ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.623.2

ДИОДНЫЙ АВТОГЕНЕРАТОР ПЛОСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

В. К. Федяев, д.т.н., профессор кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-2452-5146, e-mail: fedyaev.v.k@rsreu.ru
Н. М. Маранкин, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-4236-0923, e-mail: maratnikit@yandex.ru

Дан краткий обзор публикаций по однорезонаторным микроволновым автогенераторам прямопролетного типа (диод, монотрон, двухзазорный резонатор в режимах генерации). ***Целью работы*** *является исследование численным моделированием процессов взаимодействия и электронного коэффициента полезного действия (КПД) диодного автогенератора (диотрона) плоской конструкции в различных режимах, включая режим с отсечкой катодного тока. На основе модели электронного потока из крупных частиц и решения уравнений движения частиц методом Рунге – Кутты третьего порядка разработаны методики расчета электронного КПД энергетическим методом и расчета формы импульсов конвекционного тока с использованием закона сохранения заряда. Показано, что в результате скоростной модуляции под действием переменного напряжения формируются сгустки электронов, которые при определенных углах пролета попадают в отрицательные полупериоды переменного напряжения, образуются зоны генерации. Без отсечки катодного тока в случае равенства зарядов частиц (электроны вводятся в высокочастотный зазор с внешнего катода или катод диода работает в режиме насыщения) значения КПД в центре зон составили 12 % для первой зоны, 8,3 % для второй и 6,1 % для третьей при углах пролета соответственно 4,8 рад, 9 рад и 13,3 рад. В случае зависимости заряда частиц от фазы переменного напряжения максимальные КПД уменьшаются и составляют 2,4 % для первой зоны, 5,3 % для второй и 4,3 % для третьей. Уменьшение в основном связано с тем, что центр исходного сгустка, сформированного на катоде, и центр сгустка, формируемого за счет последующего группирования, сдвинуты по фазе на 0,5π. Режим с отсечкой катодного тока не дал ожидаемого увеличения КПД, как в клистроде, работающем в этом режиме.*

Ключевые слова: *СВЧ автогенератор, КПД, диод, диотрон, зазор, зона генерации, конвекционный ток, режим насыщения, режим пространственного заряда, режим с отсечкой катодного тока.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-142-152

Введение

Применение СВЧ энергии для промышленных, бытовых и биомедицинских целей потребовало использования генераторов простой конструкции с малым весом и габаритами. Поиск таких конструкций привел к схемам известных, но ранее мало изученных однорезонаторных автогенераторов. Это – диод, монотрон и двухзазорный резонатор в режимах генерации. Основным параметром таких устройств является коэффициент полезного действия – КПД.

Классический монотрон – это резонатор с зазором, на вход которого поступает ускоренный немодулированный электронный поток и в котором при углах пролета электронов в зазоре около 2,5π возможна автогенерация СВЧ колебаний. В работах [1, 2] показано, что электронный КПД монотрона плоской конструкции составляет 18 %. Во впервые созданном многолучевом экспериментальном монотроне был получен КПД 12,5 % при импульсной выходной мощности 100 кВт на длине волны 5,5 см [3]. КПД монотрона может быть повышен путем создания высокочастотного поля, напряженность которого нарастает к выходу из за-

зора, где в основном происходит отдача энергии электронного потока переменному электрическому полю резонатора. Так, в монотроне на базе цилиндрической обращенной конструкции, в котором напряженность поля нарастает в сторону внутреннего анода, КПД повышается до 37 % [4]. Введение в зазор диафрагмы приводит к ступенчатому изменению поля и повышает КПД до 47,5 % [5].

В [6] численным моделированием было показано, что электронный КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе, работающем на противофазном π-виде колебаний, составляет на первой зоне 50 %, а на второй – 60 %. Авторами [6] такой автогенератор был назван питроном. В. А. Царёвым в клистроде с двухзазорным выходным резонатором, настроенным в режим генерации на первой зоне π-вида колебаний, было получено экспериментальное значение КПД 44 %.

Наиболее простым по конструкции является диодный генератор, в котором при больших углах пролета электронная проводимость становится отрицательной и возможна автогенерация. Такой автогенератор получил название диотрон [4], было показано, что в коаксиальном диотроне обращенной конструкции без отсечки катодного тока электронный КПД может составлять 24 %. В диотроне-сферотроне на базе двусферического резонатора возможно получение электронного КПД 26-45 % [7, 8]. Диотрон плоской конструкции численным моделированием пока не исследовался.

Целью данной работы является исследование численным моделированием электронных процессов и КПД диотрона плоской конструкции в различных режимах, включая режим с отсечкой катодного тока.

Схематическая конструкция диотрона

Диодный автогенератор имеет простейшую конструкцию (рисунок 1) и состоит из одного полого резонатора *1*, в который входят вывод энергии *2* и широкий плоский зазор, образованный термокатодом *3* и анодом *4*. В режиме генерации, когда электронный поток *5* отдает часть энергии переменному электрическому полю зазора резонатора, между катодом и анодом, кроме постоянного напряжения U_0 источника питания будет возбуждаться переменное напряжение $U_m \sin\omega t$ (t – время, ω – круговая частота). По постоянному напряжению анод отделен от катода разделительным конденсатором *6*.

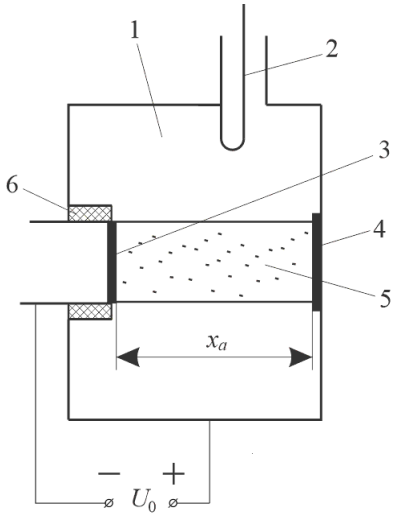

Рисунок 1 – Схематическое изображение диотрона плоской конструкции
Figure 1 – Schematic representation of a diotron of planar construction

Модель электронного потока

При использовании численных методов анализа электронный поток представляется набором крупных частиц, в которые по определенному правилу объединяются электроны, находящиеся в приблизительно одинаковых условиях. В данном случае электронный поток

на одном периоде переменного напряжения представляется набором из N крупных частиц в виде плоских заряженных листов, эмитируемых с катода единичной площади в равные промежутки времени Δt_0 или в фазовые интервалы $\omega\Delta t_0 = \Delta\omega t_0 = 2\pi/N$. Начальные фазы этих частиц определяются соотношением $\omega t_{0n} = 2\pi(n - 0{,}5)/N$, где $n = 1, 2... N$, т.е. частицы совмещаются с серединой интервала $\Delta\omega t_0$. Заряд n-й частицы образуется катодным током, эмитируемым за время Δt_0, т.е. $q_n = j(\omega t_{0n})\Delta t_0$. Плотность катодного тока j будем рассчитывать по закону «степени 3/2» в квазистатическом приближении, т.е. неравномерностью распределения пространственного заряда в межэлектродном промежутке и токами смещения пренебрегаем [9]. Тогда

$$q_n = 2{,}33\cdot 10^{-6}\cdot\frac{\left(U_0 + U_m \sin\omega t_{0n}\right)^{3/2}}{x_a^2}\Delta t_0, \tag{1}$$

где x_a – расстояние катод-анод.

Введем нормированные значения зарядов:

$$q_n^{нор} = q_n / q_0, \tag{2}$$

где

$$q_0 = j_0\Delta t_0 = 2{,}33\cdot 10^{-6}\frac{U_0^{3/2}}{x_a^2}\Delta t_0, \tag{3}$$

q_0 и j_0 – заряд частиц и плотность катодного тока в статическом режиме.

Подставив соотношения (1), (3) в (2), получим

$$q_n^{нор} = (1 + \xi\sin\omega t_{0n})^{3/2}, \tag{4}$$

$\xi = U_m/U_0$ – нормированное значение амплитуды переменного напряжения.

Режим с отсечкой катодного тока характеризуется тем, что $U_m > U_0$, напряжение U_a сохраняется положительным только в течение части периода $2\theta_{отс} < 2\pi$ (рисунок 2). Катод эмитирует электроны в течение этого промежутка. Часть электронов, эмитированных вблизи перехода U_a от положительных значений к отрицательным, попадает в тормозящее поле и возвращается на катод. Заряды q_n на неэмитирующей части периода обнуляются. Величина $\theta_{отс}$ получила название угла отсечки. Для наглядности на рисунке 2 напряжение U_a изображено в форме $U_a = U_0 + U_m\cos\omega t$. Условие отсечки тока $U_a = 0$, т.е. $U_0 + U_m\cos\theta_{отс} = 0$ или $\theta_{отс} = \arccos(-1/\xi)$. При $\xi = 1$ $2\theta_{отс} = 360°$; при $\xi = 2$ $\theta_{отс} = 120°$, $2\theta_{отс} = 240°$, т.е. неэмитирующая часть периода составляет 120º.

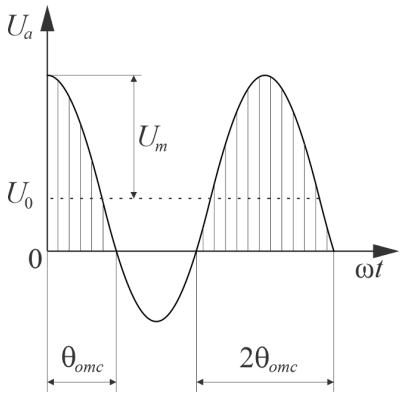

Рисунок 2 – Режим с отсечкой катодного тока
Figure 2 – Cathode current cut-off mode

Уравнения движения

Уравнение движения крупной частицы в электрическом поле с напряженностью $E(x,t)$ имеет вид

$$M_e\frac{d^2x}{dt^2} = Q_eE(x,t), \tag{5}$$

где x – продольная координата, $M_e = mN_e$ и $Q_e = eN_e$ – масса и заряд крупной частицы, m и e – масса и заряд электрона, N_e – число электронов в крупной частице. Подставив M_e и Q_e в уравнение (5), получим уравнение движения для электрона:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = eE(x,t)\,. \tag{6}$$

Сравнивая уравнения (5) и (6), видим, что в одинаковых электрических полях $E(x,t)$ крупные частицы и электроны движутся одинаково, их графики движения и траектории тождественны, поэтому далее крупные частицы иногда будем называть также электронами.

Напряженность электрического поля в плоском диоде с пространственным зарядом определяется соотношением [9]

$$E(x) = \frac{4}{3}\frac{U_a}{x_a}\left(\frac{x}{x_a}\right)^{1/3}.$$

В данном случае $U_a = U_0 + U_m\sin\omega t$, и уравнение (6) с использованием нормированной координаты $X = x/x_a$ примет вид

$$\frac{d^2X}{d(\omega t)^2} = \frac{6}{\theta_a^2}X^{1/3}\left(1+\xi\sin\omega t\right), \tag{7}$$

где $\theta_a = 3\omega x_a/v_0$ – угол пролета в диоде с пространственным зарядом [9], $v_0 = (2eU_0/m)^{1/2}$.

Численное интегрирование уравнения (7) будем проводить методом Рунге – Кутта для дифференциальных уравнений второго порядка [10] шаг за шагом с интервалом $h = \Delta\omega t$. Применительно к уравнению (7) соотношения для тактовых коэффициентов k и значений X_m и X'_m на шаге m будут иметь следующий вид:

$$k_1 = h\cdot f\left(\omega t_m, X_m\right),$$

$$k_2 = h\cdot f\left(\omega t_m + \frac{h}{2}, X_m + \frac{h}{2}X'_m + \frac{h}{8}k_1\right),$$

$$k_3 = h\cdot f\left(\omega t_m + h, X_m + hX'_m + \frac{h}{2}k_2\right),$$

$$X_{m+1} = X_m + B_m\,,$$

$$X'_{m+1} = B_m + \frac{1}{6}(2k_2 + k_3)\,,$$

где

$$B_m = X'_m + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2)\,.$$

Наращивание текущей фазы $\omega t = \omega t_0 + hm$, где $m = 1, 2\ldots$ – номер шага, идет до выполнения условия $0 \ge X_m \ge 1$, после чего фаза прилета частицы на анод ωt_a при $X = 1$ или катод $\omega t_к$ при $X = 0$ определяется линейной интерполяцией по двум точкам из соотношения

$$\frac{X_m - X_{m-1}}{1 - X_{m-1}} = \frac{\omega t_m - \omega t_{m-1}}{\omega t_{a,к} - \omega t_{m-1}}\,.$$

Аналогично интерполяцией по двум точкам определяется значение производной $X'_{a,к}$ на аноде или катоде и соответственно нормированная скорость $V_{a,к} = \theta_a X'_{a,к}/3$.

Расчет КПД

Электронный коэффициент полезного действия η_e будем рассчитывать энергетическим методом через баланс энергий на одном периоде T переменного напряжения $U_{\sim}$ по соотношению

$$\eta_e = \frac{W_{\sim}}{W_0} = \frac{W_0 - W_{oc}}{W_0} = 1 - \frac{W_{oc}}{W_0}, \quad (8)$$

где $W_{\sim}$ – колебательная энергия, переданная электронным потоком полю резонатора, W_0 – энергия источника питания, $W_{oc} = W_a + W_к$ – суммарная кинетическая энергия электронов, осевших на анод W_a и катод $W_к$. Под КПД будем понимать положительные значения η_e, когда $W_{oc} < W_0$, т.е. часть энергии источника питания переходит в энергию переменного поля резонатора и возможна автогенерация.

Энергия, потребляемая от источника постоянного напряжения за период $W_0 = P_0 \cdot T = I_0 \cdot U_0 \cdot T$, где P_0 и $I_0 = \frac{\sum_n q_{an}}{T}$ – мощность и ток источника питания. Суммирование в выражении для I_0 идет только по частицам q_{an}, достигшим анода, так как частицы, возвратившиеся на катод в режиме с отсечкой тока при $U_m > U_0$, в отборе тока от источника питания не участвуют: при вылете из катода они создают ток одного направления, а при возврате образуют такой же ток обратного направления. Подставив I_0 в W_0, получим:

$$W_0 = U_0 \sum_n q_{an}. \quad (9)$$

Кинетическая энергия частицы n будет определяться соотношением

$$W_n = \frac{M_n v_n^2}{2} = \frac{mN_{en}v_n^2}{2} = \frac{m(eN_{en})v_n^2}{2e} = U_0 V_n^2 q_n, \quad (10)$$

где $M_n = mN_{en}$ и $q_n = eN_{en}$ – масса и заряд частицы, N_{en} – число электронов в частице, $V_n = v_n/v_0$ – нормированная скорость. Общая кинетическая энергия частиц, осевших на анод с энергией W_{an} и на катод с $W_{кn}$, будет определяться суммой

$$W_{oc} = \sum_{n=1}^{N} W_{a,кn} = U_0 \sum_{n=1}^{N} V_n^2 q_n. \quad (11)$$

Подставив соотношения (9), (10), (11) в (8), получим общее для режимов как с отсечкой, так и без отсечки катодного тока уравнение для электронного КПД:

$$\eta_e = 1 - \frac{\sum_{n=1}^{N} q_n^{нор} V_{a,к\,n}^2}{\sum_n q_{an}^{нор}}, \quad (12)$$

где $q_n^{нор}$ рассчитывается по уравнению (4).

В режиме насыщения катодный ток не зависит от анодного напряжения, тогда $q_n = q_0 = const$, а $q_n^{нор} = 1$ и уравнение (12) примет вид

$$\eta_e = 1 - \frac{1}{N} \sum_n V_{a,к\,n}^2. \quad (13)$$

Форма импульсов конвекционного тока

Форма импульсов конвекционного тока, который образуется движением электронов между электродами, может быть определена из закона сохранения заряда. В соответствии с этим законом в процессе движения сохраняется заряд электронов q_n, эмитированных с катода в фазовом интервале $\Delta\omega t_0$ и образующих ток плотностью $j(\omega t_{0n})$, а текущий фазовый интервал $\Delta\omega t_{xn}$ (рисунок 3) и плотность конвекционного тока $j(\omega t_{xn})$ в этом интервале изменяются. Тогда на расстоянии x от катода справедливо равенство

$$j(\omega t_{0n})\Delta\omega t_0 = j(\omega t_{xn})\Delta\omega t_{xn}. \quad (14)$$

С учетом соотношений $q_n(\omega t_{0n}) = j(\omega t_{0n})\Delta t_0$, $q_0 = j_0 \Delta t_0$ из уравнения (14) получим:

$$j^{нор}(\omega t_{xn}) = \frac{j(\omega t_{xn})}{j_0} = q_n^{нор} \frac{\Delta\omega t_0}{\left|\Delta\omega t_{xn}\right|}, \tag{15}$$

где (рисунок 3) $\Delta\omega t_{xn} = \frac{1}{2}(\omega t_{x,\,n+1} - \omega t_{x,\,n-1})$.

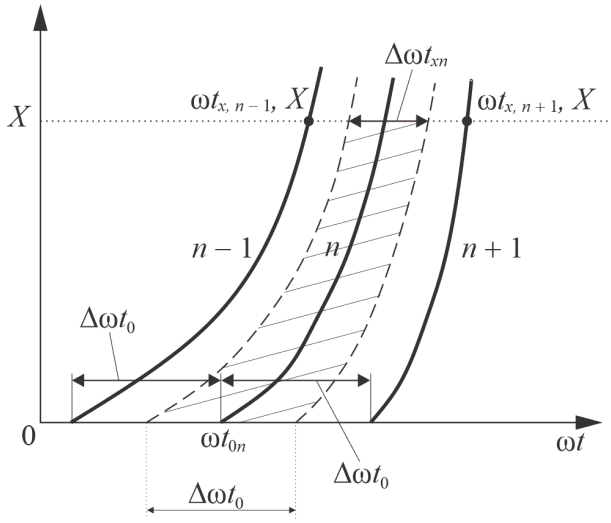

Рисунок 3 – К закону сохранения заряда
Figure 3 – Illustration to a charge conservation law application

Фаза ωt_{xn} прилета частиц в плоскость с координатой x определяется по изложенной выше методике для фаз прилета частиц на анод ωt_{an}. Модуль для $\Delta\omega t_{xn}$ в уравнении (15) стоит на случай обгона частиц, когда $\omega t_{x,\,n-1} > \omega t_{x,\,n+1}$.

Анализ результатов численного моделирования

Для проведения расчетов на основе разработанной математической модели в среде Matlab была составлена программа AUTOGENERATOR. Расчеты производились при числе крупных частиц в одном периоде $N = 100$. Сначала, для сравнения с результатами работы [4], где заряды всех частиц были одинаковы, расчеты были проведены при таком же допущении. В этом случае электроны вводятся в высокочастотный зазор с внешнего катода, как в [4], либо катод в диоде работает в режиме насыщения. На рисунке 4 приведены зависимости электронного КПД η_e от угла пролета θ_a при разных $\xi \le 1$, т.е. без отсечки катодного тока, а на рисунке 5 при $\xi = 0{,}8$ – графики движения частиц, импульсы конвекционного тока (а) и изменение во времени суммарного анодного напряжения (б).

В результате скоростной модуляции под действием переменного напряжения $U_m \sin\omega t$ вокруг электронов с начальной фазой $\omega t_0 = 2\pi k$ ($k = 0, 1, 2\ldots$) формируются сгустки электронов и импульсы конвекционного тока (рисунок 5), которые с небольшими изменениями сохраняются на всем протяжении пролетного пространства. По мере того как сгустки вблизи анода попадают в отрицательные полупериоды переменного напряжения образуются зоны генерации.

Здесь под зонами генерации понимаются участки с отрицательной активной электронной проводимостью и положительными значениями электронного КПД, где выполняются фазовые условия самовозбуждения. Зоны генерации по выходной мощности будут при выполнении также амплитудных условий самовозбуждения, когда отрицательная активная электронная проводимость компенсирует положительные проводимости резонатора и нагрузки. Полный КПД η по мощности в нагрузку определяется соотношением $\eta = \eta_e \eta_к$, где контурный КПД $\eta_к = 0{,}9\ldots0{,}95$.

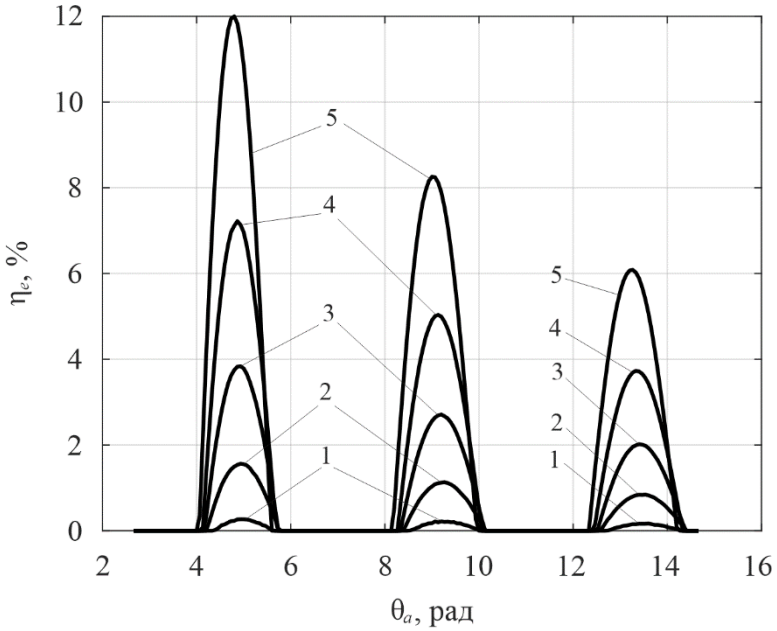

Рисунок 4 – Зоны генерации в режиме насыщения при ξ = 0,2 (1); 0,4 (2); 0,6 (3); 0,8 (4); 1,0 (5)
Figure 4 – Generation zones in saturation mode at ξ = 0,2 (1); 0,4 (2); 0,6 (3); 0,8 (4); 1,0 (5)

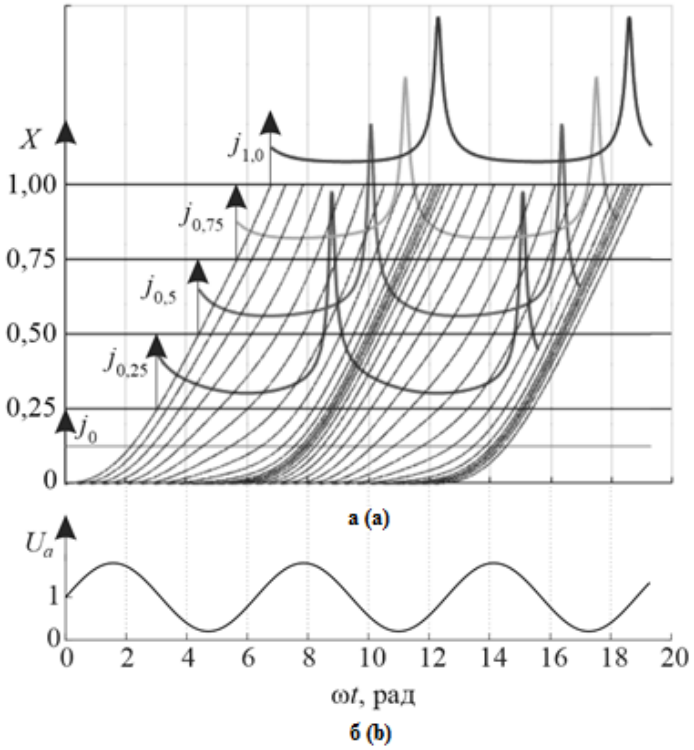

Рисунок 5 – Графики движения электронов, импульсы конвекционного тока (*а*), изменение во времени напряжения U_a (*б*) при ξ = 0,8
Figure 5 – Graphs of electron movement, convection current pulses (*a*), time change of voltage U_a (*b*) at ξ = 0,8

Величины η_e в центре зон зависят от ξ и при изменении ξ от 0,2 до 1,0 увеличиваются для первой зоны от 0,3 % до 12 %, для второй зоны от 0,2 % до 8,3 % и для третьей зоны от 0,2 % до 6,1 %. Эти результаты хорошо согласуются с результатами работы [4], где при приближении цилиндрической конструкции к плоской получены соответственно значения η_e 13 %, 8 % и 6 %. Углы пролета θ_a для центров зон составляют соответственно 4,8 рад, 9 рад и 13,3 рад.

На рисунке 6 показаны зоны генерации для режима пространственного заряда при $\xi \le 1$. В этом случае катодный ток получает исходную модуляцию по плотности и заряды частиц разные (уравнение 4). Они максимальны при $\omega t_0 = 0{,}5\pi + 2\pi k$ рад и минимальны при $\omega t_0 = 1{,}5\pi + 2\pi k$ рад. При этом центр исходного сгустка не совпадает с центром последующего группирования: они сдвинуты на 0,5 рад. В результате этого максимальный КПД по сравнению с предыдущим случаем в основном уменьшается и составляет в центре зон 2,4 % для первой зоны, 5,3 % для второй зоны и 4,3 % для третьей.

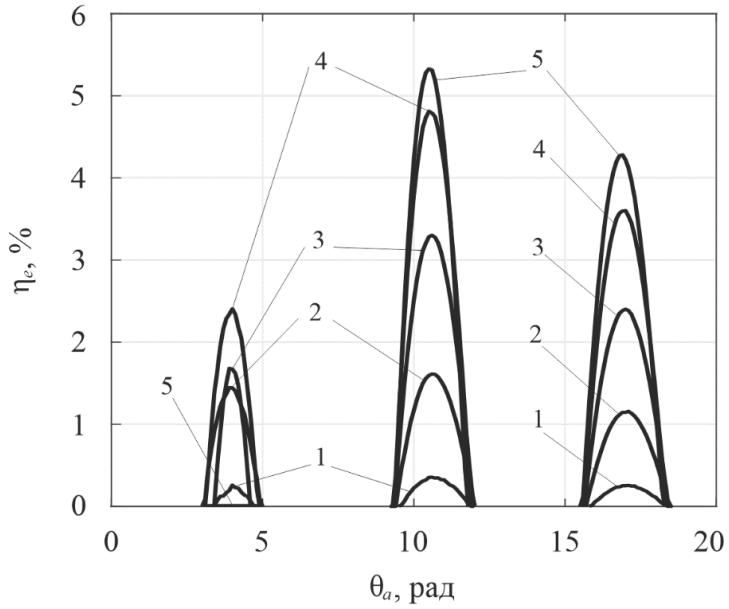

Рисунок 6 – Зоны генерации в режиме пространственного заряда при ξ = 0,2 (1); 0,4 (2); 0,6 (3); 0,8 (4); 1,0 (5)

Figure 6 – Generation zones in spatial charge mode at ξ = 0,2 (1); 0,4 (2); 0,6 (3); 0,8 (4); 1,0 (5)

На рисунке 7 приведена зависимость максимального значения электронного КПД для режима пространственного заряда во второй зоне от нормированной амплитуды переменного напряжения ξ. Сначала при переходе в режим с отсечкой катодного тока при $\xi > 1$ происходит быстрое уменьшение КПД. Это связано с появлением фазового интервала без эмиссии, в результате чего уменьшается число электронов в группирующемся сгустке.

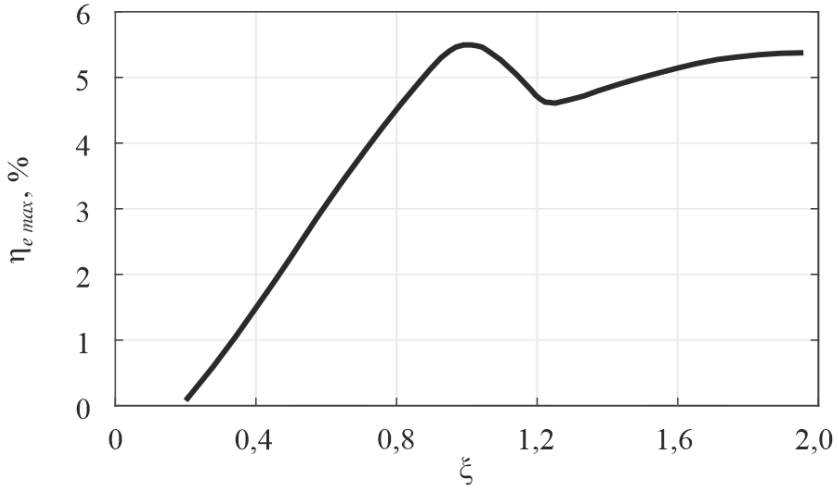

Рисунок 7 – Зависимость максимального значения электронного КПД $\eta_{e\,max}$ от ξ для режима пространственного заряда

Figure 7 – Dependence of electron efficiency maximum value $\eta_{e\,max}$ on ξ for spatial charge mode

В дальнейшем при $\xi > 1{,}2$ это уменьшение компенсируется процессом сортировки электронов вблизи начала неэмитирующего участка, что иллюстрируется рисунком 8, при $\xi = 1{,}5$. Электроны, вылетевшие из катода вблизи перехода суммарного напряжения U_a от положительных значений к отрицательным, разделяются на три группы. Электрон *1* – прямопролетный, он уходит на анод без изменения направления движения. Электрон *2* – колеблющийся, он вблизи катода попадает сначала в тормозящее поле, затем в ускоряющее, совершает колебательное движение, задерживается у катода, попадает в формирующийся сгусток и увеличивает КПД. Электрон *3* – возвратный, он возвращается на катод с небольшой скоростью порядка $0{,}001v_0$ и немного уменьшает КПД. В целом режим с отсечкой тока, когда на катоде образуется исходный импульс конвекционного тока с фазовой протяженностью менее 2π, не дает ожидаемого, как в клистроде [11], увеличения электронного КПД, который при $\xi > 1$ не превышает 5,3 %.

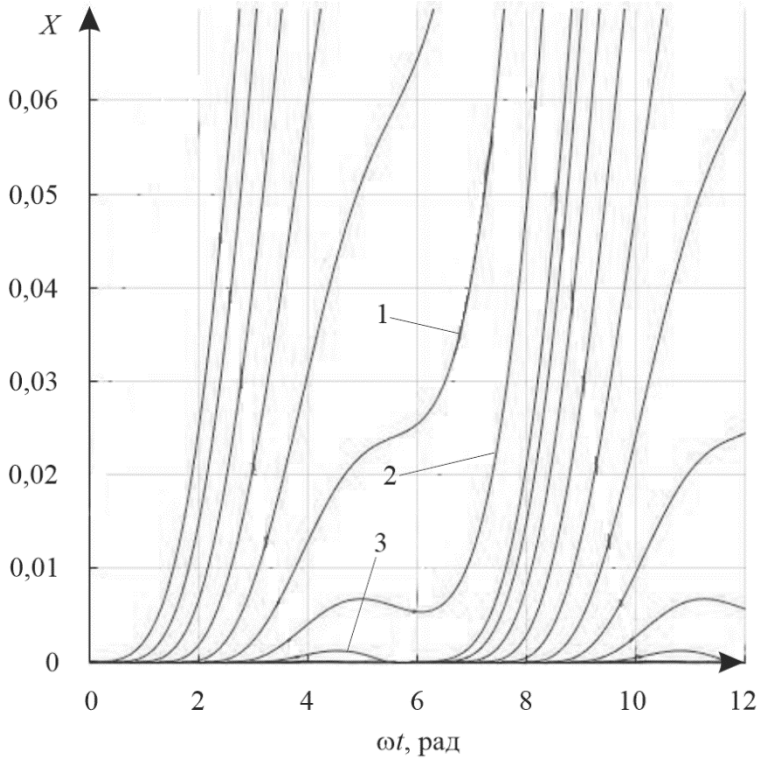

Рисунок 8 – Процесс сортировки электронов в режиме с отсечкой катодного тока для режима пространственного заряда при $\xi = 1{,}5$
Figure 8 – Electron sorting process in cathode current cut-off mode for spatial charge mode at $\xi = 1{,}5$

Заключение

Обзор публикаций по однорезонаторным автогенераторам показал, что наименее исследованным является самый простой по конструкции диодный генератор с плоскопараллельными электродами. Его преимуществами являются отсутствие электронно-оптической системы формирования электронного потока, отсутствие магнитного поля сопровождения потока, отсутствие существенных ограничений на поперечные размеры области взаимодействия. Такой генератор может работать в диапазоне миллиметровых длин волн, так как в этом диапазоне могут быть реализованы большие углы пролета (4,8…13,3 рад) при малых расстояниях катод-анод (порядка миллиметра), что необходимо для обеспечения достаточной плотности катодного тока не менее 1 А/см^2. Вместе с тем невысокий КПД (менее 12 %) исследованного генератора требует поиска и анализа других планарных конструкций с концентрацией электрического поля вблизи анода, например диода с профилированным анодом. Для их анализа будет использована разработанная здесь методика численного моделирования таких устройств.

Библиографический список

1. **Barroso J. J.** A triple-beam 6.7 GHz, 340 kW monotron // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001, vol. 48, no. 4, pp. 815-817.

2. **Федяев В. К., Пашков А. А.** Электронная проводимость и КПД плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 3. С. 361-365.

3. **Панов В. П., Шишков А. А., Юркин В. И.** и др. О создании приборов с большими углами пролета электронов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 32. С. 110-113.

4. **Кураев А. А., Синицын А. К.** Коаксиальный диодный генератор – диотрон // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 2. С. 214-219.

5. **Barroso J. J.** Stepped electric-field profiles in transit-time tubes // IEEE Transactions on electron devices. 2005, vol. 52, no. 5, pp. 872-877.

6. **Федяев В. К., Горлин О. А.** Коэффициент полезного действия питрона // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 12. С. 1494-1500.

7. **Кураев А. А., Матвеенко В. В.** Терагерцовый генератор – сферотрон // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2018. Т. 1. № 4. С. 389-399.

8. **Кураев А. А., Матвеенко В. В.** Многопучковой сферотрон // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18. № 4. С. 5-12.

9. **Сушков А. Д.** Вакуумная электроника: Физико-технические основы. СПб.: Лань, 2004. 464 с.

10. **Камке Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматлит, 1965. 703 с.

11. **Федяев В. К., Пашков А. А.** О предельных КПД клистрода // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2004. Вып. 2(484). С. 54-59.

UDC 621.385.623.2

DIODE GENERATOR OF PLANAR CONSTRUCTION

V. K. Fedyaev, Dr. in technical sciences, full professor, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-2452-5146, e-mail: fedyaev.v.k@rsreu.ru
N. M. Marankin, master student, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-4236-0923, e-mail: maratnikit@yandex.ru

A brief review of publications on single-cavity microwave generators of straight-through type (diode, monotron, two-gap resonator in generation modes) is given. ***The aim of this work*** *is to study interaction processes and electron efficiency of a diode generator (diotron) of planar construction in various modes including cathode current cut-off mode by numerical simulation. Based on the model of an electron beam consisting of large particles and the solving the equations of particle motion by the Runge-Kutta third order method, the ways to calculate the efficiency by energy method and calculate the shape of convection current pulses using charge conservation law are developed. The authors have shown that the result of speed modulation under the influence of alternating voltage are bunches of electrons being formed that at certain transit angles fall into negative half-waves of alternating voltage leading to the formation of generation zones. Without cutting-off cathode current in case of particle charge equality (electrons enter high-frequency gap from external cathode or diode cathode operates in saturation mode) efficiency values in the center of zones were 12 % for the first zone, 8,3 % for the second and 6,1 % for the third at transit angles, respectively, 4,8 rad, 9 rad and 13,3 rad. In case of particle charge dependence on AC voltage phase, maximum efficiency decreases to 2,4 % for the first zone, 5,3 % for the second and 4,3 % for the third. The decrease is mainly due to the fact that the center of initial bunch formed at cathode and the center of bunch formed by subsequent grouping are shifted in phase by 0,5π. Cathode current cut-off mode did not give expected efficiency increase as in klystrod operating in this mode.*

Key words: *microwave generator, efficiency, diode, diotron, gap, generation zone, convection current, saturation mode, spatial charge mode, cathode current cut-off mode.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-142-152

References

1. **Barroso J. J.** A triple-beam 6.7 GHz, 340 kW monotron. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001, vol. 48, no. 4, pp. 815-817.

2. **Fedyaev V. K., Pashkov A. A.** Elektronnaja provodimost' i KPD ploskogo sverhvysokochastotnogo zazora v nelinejnom rezhime. *Radiotehnika i elektronika.* 2005, vol. 50, no. 3, pp. 361-365. (in Russian).

3. **Panov V. P., Shishkov A. A., Jurkin V. I. et al.** O sozdanii priborov s bol'shimi uglami proleta elektronov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta.* 2010, no. 32, pp. 110-113. (in Russian).

4. **Kuraev A. A., Sinicyn A. K.** Koaksial'nyj diodnyj generator – diotron. *Radiotehnika i elektronika.* 1997, vol. 42, no. 2, pp. 214-219. (in Russian).

5. **Barroso J. J.** Stepped electric-field profiles in transit-time tubes. *IEEE Transactions on electron devices*. 2005, vol. 52, no 5, pp. 872-877.

6. **Fedyaev V. K., Gorlin O. A.** Koefficient poleznogo dejstvija pitrona. *Radiotehnika i elektronika.* 2010, vol. 55, no. 12, pp. 1494-1500. (in Russian).

7. **Kuraev A. A., Matveenko V. V.** Teragercovyj generator – sferotron. *Infokommunikacionnye i radioelektronnye tehnologii.* 2018, vol. 1, no. 4, pp. 389-399. (in Russian).

8. **Kuraev A. A., Matveenko V. V.** Mnogopuchkovoj sferotron. *Doklady BGUIR.* 2020, vol. 18, no. 4, pp. 5-12. (in Russian).

9. **Sushkov A. D.** *Vakuumnaja elektronika: Fiziko-tehnicheskie osnovy.* (Vacuum electronics: physical and technical basics), Saint Petersburg, Lan', 2004, 464 p. (in Russian).

10. **Kamke E.** *Spravochnik po obyknovennym differencial'nym uravnenijam.* (Handbook of Ordinary Differential Equations). Moscow: Fizmatlit. 1965, 703 p. (in Russian).

11. **Fedyaev V. K., Pashkov A. A.** O predel'nyh KPD klistroda. *Elektronnaja tehnika. Serija. 1. SVCh-tehnika.* 2004, is. 2(484), pp. 54-59. (in Russian).