



ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СЛОЖНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОГО НЕГАТРОНА

А.А. Семёнов, Д.А. Усанов, А.А. Колокин

Представлены результаты исследования режимов работы автогенераторной системы на основе магнитоуправляемого активного двухполюсника с отрицательным дифференциальным сопротивлением и вольт-амперной характеристикой N-типа. Приведены экспериментальные графики температурных зависимостей колебательных режимов исследуемой динамической системы. Показано, что температурный режим активного полупроводникового прибора может существенным образом оказывать влияние на вид его вольт-амперной характеристики, что необходимо учитывать при анализе работы таких приборов в сложных динамических режимах.

Ключевые слова: Магниточувствительный нелинейный двухполюсник, сложные динамические режимы, нелинейная температурная зависимость, нелинейная вольт-амперная характеристика N-типа.

Приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), так называемые негатроны, находят широкое применение в радиофизических и радиотехнических системах самого широкого назначения не только в качестве основных элементов усилительных, генераторных и ключевых схем, но и как простейшие функциональные элементы, благодаря присущей им внутренней управляемой реактивности [1, 2], причем реактивность, в зависимости от типа ОДС, может иметь как индуктивный, так и емкостной характер.

В связи с этим представляет широкий практический интерес исследование нового класса таких устройств – полупроводниковых негатронов с характеристиками, управляемыми магнитным полем, поскольку приборы такого типа позволяют с помощью одного схемотехнического решения реализовать устройства различного функционального назначения [3–8]. Обладая устойчивым участком ОДС на вольт-амперной характеристике (ВАХ) в широком диапазоне частот, такие приборы демонстрируют разнообразный спектр колебательных режимов: от гармонических и релаксационных до сложнопериодических и квазипериодических [5–8]. Однако анализа их динамического поведения до сих пор проведено не было.

Результаты исследования сложного динамического поведения генератора на магнитоуправляемом двухполюснике с ОДС и ВАХ N-типа приведены нами в работе [7]. Исследование нелинейных динамических режимов работы такого генератора несомненно представляет интерес с точки зрения физической общности полученных результатов, поскольку в известных работах сложное динамическое поведение было обнаружено в режиме, когда рабочая точка находилась в припороговой области ВАХ активного прибора. Отметим, что подобные режимы наблюдались в автогенераторных системах, построенных на активных твердотельных элементах с ВАХ N-типа (диодах Ганна), в диапазоне сверхвысоких частот, где строгое исследование сложных колебательных режимов особенно затруднительно [9–16].

Исследуемый генератор, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, представлял собой типичную автогенерирующую схему, характерную для устройств, построенных на двухполюсниках с ВАХ N-типа [17].

Анализ принципиальной схемы генератора показывает, что он представляет собой нелинейную динамическую систему с большим числом степеней свободы. Поскольку численный анализ такой системы представляет трудности, при её описании были введены следующие упрощения, позволяющие, тем не менее, достаточно строго описать исследуемый генератор. Источник питания E считаем идеальным, что позволяет при теоретическом анализе отказаться от учета цепи фильтра $R_1 C_1$. Резистор R (рис. 2), в величину которого внесём номинал сопротивления R_1 и значение сопротивления потерь индуктивности L_1 , определит угол наклона нагрузочной прямой и, в совокупности со значением ЭДС источника питания E , положение рабочей точки на характеристике нелинейного элемента VD . Сопротивление потерь индуктивности L_2 внесём в величину сопротивления R_3 датчика тока в цепи катушки. Для удобства анализа цепей автогенератора переобозначим L_2 , C_1 , R_3 (см. рис. 1) как L_0 , C_0 , R_0 (рис. 2), а L_1 , C_2 – как L , C , соответственно. При выбранных в эксперименте значениях реактивностей схемы, спектр колебаний генератора располагался в области сравнительно низких частот, что позволяло отказаться от введения в эквивалентную схему элементов, описывающих индуктивность и ёмкость корпуса двухполюсника VD , в связи с их незначительным вкладом в импеданс прибора. Но введение малой величины C_{ss} (ёмкости корпуса активного двухполюсника VD) обеспечило однозначность и корректность уравнений состояния, описывающих исследуемую систему.

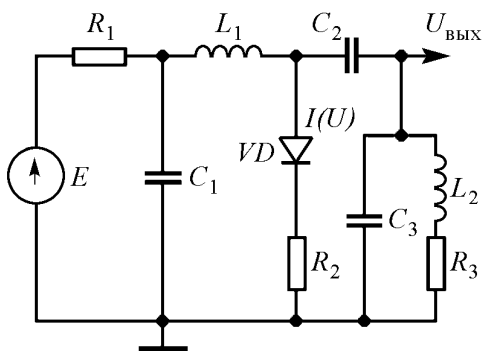


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема автогенератора на магнитоуправляемом негатроне

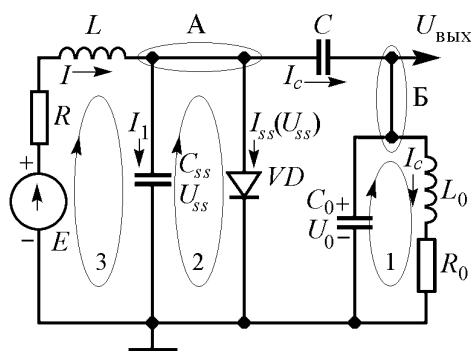


Рис. 2. Эквивалентная схема исследуемого автогенератора

Сделанные упрощение позволили перейти к анализу исследуемой электродинамической системы на основе более простой эквивалентной схемы, приведенной на рис. 2.

Поскольку влияние магнитного поля на магнитоуправляемый двухполусник выражается в изменении вида его вольтамперных характеристик, как это показано на рис. 3, учёт этих зависимостей приводит к значительным сложностям при численном исследовании режимов работы исследуемой автогенераторной системы.

Но, как следует из взаимного расположения вольтамперных характеристик, приведенных на рис. 3, и нагрузочной прямой 6, величина магнитного поля фактически влияет только на положение рабочей точки на ВАХ прибора. Таким образом, изменение положения рабочей точки на семействе вольтамперных характеристик нелинейного элемента при различных значениях внешнего магнитного поля можно представить как сдвиг участка с отрицательной крутизной, с неизменным характером этого участка при операции сдвига. Это позволяет ввести в описание следующее упрощение: нелинейный двухполусник можно представить как источник тока, управляемый напряжением $I(U)$ при фиксированном значении $B = 0$, а результатом изменения величины магнитного поля можно считать сдвиг нагрузочной прямой относительно нелинейной характеристики $I(U)$ вдоль оси U , что равносильно изменению величины E в диапазоне $E_1 \dots E_5$ (рис. 4).

Такое упрощение позволяет описать нелинейную характеристику $I(U)$ активного элемента VD степенным полиномом, представляющим собой функцию только величины U ,

$$I = (A_1 + (A_2 - (A_3 - A_4 U)U)U)U + A_0,$$

где A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты полинома.

Величины этих коэффициентов определялись по экспериментальной ВАХ нелинейного двухполусника, демонстрирующей хорошее качественное соответствие с расчетной (рис. 4).

Математическая модель исследуемого автогенератора представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений для мгновенных значений напря-

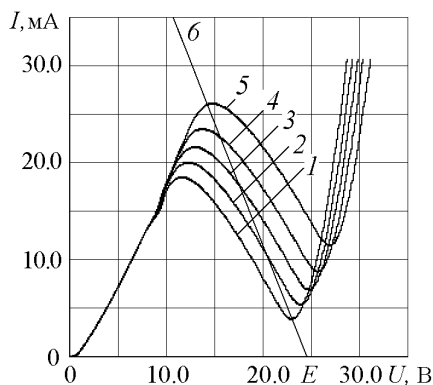


Рис. 3. Рассчитанные ВАХ нелинейного двухполусника при различных значениях внешнего магнитного поля B : 1 – (–180) мТл; 2 – (–90) мТл; 3 – 0; 4 – 90 мТл; 5 – 180 мТл; 6 – нагрузочная прямая

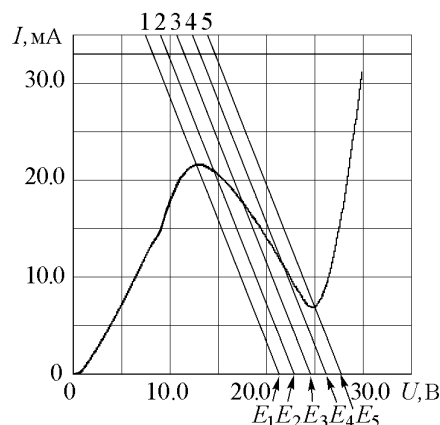


Рис. 4. Рассчитанная ВАХ нелинейного двухполусника при фиксированном значении $B = 0$ и семейство нагрузочных прямых 1–5, имитирующих изменение величины внешнего магнитного поля

жений и токов (переменных состояния), записанную с учётом обозначенных на рис. 2 узлов и контуров. Произведя замену переменных: $x = I/I_m$, $y = I_0/I_m$, $z = U_{ss}/U_m$, $v = U_0/U_m$, введя безразмерное время как характерное время для данной динамической системы $\tau = t / \sqrt{L(C_{ss} + C_0 C_1 / (C_0 + C_1))}$ и используя нормировку ЭДС источника питания в виде $\varepsilon = E/U_m$, можно перейти к нормированной системе нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей динамику исследуемой электродинамической системы,

$$\begin{cases} \frac{dy}{d\tau} = \frac{U_m}{I_m L_0 \omega_0} v - \frac{R_0}{L_0 \omega_0} y, \\ \frac{dv}{d\tau} = \frac{I_m}{U_m C_{ss} \omega_0} \frac{C_X}{C_0} (x - i(z)) - \frac{I_m}{U_m C_0 \omega_0} \left(1 - \frac{C_X}{C_0}\right) y, \\ \frac{dz}{d\tau} = \frac{I_m}{U_m C_{ss} \omega_0} \left[\left(1 - \frac{C_X}{C_{ss}}\right) (x - i(z)) - \frac{C_X}{C_0} y \right], \\ \frac{dx}{d\tau} = \frac{U_m}{I_m L \omega_0} (\varepsilon - z) - \frac{R}{L \omega_0} x, \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{L \left[C_{ss} + \left(\frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} \right) \right]}, \quad \frac{1}{C_X} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_{ss}} + \frac{1}{C_0}, \quad i(z) = \frac{I_{ss}(U_{ss}/U_m)}{I_m}.$$

Здесь $i(z)$ – ВАХ нелинейного двухполосника в безразмерных переменных. Значения $U_m = 28.44447638$ В, $I_m = 0.018010734$ А были определены численно из графика аппроксимации ВАХ нелинейного двухполосника. Обозначив

$$\begin{aligned} a &= \frac{U_m}{I_m L \omega_0}, \quad b = \frac{R}{L \omega_0}, \quad d = \frac{U_m}{I_m L_0 \omega_0}, \quad g = \frac{R_0}{L_0 \omega_0}, \\ k &= \frac{I_m}{U_m C_{ss} \omega_0} \left(1 - \frac{C_X}{C_{ss}}\right), \quad h = \frac{I_m}{U_m C_{ss} \omega_0} \frac{C_X}{C_0}, \quad p = \frac{I_m}{U_m C_0 \omega_0} \left(1 - \frac{C_X}{C_0}\right), \end{aligned}$$

приведем безразмерную систему нелинейных дифференциальных уравнений (1) к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = a(\varepsilon - z) - bx, \\ \frac{dy}{d\tau} = dv - gy, \\ \frac{dz}{d\tau} = k(x - i(z)) - hy, \\ \frac{dv}{d\tau} = h(x - i(z)) - py, \end{cases} \quad (2)$$

где $i(z) = (B_1 + (B_2 - (B_3 - B_4 z)z)z)z + B_0$, а $B_N (N = 0 \dots 4)$ – новые коэффициенты аппроксимирующего полинома нормированной ВАХ нелинейного двухполосника.

Моделирование системы проводилось при следующих значениях параметров элементов: $C_0 = 411$ нФ, $C_{ss} = 2$ пФ, $C = 65$ пФ, $L_0 = 124$ мГн, $L = 3.08$ мГн, $R_0 = 1$ Ом.

ЭДС источника питания E и величина сопротивления R варьировали как параметры, определяющие режим работы исследуемой электродинамической системы. Значения этих параметров выбирались соответственно в пределах 15...35 В и 50...500 Ом.

В силу того, что нелинейный элемент описывается полиномом четвертой степени, аналитическое решение такой системы невозможно, что определило необходимость исследования её численными методами. Для сравнения с экспериментальными результатами расчётные безразмерные величины при отображении на графиках переводились в значения переменных, имеющих соответствующую размерность.

Бифуркационные диаграммы исследуемой динамической системы (рис. 5, 6), построенные при изменении значений E и R , позволили определить значения параметров, при которых происходят бифуркации, и выделить области периодического движения среди сложных динамических режимов.

Для оценки характера сложных динамических режимов исследуемой системы в областях VII, IX, XI, где периодичность явно отсутствует, было проведено исследование сложного поведения нелинейной системы методом сечений Пуанкаре. Он даёт картину поперечного сечения аттрактора, на котором сосредоточено движение в фазовом пространстве, и позволяет дать качественную оценку характера движения: так, если движение хаотично, то в сечении возникает сложная многолистная (так называемая – фрактальная) структура, напоминающая лабиринт [18].

Для исследуемой системы четвертого порядка сечение Пуанкаре представляется совокупностью точек в трехмерном пространстве и может быть получено заданием одной из переменных состояния. При анализе применялся известный вариант метода сечений Пуанкаре, который заключается в регистрации данных в те моменты, когда какая-либо переменная достигает максимального значения [19].

Анализ трёхмерных фазовых объемов четырехмерного фазового пространства системы позволил отдать предпочтение именно этому методу и зафиксировать значения максимумов колебаний тока в индуктивности L для регистрации отсчётов независимых переменных в фазовом объёме U_0, I_0, U_{ss} (в безразмерном виде – y, v, z).

Полученное таким образом сечение Пуанкаре аттрактора исследуемой системы для развитого хаотического режима в области XI изображено на рис. 7, $a-v$ под разными углами наблюдения, что позволило определить плоскость независимых пе-

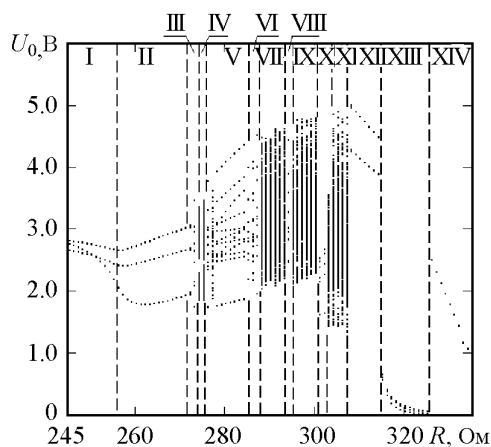


Рис. 5. Бифуркационная диаграмма исследуемой динамической системы при изменении управляющего параметра R в диапазоне 245...335 Ом; I–XIV – области характерных динамических режимов

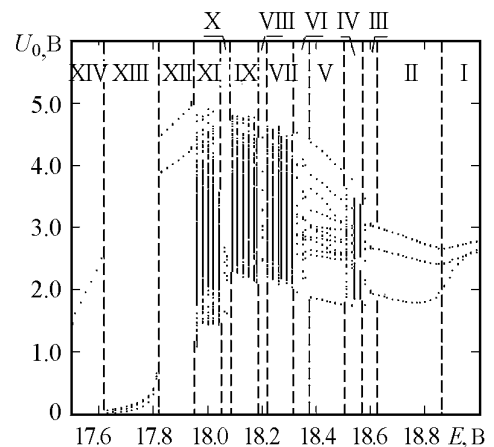


Рис. 6. Бифуркационная диаграмма исследуемой динамической системы при изменении управляющего параметра E в диапазоне 17.5...19 В; I–XIV – области характерных динамических режимов

ременных $(y - v)$ или $(U_0 - I_0)$, в проекции на которую была отображена структура сечения (рис. 7, z).

Общий вид как самого сечения, так и его проекции позволяет классифицировать аттрактор системы как странный ввиду того, что он не состоит ни из конечного множества точек, ни из замкнутой орбиты, а также не имеет вид неупорядоченного скопления точек на плоскости, что свойственно стохастическим движениям.

Анализ бифуркационных диаграмм, фазовых объёмов исследуемой системы, их проекций на плоскости независимых переменных, сечения Пуанкаре аттрактора системы позволяет классифицировать сложные движения в исследуемой нелинейной детерминированной системе как ограниченный или узкополосный хаос – хаотические движения, орбиты которых проходят в фазовом пространстве вблизи от орбит некоторых периодических или регулярных движений [18].

Сделанную оценку сложных динамических режимов подтверждают и измеренные экспериментально спектры мощности, представленные на рис. 8, $a-v$ для областей VII, IX, XI, соответственно.

Проведенный анализ позволил выделить области характерных динамических режимов и осуществить количественную оценку состояния равновесия системы в интересующей нас точке ВАХ. С этой целью были найдены корни полученного в аналитическом виде характеристического уравнения для системы (2) в области развитого хаотического режима XI.

При заданных параметрах и значениях $E = 18$ В и $R = 305$ Ом исследуемая система имеет одну точку равновесия, в которой корни характеристического

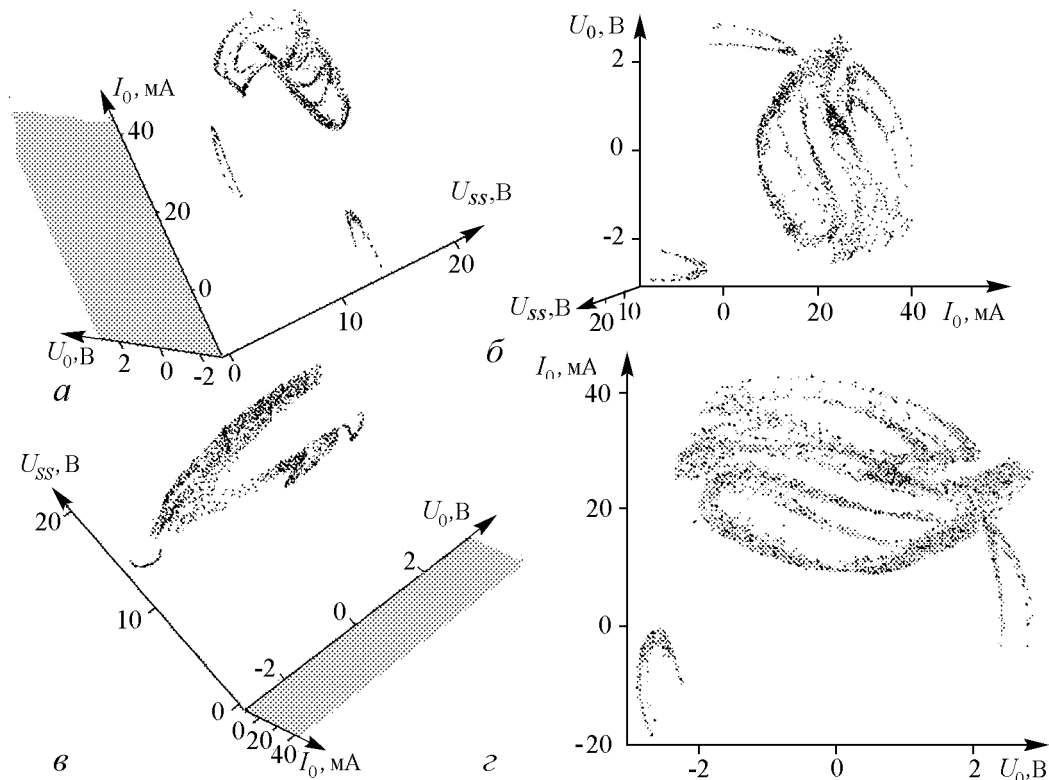


Рис. 7. $a-v$ – сечение Пуанкаре аттрактора исследуемой системы под разными углами наблюдения; z – проекция сечения Пуанкаре на плоскость $(U_0 - I_0)$

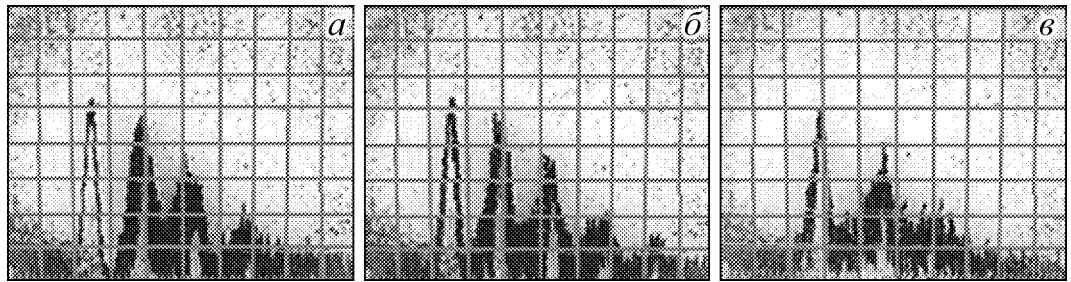


Рис. 8. Спектры мощности, соответствующие характерным колебательным режимам исследуемой системы в областях VII, IX, XI

уравнения, составленного для системы (2), имеют следующие значения:

$$\lambda_{0,1} = -3.6396055 \pm 18.3844857i, \quad \lambda_{2,3} = 0.079578 \pm 5.8814651i,$$

что позволяет определить наличие в данной точке двумерного устойчивого многообразия $\lambda_{0,1} = -3.6396055 \pm 18.3844857i$ (действительные части отрицательны) и двумерного неустойчивого многообразия $\lambda_{2,3} = 0.079578 \pm 5.8814651i$ (действительные части положительны).

Для количественной оценки динамики исследуемой системы в диапазоне изменения управляющего параметра были рассчитаны зависимости спектра ляпуновских характеристических показателей (ЛХП) от R , поскольку спектр ЛХП даёт информацию не только о наличии или отсутствии в системе хаотических колебаний, но и позволяет сделать оценку типа периодического движения, то есть отличить квазипериодическое движение от периодического.

В режиме развитого хаоса (в области XI) ЛХП имели значения $\lambda_1 = 0.1253$, $\lambda_2 = 0.0002$, $\lambda_3 = -0.0006$ и $\lambda_4 = -3.9$, что соответствовало сигнатуре $[+, 0, -, -]$, характеризующей множество точек притяжения исследуемой диссипативной системы в установившемся режиме как странный аттрактор с одним положительным ляпуновским показателем [20]. При этом размерность Ляпунова (Kaplan–Yorke), вычисленная для рассматриваемого аттрактора при заданных параметрах R и E , составляла 3.032.

Таким образом, переход к хаотическим колебаниям в исследуемой системе осуществлялся через последовательность бифуркаций удвоения периода, а области хаотического режима при изменении управляющего параметра чередовались в системе с окнами периодичности.

Известно, что полупроводниковые материалы и приборы на их основе отличаются сильной температурной зависимостью своих параметров, что вынуждает разработчиков принимать специальные меры для компенсации этого эффекта при создании полупроводниковых устройств, или же использовать известные зависимости параметров полупроводников от температуры для измерения последней.

Поскольку исследования зависимости характеристик магнитоуправляемого активного двухполюсника с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N-типа от температуры ранее не проводилось, исследования в этом направлении представляются актуальными и своевременными как с точки зрения определения характеристик самого прибора, так и с точки зрения установления характера их влияния на колебательные режимы автогенератора на его основе. С этой целью было проведено исследование взаимосвязи температуры прибора и типа колебатель-

ных режимов в ранее определенном диапазоне изменения управляющего параметра, результаты которого приведены ниже.

Необходимость проведения температурных исследований была вызвана также необычным экспериментальным результатом, наблюдаемым при анализе изменения колебательных режимов автогенератора под воздействием управляющего параметра R (см. рис. 5). Необычность результата заключалась в том, что по завершению проведения серии измерений автогенераторная система, находящаяся в режиме, характерном для диапазона XIV, по истечении сравнительно продолжительного времени (свыше 10 мин) начинала самостоятельно демонстрировать всё многообразие режимов, приведенных на бифуркационной диаграмме в областях XIV–I, плавно переходя между ними от одного к другому.

Похожее поведение системы, демонстрирующей сложные хаотические режимы, наблюдалось также авторами работ [21–24], но исчерпывающего объяснения наблюдаемому феномену ими выдвинуто не было.

Плавность процесса самостоятельного перехода исследуемой системы от одного колебательного режима к другому и продолжительность этого процесса во времени позволили предположить влияние на исследуемое явление изменения температурного режима работы активного двухполюсника.

Для выявления закономерностей изменения температурного режима активного прибора было проведено исследование зависимости температуры двухполюсника от режима работы и текущего времени. С этой целью температура активного элемента измерялась с помощью калиброванной термопары типа К, находящейся в прижимном контакте с корпусом прибора. Качество термического контакта обеспечивалось с помощью специальной термопроводящей пасты. Термопара в качестве датчика температуры обеспечивала минимальное время преобразования значения текущей температуры прибора в измеряемую электрическую величину термоЭДС, значение которой отображалось в градусах Цельсия на дисплее измерительного прибора типа MS8209 на фоне экрана осциллографа. Вместе с показаниями электронного секундомера значение температуры и отображаемый осциллографом вид проекции фазового объёма динамической системы на плоскость независимых переменных фиксировались видеокамерой. На основе кадрового анализа оцифрованной записи были построены приведенные на рис. 9 графики зависимости температуры активного элемента и максимальной амплитуды колебаний от времени.

Измерение температурной зависимости проводилось следующим образом. Питание $E = 18$ В подавалось на устройство при температуре окружающей среды 27°C , после чего в течение 5 мин осуществлялся прогрев устройства и его вход в рабочий режим. В течение этого времени автогенератор работал в режиме многочастотной генерации, характерном для областей I–II (см. рис. 5). После того, как температурный режим прибора стабилизировался, плавным изменением величины параметра R , система перестраивалась в

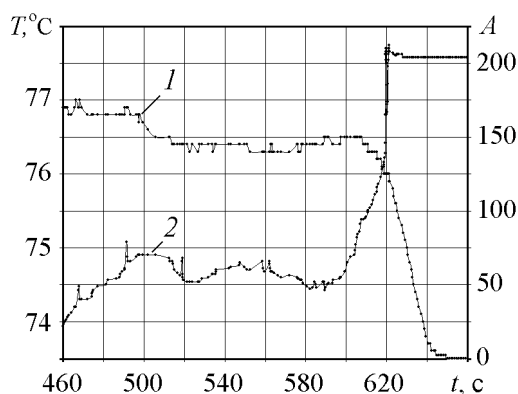


Рис. 9. Зависимости температуры активного элемента (1) и амплитуды колебаний (2) от времени

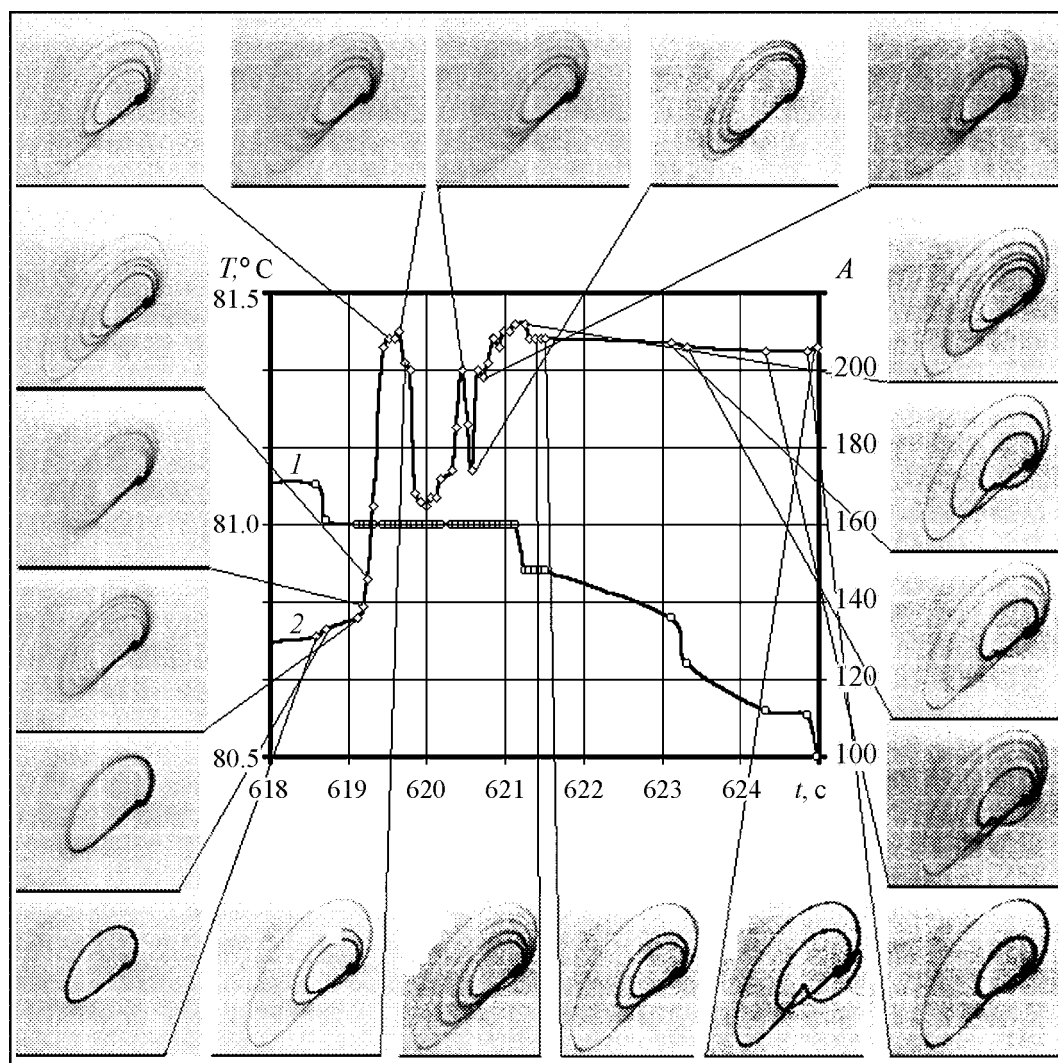


Рис. 10. Зависимости температуры активного элемента (1) и амплитуды колебаний (2) от времени в интервале 618...625 с, а также фазовые портреты колебаний в характерных точках

колебательный режим, характерный для области XII, и значения параметров R и E более не изменялись.

Под воздействием рассеиваемой на приборе мощности двухполосник испытывал саморазогрев, и температура его достигала $77\text{ }^{\circ}\text{C}$, в процессе чего исследуемая динамическая система последовательно достигала колебательного режима, характерного для завершения области XIV. После этого возрастание температуры прекращалось, и наблюдались её незначительные колебания в окрестности значения $76.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, сопровождаемые слабыми изменениями амплитуды колебательно режима.

Следует отметить, что амплитуда колебаний A в проводимых исследованиях являлась более информативным параметром о температурном режиме активного элемента, поскольку изменение амплитуды даёт информацию непосредственно об условиях работы полупроводникового кристалла прибора. В то же время контролируемая температура корпуса прибора T является более инерционным параметром, в значительной мере имеющим интегральный характер.

Начиная примерно с 460-й секунды с момента начала измерений, температура прибора начинала демонстрировать тенденцию к снижению. График этой зависимости до момента стабилизации температурных изменений при значении $T = 73.5^\circ\text{C}$ иллюстрирует рис. 9. Ступенчатость кривой температурной зависимости объясняется выбранным крупным масштабом для сравнительно небольшого интервала значений температур (4°C) и дискретным характером цифровой обработки сигнала ЭДС термопары прибором MS8209.

Для более подробного анализа температурного изменения колебательных режимов временная область в диапазоне 615...625 с представлена на рис. 10 в более крупном масштабе с фазовыми портретами колебательных режимов, характерными для отдельных точек графика.

Инерционность температурных изменений удерживает прибор в режиме двухчастотной генерации (области XIII – XIV) продолжительное время, но узкополосный характер колебаний и сравнительно небольшая величина их амплитуды приводят к снижению рассеиваемой двухполосником мощности, вследствие чего он начинает остывать, что и приводит к плавной смене колебательных режимов генератора при неизменных значениях управляющих параметров E и R вплоть до наступления термодинамического равновесия, когда тепловые потери компенсируются рассеиваемой мощностью в достигнутом колебательном режиме.

Характер приведенных на рис. 9, 10 графиков и соответствующих фазовых портретов позволяет сделать вывод о том, что изменение режимов работы автогенераторной системы обусловлено перемещением рабочей точки по ВАХ в зависимости от температуры активного элемента, что при фиксированном значении параметров E и R может быть вызвано, по всей видимости, только изменением вида ВАХ самого прибора.

Для анализа сделанного предположения был проведен расчет вольтамперных характеристик двухполосника при фиксированных значениях температур в диапазоне $27...85^\circ\text{C}$. Результаты расчета приведены на рис. 11.

Как видно из приведенных на рис. 11 графиков 1–5, увеличение температуры нелинейного двухполосника в диапазоне $27...85^\circ\text{C}$ приводит к такому изменению вида его ВАХ, что при фиксированных значениях параметров E и R , определяющих положение рабочей точки на графике, это положение последовательно проходит участки характеристики, типичные для различных характерных динамических режимов работы автогенераторной системы (см. рис. 5). Этот процесс, собственно, и вызывает плавные переходы между ними.

Отметим, что для температур из диапазона $75...85^\circ\text{C}$ рабочая точка находится на участках ВАХ, где дифференциальное сопротивление двухполосника принимает нулевое значение и с ростом температуры приобретает положительный знак. Следовательно, начиная с некоторого значения температуры суще-

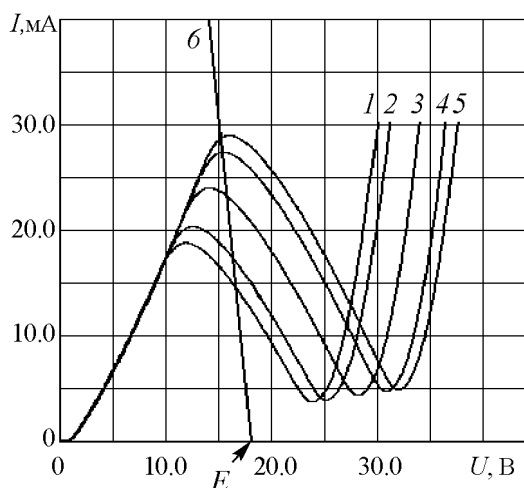


Рис. 11. Рассчитанные ВАХ нелинейного двухполосника при различных значениях температуры T : 1 – 27°C ; 2 – 35°C ; 3 – 55°C ; 4 – 75°C ; 5 – 85°C ; 6 – нагрузочная прямая

ствование генерации становится невозможным, что подтверждается экспериментальными результатами. При температуре 77 °С амплитуда колебаний достигает минимального значения, и генерация практически затухает. После этого прибор начинает остывать, но этот процесс в диапазоне 460...600 с, как видно из графика рис. 9, не носит строго монотонного характера.

Небольшое снижение температуры приводит к изменению вида ВАХ, в связи с чем изменяется режим работы устройства по постоянному току. Амплитуда колебаний увеличивается, и прибор снова испытывает нагрев, а с ним – изменение режима работы и колебательного режима. На протяженном временном интервале температура имеет тенденцию к снижению, но сложный характер её изменения делает этот процесс весьма длительным.

Иначе говоря, во всём представленном на рис. 9 диапазоне изменения температуры от времени, связанного с остыванием активного элемента, происходит постоянное изменение положения рабочей точки на графике ВАХ прибора, вызванное температурным изменением вида самой ВАХ, что как следствие приводит к плавной демонстрации автогенератором всего набора колебательных режимов. Как хорошо видно из участков 600...620 с и 640...660 с графика рис. 9, на которых скорость изменения температуры становится сравнительно большой, изменение носит сложный характер, сценарий которого описан выше.

Динамика процесса такова, что время, в течение которого система проходит области многочастотных и хаотических режимов, оказывается недостаточным для разогрева прибора, в связи с чем термодинамическое равновесие, а с ним и прекращение снижения температуры наступает лишь в области многочастотной генерации I–II. Эксперимент показал, что в этом режиме саморазогрева прибора не происходило, вследствие чего его характер был устойчив, и обратного перехода между областями колебательных режимов I–XIV не наблюдалось.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что временная нестабильность сложных колебательных режимов исследуемой динамической системы связана с разогревом активного элемента, обусловленным спектральным составом и амплитудой генерируемых в этих режимах колебаний. Повышение температуры приводит к изменению вида ВАХ двухполюсника, и как следствие к сдвигу положения рабочей точки на характеристике, что в итоге вызывает смену колебательного режима динамической системы.

В режиме двухчастотной генерации рассеиваемая прибором мощность невелика, что со временем приводит к его остыванию, вызывающему соответствующее изменение вида ВАХ двухполюсника, приводящее к плавному переходу через области сложных колебательных режимов XIV–I к состоянию термодинамического равновесия в режиме многочастотной генерации.

Отметим, что процесс перехода через области чередующихся хаотических и развитых многочастотных колебаний носит лавинообразный характер. Войдя в этот процесс, генератор проходит все его стадии безостановочно. Зафиксировать работу генератора в одном из наблюдаемых колебательных режимов возможно, только оперативно изменив параметры работы активного элемента по постоянному току.

Похожее поведение автогенератора на магнитоуправляемом динисторе [25–26], по аналогии также может быть объяснено температурной зависимостью колебательных режимов, вызванной температурным изменением вольтамперной характеристики активного элемента.

Сложность анализа рассматриваемого процесса состоит в том, что необходимо учитывать взаимное влияние колебательных режимов и вида ВАХ двухполюсника от температуры. Положение рабочей точки на характеристике прибора определяет колебательный режим автогенератора, а характер колебательного режима определяет рассеиваемую активным элементом мощность и как следствие – температуру самого прибора, а значит и вид его ВАХ.

Следует также отметить, что явная зависимость вида ВАХ магниточувствительного двухполюсника от температуры при использовании прибора в качестве, например, чувствительного датчика магнитного поля требует принятия мер по термостабилизации или стабилизации его режима по постоянному току [64,65], введением следящих обратных связей, поскольку цепи термокомпенсации в конструкцию самого магнитотранзистора встраиваются в процессе его производства.

Исследование сложного поведения динамических систем на полупроводниковых приборах с ОДС, таких как динисторы, тиристоры, диоды Ганна и туннельные диоды, требует учета влияния температурных зависимостей их характеристик на реализуемые в этих системах колебательные режимы.

Авторы выражают благодарность Кузнецову С.П. за конструктивное обсуждение отдельных аспектов работы, ценные замечания и рекомендации.

Библиографический список

1. *Арефьев А.А., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н.* Эквиваленты приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением. М.: Знание, 1987. 64 с.
2. *Степанова Л.Н.* Новые устройства с отрицательным дифференциальным сопротивлением // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 8. С. 42.
3. *Баскаков Е.Н., Степанова Л.Н.* Устройство с управляемой вольт-амперной характеристикой S-типа // Радиотехника. 1977. Т. 32, № 7. С. 85.
4. *Арефьев А.А., Степанова Л.Н.* Усилитель на эквиваленте $p-n-p-n$ -структуры с управляемой вольт-амперной характеристикой S-типа // Измерительная техника. 1977. № 6. С. 64.
5. *Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Вениг С.Б., Усанов Д.А.* Магнитотиристор с регулируемыми характеристиками в низкоомном состоянии // Изв. вузов. Электроника. 2004. № 3. С. 42.
6. *Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.* Магнитоуправляемый динистор // Изв. вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 56.
7. *Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.* Магнитоуправляемый двухполюсник с отрицательным дифференциальным сопротивлением и ВАХ N-типа // Изв. вузов. Электроника, 2007. № 3. С. 23.
8. *Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.* Полупроводниковые приборы с управляемыми магнитным полем характеристиками // V Международная научно-техническая конференция: Электроника и информатика – 2005. Материалы конференции. Часть 1. М.: МИЭТ, 2005. С. 211.
9. *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Семёнов А.А.* Влияние напряжения смещения на стохастизацию колебаний в диодах Ганна в многоконтурной колебательной системе // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 12. С. 2406.
10. *Усанов Д.А., Вениг С.Б., Семёнов А.А., Горбатов С.С.* Влияние нелинейного характера импеданса диодов Ганна на работу СВЧ-генераторов на их основе // Изв. вузов. ПНД. 1994. Т. 2, № 5. С. 35.

11. Семёнов А.А. Исследование нелинейных режимов работы полупроводниковых приборов СВЧ // Автореф... дис... канд. физ.-мат. наук / Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1994. 17 с.
12. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Скрипаль А.В. Особенности низкочастотной генерации СВЧ-диодов Ганна // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1981. Т. 24, № 10. С. 67.
13. Бочаров Е.П., Коростелев Г.Н., Хрипунов М.В. К модели стохастической автогенерации в генераторах на диодах Ганна // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 1. С. 96.
14. Кальянов Э.В. Стохастизация низкочастотных колебаний генераторов на МЭП-диоде // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29, № 1. С. 83.
15. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 279 с.
16. Хотунцев Ю.Л., Тамарчак Д.Я. Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых устройствах. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
17. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.З. Диодные генераторы и усилители СВЧ. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
18. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 312 с.
19. Bryant P., Jeffries C. Experimental Study of Driven Nonlinear Oscillator Exhibiting Hopf Bifurcations, Strong Resonances, Homoclinic Bifurcations and Chaotic Behavior // Lawrence Berkeley Laboratory report, LBL-16949, January. 1984.
20. Кузнецов С.П. Динамический хаос. Сер. Современная теория колебаний и волн. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. 295 с.
21. Усанов Д.А., Вениг С.Б., Скворцов С.И. Режим магнитоуправляемой генерации с добавлением периода и хаосом в схеме с магнитотранзистором // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8, № 5. С. 43.
22. Скворцов С.И. Экспериментальные исследования режимов генерации с добавлением периода и хаоса в схеме с магнитотранзистором // Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2000: Сб. материалов научной школы-конференции. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2000. С. 137-139.
23. Скворцов С.И. Нелинейные динамические режимы работы генераторов на магнитодиодах и магнитотранзисторах: Автореф... дис... канд. физ.-мат. наук. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. С. 13.
24. Скворцов С.И. Нелинейные динамические режимы работы генераторов на магнитодиодах и магнитотранзисторах: Дис... канд. физ.-мат. наук. Саратов, 2002. С. 63.
25. Степанова Л.Н., Баскаков Е.Н. Температурная стабилизация параметров ВАХ S-типа в транзисторном эквиваленте $p-n-p$ -структуры // Радиотехника. 1976. № 9. С. 77.
26. Степанова Л.Н. Компенсация активными элементами температурного дрейфа параметров ВАХ S-типа в эквивалентах $p-n-p$ -структуры // Радиотехника. 1979. № 12. С. 65.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 7.12.2011

TEMPERATURE DEPENDENCE OF COMPLEX OSCILLATORY OPERATION MODES OF THE MAGNETICALLY CONTROLLED TWO-TERMINAL DEVICE OSCILLATOR

A.A. Semenov, D.A. Usanov, A.A. Kolokin

The results of operation modes research of the auto-generating system based on a magnetically controlled two-terminal active device with negative differential resistance and N-type current-voltage characteristic are represented. Experimental graphics of oscillatory modes temperature dependencies of the researched dynamic system are given. It is shown, that the temperature mode of the active semiconductor device can rendered essential influence on its current-voltage characteristic, what is necessary to take into account while analyzing operation modes of such devices in complex dynamic modes.

Keywords: Magneto-sensitive nonlinear two-terminal device, complex dynamical operation mode, nonlinear temperature dependence, N-type nonlinear current-voltage characteristic.



Семёнов Андрей Андреевич – родился в Саратове (1965). После окончания Саратовского государственного университета (1987) – инженер, аспирант, научный сотрудник отраслевой лаборатории при СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1994) по специальности радиофизика, включая квантовую радиофизику, и доктора физико-математических наук (2010) в области твердотельной электроники и радиофизики. С 1995 года по настоящее время доцент кафедры физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ. Область научных интересов – физика полупроводников, твердотельная электроника, микросхемотехника, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике, радиофизика. Неоднократный участник и лауреат научно-технических выставок.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет
E-mail: SemenovAA@info.sgu.ru



Усанов Дмитрий Александрович – родился в городе Менделеевске (1943), окончил Саратовский государственный университет (1965), куда после нескольких лет службы на предприятии электронной промышленности поступил на работу и где работает заведующим кафедрой физики твердого тела по настоящее время. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1972) в области физики полупроводников и диэлектриков и доктора физико-математических наук (1989) в области радиофизики, включая квантовую радиофизику. Профессор СГУ, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – твердотельная СВЧ-электроника, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике СВЧ.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru



Колокин Александр Анатольевич – родился в Саратове (1989). Окончил с отличием и серебряной медалью МОУ «СОШ № 8» (2007). В настоящее время студент пятого курса факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского госуниверситета. Неоднократный участник и дипломант студенческих научных конференций, призер Всероссийской конференции по физике в СГТУ в 2007 году. Область научных интересов – микросхемотехника и твердотельная электроника, численное моделирование физических процессов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет
E-mail: aleksanderk008@yandex.ru