = U_0 B \quad (\text{при } U_c > U_{\text{проб}}), \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{a} \left(\frac{R_0 + R_2}{C_1} + \frac{R_0 + R_1}{C_2} \right),$$

$$a = R_0(R_2 + R_1) + R_2 R_1, \quad B = \frac{1}{a C_1 C_2}.$$

Решение уравнений (2),(3) производилось методом Рунге-Кутты 4 порядка в системе MatLab 6.0. Случайная составляющая $U_{\text{проб}}$ изменялась по равномерному закону распределения, амплитуда которой затухала по экспоненциальному закону с течением времени одного периода колебаний, что моделировало инерционные особенности активного элемента.

Для оценки стохастичности колебаний рассматривалась топологическая энтропия [1] и среднеквадратические отклонения периода и амплитуды колебаний. Топологическая энтропия отображает наличие стохастичности при ее значении больше 0, она рассчитывалась на основе формулы:

$$h = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\ln N}{t},$$

где h – топологическая энтропия; N – количество траекторий; t – время; ε – окрестность фазовой траектории.

В реальном численном эксперименте машинное время ограничивалось 50 периодами колебаний. Такое ограничение связано с достаточно малым шагом по времени решения уравнений ($\Delta t = 10^{-4}$ при $t_{\text{max}} = 15 \div 18$ мин) и, как следствие, ограничением машинных ресурсов. Так как количество траекторий зависит от периода колебательного процесса, время нормировалось на средний период колебаний напряжения ($T_{\text{средний}}$), который, в зависимости от

случайной составляющей амплитуды пробивного напряжения, находился в пределах от 0,01-0,3 с. Поскольку наличие стохастичности по частоте колебаний, в общем случае, не означает наличия различных амплитуд, количество фазовых траекторий выбиралось равным количеству различных периодов или различных амплитуд. Окрестность фазовой траектории выбиралась, исходя из точности численного процесса.

На рис. 4 приведены зависимости топологической энтропии для периода (сплошная кривая) и амплитуды (пунктирная кривая) от величины флуктуаций пробивного напряжения. Из рисунка видно, что уже при флуктуациях порядка 0,2В топологическая энтропия и по частоте, и по амплитуде больше нуля, следовательно, траектории сильно расходятся, т.е. режим является стохастическим.

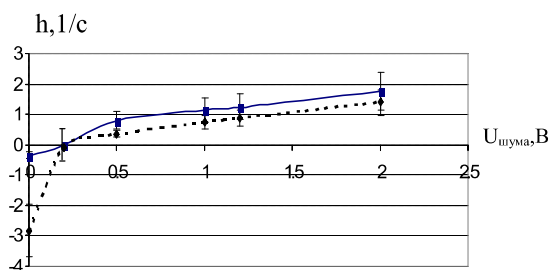


Рис. 4

На рис.5 приведены среднеквадратичные отклонения периода (ΔT) колебаний от величины флуктуации напряжения пробоя. Видно, что при малых величинах флуктуации пробивного напряжения отклонения растут, а затем достигают насыщения. Среднеквадратичные отклонения амплитуды от величины флуктуаций пробивного напряжения изменяются по другому закону. Эти отклонения амплитуды нелинейно возрастают при увеличении флуктуаций пробивного напряжения (рис.6).

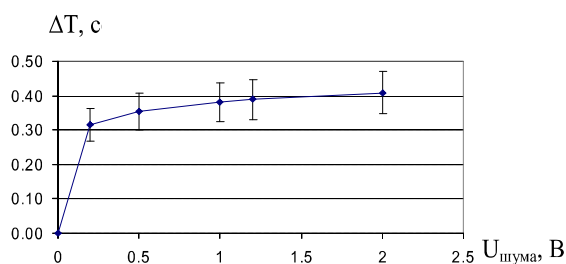


Рис. 5

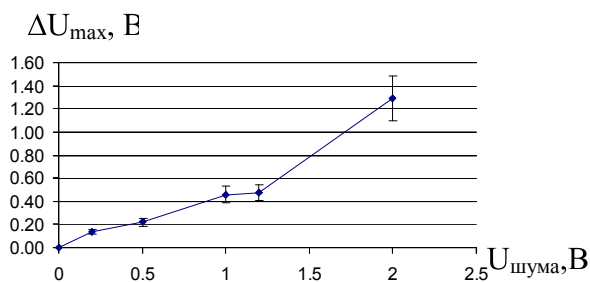


Рис. 6

Выводы

Рассмотрено два типа усилителей стохастичности на активном элементе с S-образной вольтамперной характеристикой, имеющей инерционность параметров активного элемента. В первом типе усилителя стохастичности тепловая инерционность активного элемента характеризуется сложной температурной зависимостью дифференциального сопротивления ЛПД, в результате чего синусоидальный сигнал преобразуется в стохастические колебания. Для второго типа усилителя стохастичности инерционность и флуктуации величины пробивного напряжения активного элемента также приводят к стохастизации выходных колебаний. Оба вида стохастических усилителей работают по одинаковым механизмам, и реализации их выходного сигнала подчиняются общим закономерностям: отклонения частоты очень быстро достигают насыщения, а величина отклонения амплитуды возрастает нелинейно с увеличением флуктуаций пробивного напряжения.

Литература: 1. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М: Наука, 1987. 424 с. 2. Кияшко С.А., Пиковский А.С., Рабинович Н.И. Автогенератор радиодиапазона со стохастическим поведением // Радиотехника и электроника. 1980. Т.25, №2. С.336-343. 3. Тагер А.С., Вальд-Перов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. 480 с. 4. Лошицкий П.П., Чайка В.Е. Исследование механизмов возникновения стохастических колебаний в генераторах на ЛПД // Изв. вузов, «Радиофизика», 1985. Т.28, №7. С.331-342. 5. Намаюнас А.М., Тамашевичус А.В. Автогенератор низкочастотного шума // Приборы и техника эксперимента. 1988. №2. С. 142-144. 6. Лошицкий П.П., Николов Н.А., Аль Синжлави Ш. Устройства для регулирования активности биологических объектов // Электроника и связь. 2000. №8. С.48-51.

Поступила в редколлегия 09.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Хаханов В.И.

Лошицкий Павел Павлович, д-р техн. наук, профессор кафедры физической и биомедицинской электроники НТТУ «КПИ». Научные интересы: взаимодействие электромагнитных волн с биологическими объектами. Увлечения и хобби: восточные языки. Адрес: Украина, Киев, ул. Автозаводская, 7, кв. 60, тел. (044) 432-50-80.

Николов Николай Александрович, магистр электроники, аспирант кафедры физической и биомедицинской электроники НТУУ «КПИ». Научные интересы: взаимодействие электромагнитных волн с биологическими объектами; математическая обработка изображений в медицинской радиологии. Увлечения и хобби: литературное творчество. Адрес: Украина, Киев, ул. Татарская, 2Б, кв. 5, тел. (044) 211-59-68, e-mail: nikolka_@ukr.net

Аль Синжлави Шафик, магистр электроники, соискатель кафедры физической и биомедицинской электроники НТУУ «КПИ». Научные интересы: взаимодействие электромагнитных волн крайне низких интенсивностей с биологическими объектами; математическая обработка изображений в медицинской радиологии. Адрес: Украина, Киев, ул. Выборская, 5, кв.124.