

УДК 621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА
ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АВТОНОМНОМ И НЕАВТОНОМНОМ РЕЖИМАХ*В. К. Корнеев, В. С. Мирошниченко, А. А. Шматько*

Теоретически и экспериментально исследованы энергетические и частотные характеристики генератора дифракционного излучения при воздействии внешнего гармонического колебания. В автономном режиме численно рассчитана крутизна амплитудной и частотной колебательной характеристики генератора с учетом пространственного заряда на основе которой определен электронный КПД, электронное смещение частоты и пусковой ток. Проведено сравнение полученных теоретических и экспериментальных результатов. В неавтономном режиме определен спектральный состав квазипериодических колебаний, построен фазовый портрет колебательного процесса и установлены характерные их особенности для двух случаев, когда частота биеений плавно уменьшается до нуля (фазовая неустойчивость) или изменяется скачкообразно (амплитудная неустойчивость). Наблюдаемые экспериментальные спектрограммы и осциллограммы квазипериодических колебаний согласуются с результатами теории.

В работах [1-3] теоретически исследовано возбуждение синхронных (одночастотных) и квазипериодических (многочастотных) колебаний в резонансных генераторах с длительным электронно-волновым взаимодействием типа ГДИ - оротрон при воздействии внешнего монохроматического сигнала. Установлены характерные особенности перехода от квазипериодических к синхронным колебаниям для различных режимов генератора в широкой области изменения исходных параметров. В связи с наметившейся в последние годы тенденцией использования многочастотных колебаний для различных практических приложений в новых частотных диапазонах представляется важным исследование энергетических и частотных характеристик колебаний, их спектрального состава в автономных и неавтономных генераторах коротковолновой части СВЧ диапазона. В данной работе такой анализ проведен применительно к резонансным электронным генераторам типа ГДИ - оротрон. Выявлены особенности спектра при амплитудной и фазовой неустойчивости вынужденных колебаний в нелинейной автоколебательной системе с внешним монохроматическим воздействием. Проведены экспериментальные исследования выходных характеристик ГДИ в автономном и неавтономном режимах, подтверждающие теоретические выводы.

1. Теория. В качестве автоколебательной системы рассмотрим генератор дифракционного излучения (ГДИ), на который воздействует гармонический сигнал с частотой, близкой к частоте генерации. Наличие внешнего сигнала приводит к возбуждению многочастотных колебаний, форма и ширина спектра которых зависят как от вида нелинейности, так и от параметров синхросигнала. Эволюция амплитуды F и фазы ψ вынужденных колебаний генератора дифракционного излучения описывается следующей укороченной системой нестационарных уравнений [2]:

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = F[GS_1(F) - 1] - \alpha_C \cos \psi,$$

$$F \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = F[GS_2(F) - \Delta \omega] + \alpha_C \sin \psi. \quad (1)$$

Здесь $S_1(F)$ и $S_2(F)$ - вещественная и мнимая части крутизны колебательной характеристики генератора дифракционного излучения

[1], $G = \frac{2QL^2I}{\omega_r N_r U}$ - величина положительной обратной связи [4] (N_r - норма колебания, L - длина пространства взаимодействия, U , I - ускоряющее напряжение и ток электронного пучка), α_C - амплитуда внешнего сигнала, $\Delta \omega = 2Q(\omega - \omega_r)/\omega_r$ - относительная величина расстройки частот внешнего сигнала ω и резонансной частоты "холодного" резонатора ω_r , $\tau = t\omega_r/2Q$ - безразмерное время; Q - нагруженная добротность резонатора. Отметим, что режим автогенератора при заданном токе пучка I и ускоряющем напряжении U полностью определен крутизной колебательной характеристики $S(F) = S_1(F) + iS_2(F)$ и величиной обратной положительной связи G .

Величина $S(F)$ характеризует вид нелинейности системы и находится из решения нелинейных дифференциальных уравнений движения электронов в высокочастотном поле резонатора и поле пространственного заряда всех электронов, находящихся в конкретный момент времени в пространстве взаимодействия [2,5]. Таким образом, если известен вид нелинейности $S(F)$ из теории или эксперимента, то уравнение (1) позволяет определить зависимости амплитуды F и фазы ψ от времени и рассчитать с помощью фурье-анализа спектр выходного колебания. Известно, что при приближении к полосе синхронизации по частотному параметру $\Delta \omega$ спектр колебаний усложняется - появляются все новые и новые спектральные составляющие частоты биений. Оказывается, что в непосредственной близости к конусу синхронизации при выполнении амплитудных условиях устойчивости и нарушенных фазовых временная зависимость F и спектр колебаний могут быть найдены аналитически. В этом случае можно считать, что амплитуда колебаний F изменяется более медленно по сравнению с ее фазой ψ . В этом предположении второе уравнение системы упрощается и совпадает с уравнением линии при фазовой автоподстройке частоты, решение которого может быть получено в явном виде. В области существования многочастотных колебаний мгновенное значение частоты $\omega_\mu = d\psi/d\tau$ имеет вид

$$\omega_\mu(\tau) = \Omega(\sqrt{m^2-1}/m) [1 + (\sqrt{m^2-1}/m)\cos(\Omega\tau + \tau_m)]^{-2}, \quad (2)$$

где $m = [GS_2(F_C) - \Delta \omega]/\alpha_C$, $\Omega = \alpha\sqrt{m^2-1}$ - частота биений, F_C - амплитуда вынужденных колебаний на границе полосы синхронизации, $\alpha = \alpha_C/F_C$, $\tau_m = -\arctg\sqrt{m^2-1}$. Для качественного анализа спектра выходного колебания $U(t)$ достаточно ограничиться двумя слагаемыми при разложении мгновенной частоты ω_μ (2) в ряд Фурье [6]. Тогда получим

$$U(t) = F_C \cos[\omega_r t + \beta \sin(\Omega t - \tau_m) + (\beta/2)^2 \sin(2\Omega t - \tau_m)]. \quad (3)$$

Здесь $\omega_r = \omega_0 + \Omega$, $\beta = 2(|m| - \sqrt{m^2-1})$. Из (3) следует, что при

внешнем гармоническом воздействии происходит частичное увлечение частоты автоколебаний, которая подтягивается к частоте внешнего сигнала на величину $m\alpha - \sqrt{m^2 - 1}$, зависящую от режима возбуждения колебаний в генераторе. Используя ряды Фурье - Бесселя, выражение (3) можно представить в виде

$$U(t) = F_{C_n} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) J_s(\beta^2/4) \cos[\omega_{\Gamma} t (n+2s)\Omega t + \pi n - (n+2s)\tau_{\Gamma}]. \quad (4)$$

Как показывает анализ интенсивностей спектральных составляющих колебаний, рассчитанных на основе численного решения уравнения (1) и аналитических выражений (3), (4), обнаруживается их хорошее соответствие. В области амплитудной неустойчивости квазипериодических колебаний необходимо проводить численный анализ. При численном решении уравнения (1) крутизна колебательной характеристики $S(F)$ находилась по формуле [1]

$$S(F) = (1/2\pi) \int_0^1 f(\xi) e^{i\Phi_b \xi} \int_0^{2\pi} e^{i\theta(\xi, \varphi) + \varphi} d\varphi d\xi, \quad (5)$$

где фаза электронов $\theta(\xi, \varphi)$ определялась из решения нелинейных уравнений движения в высокочастотном поле $f(\xi) = A \exp[(\xi - 0,5)^2/w^2]$ (A - константа нормировки $f(\xi)$, ξ - безразмерная координата, $2w = 0,5$ - ширина пятна поля в открытом резонаторе в области движения электронов) и в поле пространственного заряда [5].

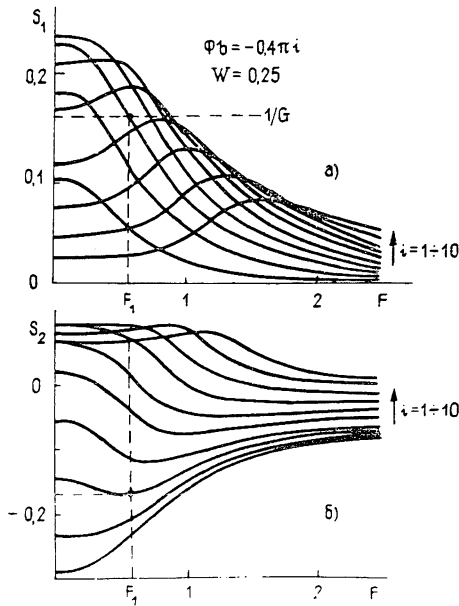


Рис 1

Вещественная и мнимая части $S(F)$, вычисленные для генератора дифракционного излучения при различных значениях параметра относительно рассинхронизма Φ_b , имеют вид, изображенный на рис. 1. Здесь $\Phi = \omega L/v_0$ - угол пролета через резонатор длиной L невозмущенного электрона с начальной скоростью v_0 ; $b = 1 - v_\varphi/v_0$, v_φ - фазовая скорость синхронной с электронами замедленной

пространственной гармонике поля. По представленным графическим зависимостям $S(F, \Phi b)$ при заданной величине обратной связи G легко находятся характеристики автономного режима генератора - пусковой ток $I_{\text{пуск}} (G_{\text{пуск}})$, амплитуда колебаний F_1 , электронный КПД η_1 и электронное смещение частоты $\delta\omega_1$:

$$G_{\text{пуск}} = \frac{1}{S_1(0)}, \quad \eta_1 = \frac{S_1(F_1)}{F_1^2}, \quad \delta\omega_1 = \frac{S_2(F_1)}{S_1(F_1)}.$$

Крутизна колебательной характеристики резонансных генераторов о-типа с длительным взаимодействием является исключительно удобным инструментом при анализе и расчете их выходных характеристик не только в автономном, но и в неавтономном режимах возбуждения колебаний. Так, максимальная амплитуда вынужденных автоколебаний определяется графически, как точка пересечения функции $S_1(F)$ с гиперболой $(1 - \alpha_c/F)/G$ [2]. Более того, характеристики $S_1(F)$, $S_2(F)$ подлежат и экспериментальному определению, что, с одной стороны, позволяет рассчитывать необходимые эксплуатационные характеристики автогенераторов и регенеративных усилителей, а также указать методику экспериментальной проверки такого важного электродинамического параметра, как сопротивление связи R ($G = R/R_0$, $R_0 = U/I$), а с другой - провести достаточно качественное сравнение с теоретическими результатами.

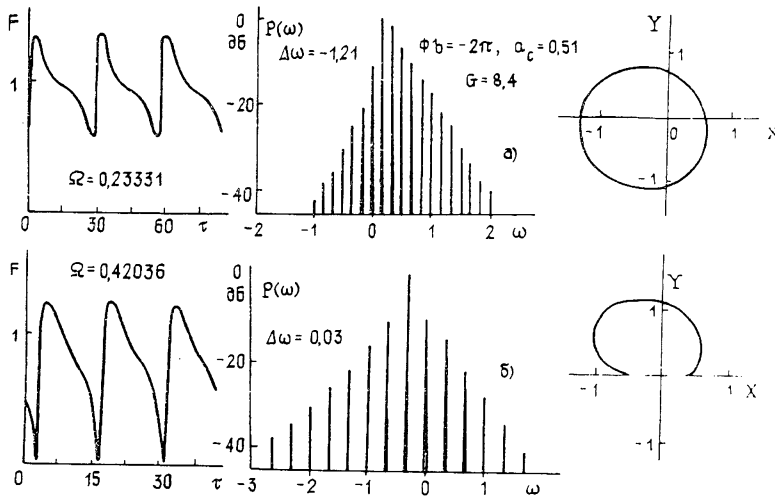


Рис. 2.

Перейдем к анализу спектральных характеристик неавтономного генератора. Спектральные характеристики многочастотных квазипериодических колебаний неавтономного генератора рассчитывались по найденным значениям амплитуды F и фазы ψ в установившемся режиме с помощью Фурье-анализа. На рис. 2 представлены временная эволюция амплитуды вынужденных колебаний F , энергетический спектр $P(\omega)$ и фазовый портрет в декартовых координатах ($x = F \cos \psi$, $y = F \sin \psi$) для двух характерных случаев - с амплитудной и фазовой неустойчивостью колебаний ($\Phi b = -2\pi$, $G = 8,4$, $\alpha = 0,51$). Серия

графиков "а" на рис. 2 характеризует колебания вне полосы синхронизации, где выполнены амплитудные условия устойчивости решений уравнения (1) и нарушены фазовые [1]. Серия кривых "б" на рис. 2 соответствует амплитудной неустойчивости решений (1). Отметим характерные особенности возбуждения одночастотных и многочастотных колебаний. При приближении к границам полосы синхронизации колебаний для двух рассматриваемых ситуаций все сильнее проявляется агармоничность колебаний, спектр колебаний усложняется. Энергетический спектр при фазовой неустойчивости колебаний имеет в основном форму прямоугольного треугольника, а при амплитудной - равностороннего треугольника. В первом случае частота биений Ω плавно уменьшается до нуля. Предельный цикл имеет форму окружности и мало искажается при изменении параметров. В другом случае (рис. 2б), как показывает анализ, частота биений Ω может как уменьшаться, так и увеличиваться при приближении к границе синхронизации. Наблюдается такая ситуация, когда реализуется режим прерывистой импульсной генерации ($\Delta\omega = 0,031$) - предельный цикл касается начала координат $F = 0$, имеет место 100-процентная амплитудная модуляция. В дальнейшем предельный цикл уменьшается и при определенном значении $\Delta\omega$ происходит переход к синхронным колебаниям за счет "тушения амплитуд вынужденных колебаний" до нуля [7]. В области параметров между прерывистыми колебаниями и границей полосы синхронизации средняя частота квазипериодических колебаний тождественно равна нулю: $d\psi/dt = 0$. Сравнение спектрограмм, рассчитанных по приближенным формулам (4) и на основе численной реализации для F и ψ , показывает их удовлетворительное согласие.

2. Эксперимент. Для исследования характерных особенностей работы ГДИ при внешнем гармоническом воздействии использовалась экспериментальная установка, в состав которой входили исследуемый ГДИ (Γ_1) и ГДИ - источник внешнего сигнала (Γ_2), подключаемый при помощи трехплечевого ферритового циркулятора. Контролировались уровень мощности внешнего сигнала, уровень средней мощности исследуемого генератора, спектр вынужденных колебаний (С4-28) и амплитуда биений (С1-75). Для исключения взаимной синхронизации генераторов Γ_1 Γ_2 при малой расстройке их частот ($\Delta f < 4$ МГц) в данной схеме развязка входа внешнего генератора Γ_2 составляла около -50 дБ. С помощью такой схемы были проведены исследования выходных характеристик генератора в автономном и неавтономных режимах.

Прежде чем перейти к исследованию неавтономного режима, необходимо было обеспечить соответствующий режим возбуждения колебаний. С этой целью определялись выходные энергетические и частотные характеристики ГДИ (Γ_1). Пусть $\Delta f = f - f_p$ - расстройка частот, f - частота автоколебаний ГДИ, f_p - резонансная частота "холодного" резонатора ГДИ. Для исследуемого генератора параметры "холодного" резонатора составляли: $f_p = 35,0$ ГГц, связь ОР с нагрузкой $\sigma = 0,83$, $Q = 1400$, нерезонансные потери элемента связи - 15%. Минимум пускового тока наблюдался при расстройке частоты $\Delta f = -3$ МГц и составлял $I_{\text{пуск. мин}} = 16$ мА, причем для отрицательных расстроек частот наблюдался плавный рост $I_{\text{пуск}}$ ($I_{\text{пуск}} / I_{\text{пуск. мин}} > 2$ при $\Delta f < -33$ МГц), а для положительных расстроек частот наблюдался резкий рост $I_{\text{пуск}}$ ($I_{\text{пуск}} / I_{\text{пуск. мин}} > 2$ при $\Delta f > 6$ МГц). При рабочем токе $I = 3 I_{\text{пуск. мин}}$ максимум выходной мощности наблюдался при $\Delta f = 3$ МГц и составлял $P = 6,0$ Вт, а при $\Delta f \geq 9$ МГц наблюдался срыв колебаний. При отрицательных расстройках частот мощность генерации плавно снижалась до нуля вплоть до $\Delta f = -45$ МГц. Экспериментальные данные находились в хорошем согласии (в пределах

точности эксперимента $\delta P = 4\%$; $\delta I = 1\%$; $\delta f = 0,3$ МГц) с теоретическими зависимостями, полученными с использованием кривых $S(F)$ (рис. 1). Привязка экспериментальных и теоретических зависимостей осуществлялась в одной точке $I_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск. мин.}}$.

Крутизну колебательной характеристики ГДИ экспериментально можно определить в автономном режиме работы генератора, как это следует из формул теории

$$S_1(F) = 1/G, \quad S_2(F) = \Delta\omega/G, \quad G = R/R_0. \quad (6)$$

по выходной мощности P при заданных значениях тока пучка I и ускоряющего напряжения U . Тогда при определении характеристик $S_1(\sqrt{P})$ и $S_2(\sqrt{P})$ можно воспользоваться соотношениями

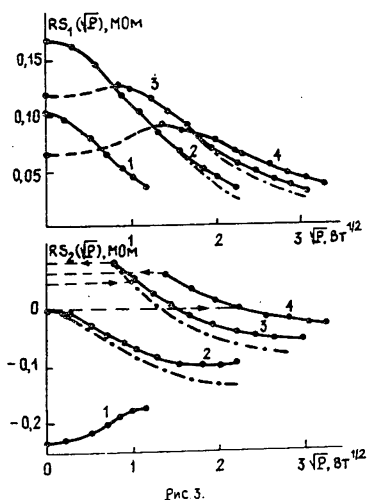
$$S_1(\sqrt{P}) = \frac{1}{R} \frac{U}{I(\sqrt{P})},$$

$$S_2(\sqrt{P}) = \frac{1}{R} \frac{2Q\Delta f U}{f_p I(\sqrt{P})}.$$

Экспериментальные кривые $RS_1(\sqrt{P})$ и $RS_2(\sqrt{P})$ ($R = \text{const}$) для значений параметра рассинхронизма $b = 0,7; 2,2; 3,2; 4,5\%$ (соответственно кривые 1-4) представлены на рис. 3. Из анализа характеристик $S_1(F)$ видно, что в слабонелинейном режиме исследуемого ГДИ (мягкий режим возбуждения колебаний) $S_1 > 0,7 S_{1\text{макс}}$ при соответствующем выборе b уровень выходной мощности может достигать $P \approx 1$ Вт. Жесткий режим возбуждения в данном ГДИ имеет место при $b \geq 3,0\%$. На этом же рисунке приведены теоретические зависимости для двух значений $b = 2,2; 3,2\%$ (штрихпунктирные кривые).

Перейдем к анализу неавтономного режима возбуждения колебаний.

Сначала рассмотрим особенности синхронизации ГДИ при малом внешнем сигнале $P_C/P_G \ll 1$. В эксперименте автономный режим ГДИ был выбран следующим: $f_G = f_p$, $P_G = 2,6$ Вт. Параметр рассинхронизма b соответствовал максимуму мощности в зоне электронной перестройки. Мощность внешнего сигнала поддерживалась постоянной, а его расстройка частоты $\Delta f_C = f_C - f_p$ изменялась в ходе эксперимента. Экспериментально исследованы два случая со слабым ($P_C = 0,3$ Вт) и сильным ($P_C = 3$ Вт) внешним сигналом, что соответствовало фазовой и амплитудной неустойчивости решений уравнений (1). В эксперименте регистрировались спектр колебаний и квадрат амплитуды огибающей



$F^2(t)$ выходного сигнала генератора для нескольких значений расстройки частот Δf_C . Было установлено, что для $P_C = 0,3$ Вт (малый

внешний сигнал) в области существования квазипериодических колебаний форма спектра соответствует прямоугольному треугольнику, что полностью совпадает с теоретическими результатами. В этой ситуации импульсной прерывистой генерации не наблюдалось. Частота биений уменьшалась до нуля на границе полосы синхронизации. В области значений $-2 \text{ МГц} < \Delta f_c < +2 \text{ МГц}$ возбуждались синхронные колебания.

При большом внешнем сигнале ($P_c = 3 \text{ Вт}$) суммарная выходная мощность составляла $P_\Sigma = 5,1 \text{ Вт}$, полоса синхронизации расширялась до $-14 \text{ МГц} < \Delta f_c < +14 \text{ МГц}$, форма спектра колебаний близка к равнобедренному треугольнику. В этом случае при определенном значении расстройки частот ($\Delta f_c = -15,5 \text{ МГц}$) реализуется режим прерывистых колебаний, а переход к синхронным колебаниям происходит посредством "тушения" амплитуд спектра.

Отмеченные в эксперименте особенности возбуждения вынужденных колебаний подтверждают теоретические результаты, полученные на основе нелинейной нестационарной самосогласованной модели ГДИ с внешним сигналом. Отметим, что на границе перехода от квазипериодических к синхронным колебаниям в эксперименте наблюдались неустойчивые шумоподобные колебания, природа возбуждения которых может быть связана с неустойчивостью в этой области исходных параметров рассматриваемой колебательной системы к присутствующим в реальном приборе малым флуктуациям или наличием динамического хаоса. Однако такой режим исходная система уравнений (1) не описывает. В этой ситуации необходимо решение неукороченной системы уравнений, в которой, как известно, возможен и динамический хаос [10].

1) Предложена методика определения выходных характеристик приборов с длительным электронно-волновым взаимодействием через крутизну колебательной характеристики и продемонстрирована ее эффективность на модели генератора дифракционного излучения.

2) Установлена теоретически и экспериментально различная форма спектра вынужденных квазипериодических колебаний в генераторе дифракционного излучения с внешним сигналом и показана их связь с типом неустойчивости колебательной системы: фазовой или амплитудной.

3) Обнаружен режим прерывистой генерации и режим синхронизации колебаний на средней частоте биений.

4) Проведенные теоретические и экспериментальные исследования указывают на адекватность выбранной теоретической модели физическим процессам, происходящим в реальных резонансных приборах типа ГДИ.

5) Показана возможность экспериментального определения крутизны колебательной характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шматько А. А. // Радиотехника и электроника. 1985. Т.30. N 4. С.761.
2. Шматько А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т.30. N 12. С.1488.
3. Шматько А. А. // ДАН УССР. Сер. А. 1987. N 9. С. 65.
4. Ваврив Д. М., Третьяков О. А., Шматько А. А. Препринт ФТИНТ АН УССР. Харьков, 1978.
5. Ваврив Д. М., Третьяков О. А., Шматько А. А. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29. N 8. С. 1580.
6. Бригидин А. М. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 4. С. 49.
7. Рязин П. А. // ЖТФ. 1935. Т. 5. N 1. С. 38.
8. Шестопапов В. П. Дифракционная электроника. - Харьков: Вища школа.

1976. - 231 с.

9. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Специальные функции. - М.: Наука. 1983. - 752 с.
10. Дмитриев А. С., Кислов В. Я., Спиро А. Г. // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. N 12. С.2430.

Харьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
5 декабря 1989 г.