

МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 - 1965

УДК 621.385.623.5.001.5

The second

Б. П. БОЙКО

СИНЖРОНИЗАЦИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА, НАГРУЖЕННОГО РЕЗОНАТОРОМ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТЬЮ *р*—*n*-перехода, на третьей гармонике

Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования синхронизации * трехсантиметрового отражательного клистрона, нагруженного резонатором с нелинейной емкостью *p* — *n*-перехода полупроводникового диода, на третьей гармонике внешиего сигнала.

Теоретнческий анализ проведен с помощью эквивалентной схемы. Вольт-зарядная характеристика нелинейной емкости задавалась в виде кубического полинома. Учитывались предельные свойства волноводного резонатора. Получены амплитудные кривые.

Описаны установка и методика измерений. Изучались амплитудно-частотные зависимости при разных, но фиксированных расстройках между резонаторами, смещениях на диоде и мощностях внешнего сигнала. В синхронизованной системе получено усиление по сравнению с сигналом на третьей гармонике в пассивном резонаторе. Экспериментальные результаты качественно согласуются с выводами теории.

Введение

Синхронизация генератора почти синусоидальных колебаний используется для стабилизации и управления частотой генератора. Представляет интерес синхронизация при дробно-рациональном соотношении частот, особенно в диапазоне СВЧ, где использование генераторов с прямой кварцевой стабилизацией затруднено.

Синхронизация лампового генератора при дробно-рациональном соотношении частот изучалась рядом авторов и теоретически [1, 2, 4], и экспериментально [3]. В этих работах рассматривалась схема с нелинейным активным элементом (лампой). В двухконтурных генераторах полоса синхронизации расширяется, особенно при умножении частоты [4]. Однако нелинейные взаимодействия, в том числе и синхронизация при дробно-рациональном соотношении частот, могут быть получены не только при использовании нелинейного сопротивления (лампы), но и нелинейной реактивности, например, нелинейной емкости *р*-*n*-перехода [5].

В настоящей работе исследовался частный случай неавтономного режима автоколебательной системы с двумя степенями свободы, когда частота внешнего сигнала и частота системы находятся в дробно-рациональном соотношении и когда один из контуров содержит нелинейную реактивность.

Экспериментальное исследование проводилось в диапазоне СВЧ.

^{*} Резонанс в потенциально-автоколебательной системе рассматриваем как частный случай синхронизации с бесконечной полосой синхронизации.

Изучалась синхронизация трехсантиметрового отражательного клистрона, нагруженного резонатором с нелинейной емкостью p—n-перехода полупроводникового диода, внешним десятисантиметровым сигналом (синхронизация на третьей гармонике). Теоретический анализ проводился с помощью эквивалентной схемы.

Теоретическая часть

Эквивалентная схема отражательного клистрона, нагруженного резонатором с нелинейной емкостью *p*—*n*-перехода, под внешним воздействием представлена на рис. 1. Не останавливаясь на известных ограничениях, которые накладываются на эквивалентные схемы генераторов

СВЧ [9], укажем на некоторые особенности данной схемы. Предполагалось, что нелинейная емкость по величине близка к линейной в исследуемом интервале амплитуд колебаний.

Зависимость между потенциалом и зарядом на нелинейной емкости задавалась в виде кубического полинома. Такое приближение качественно отражает влияние нелинейной емкости п. и пороха.





ной емкости p—n-перехода, хотя и является грубым при больших амплитудах колебаний. Чтобы учесть предельные свойства волноводного резонатора, предполагалось, что элемент связи между контурами является одновременно идеальным фильтром высоких частот, критическая частота которого равна критической частоте волновода $\omega_{\rm KP}$.

Обозначим приведенные напряжения на емкостях для первого и второго контуров *x* и *y* соответственно. Дифференциальное уравнение, описывающее поведение системы, будет

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x + \sigma \frac{di_{\rm H}(x)}{dt} - \varkappa \frac{d^2y}{dt^2} = 0,$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\delta_1 \frac{dy}{dt} + \omega_1^2 y + \mu y^3 - \varkappa_1 \frac{d^2x}{dt^2} = \omega_1^2 E_0 \cos \frac{1}{3} pt,$$
(1)

где δ , δ_1 — коэффициенты затухания, ω , ω_1 — парциальные частоты резонаторов, \varkappa , \varkappa_1 — коэффициенты связи, $i_{\rm H}(x)$ — наведенный ток в электронном промежутке клистрона. Предполагая, что синхронизация на третьей гармонике имеет место, решение ищем в виде

$$x = A\cos(pt + \Phi),$$

$$y = B\cos(pt + \psi) + b\cos\frac{1}{3}pt,$$

где $b = \frac{9\omega_1^2 E_0}{9\omega_1^2 - p^2}$ — амплитуда вынужденных колебаний, вычисленная с

достаточной точностью из уравнений, полученных из уравнений (1) путем отбрасывания малых членов; A(t), B(t), $\Phi(t)$ и $\psi(t)$ — медленно меняющиеся функции времени, которые определяются из укороченных уравнений. Укороченные уравнения получены методом К. Ф. Теодорчика [7], с учетом фильтрующего свойства связи и разложения $i_{\rm H}(x)$ в ряд Фурье [9]

65

$$\frac{dA}{dt} = -\delta \left\{ A \left[1 - \eta \cos \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right] + aB \sin (\psi - \Phi) \right\},$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\delta \left\{ \Delta + \eta \sin \gamma \frac{J_1(A)}{A} - \alpha \frac{B}{A} \cos (\psi - \Phi) \right\},$$

$$\frac{dB}{dt} = -\delta_1 \left\{ B - \alpha_1 A \sin (\psi - \Phi) - E \sin \psi \right\},$$

$$- = -\delta_1 \left\{ \Delta_1 - 2\beta b^2 - \beta B^2 - \alpha_1 \frac{A}{B} \cos (\psi - \Phi) - \frac{E}{B} \cos \psi \right\},$$
(2)

где

$$\Delta = \frac{\mu p^2 - \omega^2}{2\delta \rho}, \quad \alpha = \frac{\mu p}{2\delta}, \quad \Delta_1 = \frac{p^2 - \omega^2}{2\delta_1 \rho},$$

$$\alpha_1 = \frac{\kappa_1 p}{2\delta_1}, \quad \beta = \frac{3\mu}{8\delta_1 p}, \quad E = \frac{1}{3}\beta b^3.$$
 (3)

В стационарном случае производные равны нулю, и уравнения (2) становятся алгебраическими относительно *А*, *В*, **Ф**, **ψ**. Исключая фазы **Ф** и **ψ**, получим уравнения для амплитудной кривой

$$\begin{cases} 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha} \frac{A^2}{B^2} \left[1 - \eta \cos \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right] \right\}^2 + \\ + \left\{ \Delta_1 - 2\beta b^2 - \beta B^2 - \frac{\alpha_1}{\alpha} \frac{A^2}{B^2} \left[\Delta + \eta \sin \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right] \right\}^2 = \frac{E^2}{B^2}, \quad (4) \\ A^2 \left\{ \left[1 - \eta \cos \gamma \frac{*J_1(A)}{A} \right]^2 + \left[\Delta + \eta \sin \gamma \frac{J_1(A)}{A} \right]^2 \right\} = \mathfrak{a} B^2. \end{cases}$$

Условия устойчивости стационарных амплитуд и фаз могут быть получены из уравнений (2), но в общем виде они очень громоздки. Кратко изложим некоторые результаты исследований уравнений (2) и (4).

1. При $\beta = 0$ и E = 0 получаем уравнения автономного режима клистрона, нагруженного резонатором. Теоретическое рассмотрение областей генерации и кривых электронной настройки, т. е. зависимостей $A^2(\gamma), B^2(\gamma)$ и $\Delta(\gamma)$, показало, что по форме области можно судить о расстройке и связи между резонатерами, о регенерации клистрона. Например, при нулевой расстройке и критической связи область генерации имеет в середине провал тем более глубокий, чем меньше регенерация клистрона. Интересно, что провал соответствует **ЭТОТ** y = 0, т. е. оптимальному пролетному углу. При связи, большей критической, появляются скачки амплитуд и область затягивания. Частотные кривые также отличаются от кривых



Рис. 2. Амплитудные кривые для: а амплитуды в контуре генератора, б — амплитуды в нагружающем контуре при разных внешних сигналах. Пунктиром обозначены неустойчивые значения амплитуды

клистрона с одним резонатором и при малых углах запаздывания очень похожи на частотные кривые двухконтурного лампового генератора [7].

2. Благодаря предельному свойству резонатора синхронизация на третьей гармонике возможна лишь при наличии нелинейной емкости. Если она отсутствует, $\beta = 0$ и E = 0 и получаем уравнение автономного режима.

3. Амплитудные кривые $A^2 = A^2(\Delta)$ и $B^2 = B^2(\Delta)$ несимметричны относительно оси $\Delta = 0$. На несимметрию кривой влияет расстройка между резонаторами ($\Delta_1 - \Delta \neq 0$), величина нелинейной емкости (характеризуется параметром β), величина запаздывания (характеризуется параметром γ).

4. При отсутствии регенерации ($\eta = 0$) амплитуда вынужденных колебаний в контуре B^2 не превосходит E^2 . При наличии регенерации ($\eta \neq 0$) B^2 может превышать E^2 , т. е. имеется усиление сигнала.

5. Уравнения (2), (4) совпадают по форме с уравнениями для синхронизации на основном тоне *. Следовательно, механизм синхронизации в обоих случаях одинаков. Кроме того, результаты исследования синхронизации на основном тоне могут быть использованы для изучения синхронизации на гармонике.

6. Подробное исследование поведения амплитуд A^2 и B^2 может быть проведено лишь на основе численного решения уравнений (4). На рис. 2 представлены графики амплитудных кривых, вычисленные для случая, когда запаздывание в клистроне оптимальное ($\gamma=0$), резонаторы идентичны, связь между ними критическая ($\alpha=\alpha_1=1$); фиксированная расстройка между резонаторами равна $2\beta b^2$; =-0,5; автоколебательная система в автономном режиме находится на границе самовозбуждения ($\eta=4$). Три графика соответствуют разным амплитудам внешнего воздействия. Графики показывают, что поведение амплитуд в контурах имеет качественно разный характер. Общим для обеих зависимостей является влияние нелинейной емкости на форму кривых и появление скачков амплитуд и гистерезиса.

Экспериментальная часть

Описание установки. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Условно установку можно разделить на три основных узла: исследуемая автоколебательная система (на рис. 3 обведена пунктиром), тракт внешнего десятисантиметрового сигнала и измерительный тракт и измерительная аппаратура.

Синхронизуемой автоколебательной системой является клистрон K_3 , связанный с дополнительным резонатором, внутри которого помещался полупроводниковый диод. Использовались стандартные трехсантиметровые клистроны типа K-28 и K-29. Дополнительный резонатор состоял из четырех секций I—IV. Назначение секций ясно из рис. 3. Секция IV, умножитель, исследованный в [6], но с некоторыми конструктивными изменениями. В качестве нелинейной реактивности была нелинейная емкость p—n-перехода полупроводникового диода. Диод располагался внутри волновода, и емкость p—n-перехода являлась составной частью эквивалентной емкости резонатора. На диод подавалось фиксированное напряжение смещения E_{cm} .

Генератором внешнего сигнала служили либо стандартный генератор ГС-10, мощность около 750 *мвт*, либо клистрон K_{10} . Мощность внеш-

5*

^{*} Совпадение уравнений не является полным, если вольт-зарядная характеристика нелинейной емкости отлична от кубического полинома.

него сигнала, подаваемого на диод, не превышала 100 мвт. Уровень мощности регулировался переменным аттенюатором (0—15 $\partial \delta$), который одновременно играл роль развязывающего устройства. С помощью клистрона K_{10} проводились качественные исследования и предварительная подстройка всей системы. Согласование десятисантиметрового тракта контролировалось измерительной линией ИКЛ-10, так как умножитель являлся десятисантиметровым резонатором. Полоса пропускания этого резонатора была щире полосы исследуемых частот, поэтому влияние резонанса не учитывалось.



Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки. Пунктиром обведена синхронизируемая автоколебательная система. K_3 — трехсантиметровый клистрон, I-IV — дополнительный резонатор: I — клистронная головка, II — фазовращатель, III — секция связи с измерительным трактом; IV — умножитель; Π_1 , Π_2 , Π_3 , Π_4 — подстроечные поршни, K_{10} — десятисантиметровый клистрон; $\Gamma C-10$ — генератор сигналов; I, 8 — генераторы пилообразного напряжения, 2, 7 — блоки питания клистронов, 3 — фазовращатель, 4 — измерительная линия ИКЛ-10, 5 — измеритель мощности ИММ-10, 6, I3, I6 — переменные аттенюаторы, 9 — фильтры, I0 — полупроводниковый диод, I1 — поглощающая нагрузка, I2 — спектр-анализатор, I4 — детекторная головка, I5 — ферритовый вентиль, I7 — осциллограф, I8 — коаксиально-волноводный переход, K — трехсантиметровый клистрон (метка частоты), $E_{\rm CM}$ — батарея смещения на диод

Для изучения поведения амплитуды колебаний в дополнительном резонаторе автоколебательной системы часть энергии из резонатора ответвлялась в измерительный волноводный тракт. Величина отобранной мощности измерялась детектором и микроамперметром. Переменный аттенюатор 16 ослаблял мощность, подаваемую в детекторную головку 14, что позволяло работать только на квадратичном участке характеристики детектора. Спектральный состав колебаний вблизи и внутри полосы синхронизации определялся по спектр-анализатору 12. Частота колебаний измерялась волномером спектр-анализатора с точностью до 1 мггц. При качественном исследовании амплитудно-частотные зависимости наблюдались на экране осциллографа 17. Для этого на отражатель клистрона K₁₀ от генератора 8 подавалось пилообразное напряжение с амплитудой 50 в и частотой 200 гц. Основной являлась частотная модуляция, так как синхронизуемая система была резонансной и влиянием паразитной амплитудной модуляции пренебрегали. Благодаря низкой частоте модуляции все процессы в системе в любой момент времени считались установившимися. Подавая на осциллограф 17 продетектированный сигнал, можно было наблюдать изменение мощности в исследуемой системе при изменении частоты внешнего воздействия.

Чтобы измерить частоту, соответствующую любой точке амплитудной кривой, использовался вспомогательный клистрон К для образования частотной метки на осциллограмме. Эта метка представляла огибающую биений и амплитудную кривую в полосе синхронизации кластрона К исследуемым сигналом. Точка совпадения частот соответствовала синхронизации и была хорошо заметна, так как полоса синхронизации была очень узкой. Частота вспомогательного клистрона измерялась тем же волномером. Чтобы исключить влияние клистрона К на автоколебательную систему, ставился ферритовый вентиль 15. Аттенюатор 13 предотвращал перегрузку детектора.

Результаты эксперимента. При отсутствии внешнего сигнала автоколебательная система ведет себя как система с двумя степенями свободы. Область генерации клистрона с дополнительным резонаторам при выводе мощности из дополнительного резонатора наблюдалась на экране осциллографа 17, когда модулировалось напряжение на отражателе клистрона K_3 . Эксперимент подтвердил выводы теории о влиянии расстройки, связи и других параметров на форму области генерации. При наличии полупроводникового диода не было обнаружено влияния на форму области нелинейной емкости p-n-перехода. Это объясняется малостью нелинейной емкости по сравнению с эквивалентной емкостью резонатора. Оценка малости производилась экспериментально. Известно [5, 7], что «резонансная частота» нелинейного контура зависит от амплитуды вынужденных колебаний, причем сдвиг частоты при изменении амплитуды характеризует величину нелинейной реактивности.

Подавая различную по величине внешнюю мощность на трехсантиметровый резонатор, в котором находился диод, мы наблюдали сдвиг резонансной частоты. При максимальной мощности 50 мвт резонансная частота уменьшалась не более чем на 10 мггц (полоса пропускания резонатора не превосходит 45 мггц).

Если на клистрон, нагруженный нелинейным резонатором (на рис. 3 обведено пунктиром), действует десятисантиметровый сигнал, то на частоте генерации клистрона наблюдалось захватывание. Полоса синхронизации при большой регенерации клистрона была очень узкой, так как нелинейная емкость мала и порождаемая ею гармоника невелика.

Чтобы изучить поведение системы в режиме синхронизации, расширяли полосу синхронизации, уменьшая регенерацию клистрона K_3 . В действительности автоколебательная система находилась вблизи границы самовозбуждения, и на третьей гармонике наблюдались как синхронизация, так и резонанс. Экспериментально снимались амплитудно-частотные зависимости при различных параметрах системы. На рис. 4 представлены амплитудные кривые в виде осциллограмм. Три осциллограммы соответствуют разным расстройкам между клистронным и дополнительным резонаторами. Исследуемая система была потенциальноавтоколебательной. Связь резонаторов близка к критической Осциллограммы показывают, что при небольших расстройках ярко выражен резонанс на двух частотах. Максимальная амплитуда достигалась при расстройках, отличных от нуля. Большинство амплитудно-частотных зависимостей было получено при некоторой расстройке (15 ÷ 45 мггц),

69

так как в этом случае удавалось получить максимальную амплитуду умноженного сигнала.

Разным смещениям, подаваемым на диод, соответствует разная величина нелинейной емкости запертого *p*—*n*-перехода [5]. Практически амплитуда **пе**ременного сигнала превосходила напряжение смещения, и при положительных полупериодах диод начинал проводить. Таким образом полупроводниковый диод, помещенный в резонатор, играл роль и



гис. 4. Осцанию рам мы амплитудно-частотных зависимостей при трех расстройках между резонаторами. $\Delta_1 = 19$ мгги, $\Delta_2 = 0$, $\Delta_3 = -13$ мгги

Рис. 5. Амплитудные кривые при разных смещениях на диоде: $I - E_{CM} =$ $= -0.5 \$ *в*, $II - E_{CM} = -1 \$ *в*, $III - E_{CM} =$ $= -1.5 \$ *в*, $IV - E_{CM} = -2 \$ *в*, $V - E_{CM} =$ $= -3 \$ *в*. Пунктирная кривая соответствует пассивной системе и $E_{CM} = -1.5 \$ *в*

нелинейной емкости, и нелинейного сопротивления. Появление проводимости диода ухудшало добротность резонатора. Однако в осуществлении синхронизации и резонанса на третьей гармонике основная роль принадлежала нелинейной емкости. Наилучшие результаты были получены при использовании диодов с большой величиной нелинейной емкости запертого *р*—*п*-перехода. На рис. 5 представлено семейство амплитудных кривых, для которых параметром служит величина постоянного смещения на диоде. Система, как и в случае рис. 4, потенциально-автоколебательная. Расстройка между резонаторами при выбранном смещении такова, что амплитуда колебаний максимальна. Кривые сняты по точкам. По оси абсцисс отложена расстройка $\Lambda = f - f_0$, где f_0 — частота, при которой амплитуда максимальна, по оси ординат — относительная мощность $\frac{w}{w_0}$, где w_0 — максимальная мощность умноженного сигнала при

отсутствии регенерации.

Напряжение смещения подбиралось так, чтобы *p*-*n*-переход находился в запертом состоянии. Из рис. 5 видно, что амплитудные кривые имеют резонансный характер. Асимметрию кривых *III и IV* можно объяснить влиянием нелинейной емкости. При малых смещениях (кривые *I* и *II*) возрастает роль прямой проводимости диода и влияние нелинейной емкости на вид амплитудно-частотных зависимостей становится менее заметным. Графики показывают, что увеличение смещения (по абсолютной величине) уменьшает максимальную амплитуду вынужденных ко-

лебаний. Экспериментально показано. что наибольшая величина амплитуды вынужденных колебаний Д0стигалась при некотором оптимальном смещении, причем в регенерированной системе оптимальное смещение не превышало 1 в, а в пассивной системе было не менее 1 в. Об оптимальном смещении сообшается в работе [6]. Наличие оптимального смещения объясняется противоположным влиянием нелинейной емкости и потерь счет за прямой проводимости диода на амплитуду колебаний. В регенерированной системе потери, вносимые диодом, частично компенсируются и это приводит к уменьшению оптимального смещения.

В случае синхронизации изменение смещения влияло и на амплитуду синхронизированных колебаний, и на полосу синхронизации, причем характер этого влияния более сложный, чем в предыдущем



Рис. 6. Амплитудные кривые внутри полосы синхронизации при разных внешних мощностях w_{BH} : $I - w_{BH} = 50$ мет, $II - w_{BH} = 25$ мет, $III - w_{BH} = 12,5$ мет. Кривая IV соответствует нерегенерированной системе и $w_{BH} = 50$ мет

случае. С увеличением смещения полоса синхронизации сужалась, так как, во-первых, уменьшалась амплитуда гармоники, порождаемой нелинейной емкостью, во-вторых, увеличивалась амплитуда автономных автоколебаний из-за уменьшения потерь за счет отпирания диода. Амплитуда синхронизованных колебаний обычно возрастала при увеличении смещения, так как росла амплитуда автономных автоколебаний. Амплитудные кривые в полосе синхронизации подобны кривым на рис. 5 (см. также рис. 6).

Изучались амплитудно-частотные зависимости при разных мощностях внешнего воздействия. Результаты измерений представлены в виде графиков (рис. 6). Кривые соответствуют синхронизации на третьей гармонике внешнего сигнала. По оси абсцисс отложены расстройки $\Delta = f - f_0$, где f_0 — частота автономных автоколебаний. По оси ординат относительная мощность $\frac{w}{w_0}$, где w_0 — максимальная величина умноженного сигнала при выключенном клистроне K_3 и мощности внешнего сигнала 50 мвт. Отчетливо виден резонансный характер амплитудно-частотных зависимостей. Увеличение мощности внешнего сигнала приводит к увеличению амплитуды вынужденных колебаний и к расширению полосы синхронизации.

Эти результаты аналогичны тем, которые получены при синхронизации на основном тоне [9]. Для сравнения неавтономных режимов при воздействии на основном тоне и на третьей гармонике был проведен эксперимент по синхронизации на основном тоне клистрона, нагруженного линейным резонатором, причем система работала вблизи границы самовозбуждения. Сопоставление результатов, полученных при синхронизации на основном тоне и при воздействии на третьей гармонике, показало, что изменение расстройки, величины внешнего сигнала, напряжения на отражателе и других параметров оказывали качественно одинаковые влияния.

Качественное совпадение явлений для двух типов внешнего воздействия обусловлено, во-первых, малостью нелинейной емкости, во-вторых, отсутствием асинхронного воздействия внешнего сигнала на клистрон K_3 , так как волноводный резонатор обладал предельными свойствами. Приближенно запертый *p*—*n*-переход полупроводникового диода, на который действует сигнал с частотой, в три раза меньшей частоты автоколебательной (или потенциально-автоколебательной) системы, можно было рассматривать как эквивалентный генератор сигнала с частотой основного тона. Представление *p*—*n*-перехода в виде эквивалентного генератора позволяет использовать результаты синхронизации на основном тоне для изучения синхронизации на гармонике. Такое представление *p*—*n*перехода является чрезвычайно грубым, если нелинейная емкость не очень мала.

Выводы

Резюмируем результаты исследования синхронизации трехсантиметрового отражательного клистрона, нагруженного резонатором с *p*—*n*переходом полупроводникового диода, на третьей гармонике внешнего сигнала.

Благодаря использованию запертого *р*—*n*-перехода возможна синхронизация и резонанс на третьей гармонике внешнего сигнала.

Амплитудно-частотные зависимости в полосе синхронизации имеют резонансный характер. Форма амплитудных кривых зависит от расстройки между клистронным и дополнительным резонаторами. В потенциально-автоколебательной системе максимальная амплитуда имеет место при расстройке, отличной от нуля.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от смещения на p-nпереходе. Наибольшие амплитуды достигаются при небольших смещениях, когда нелинейная емкость велика. В регенерированной системе максимально возможная амплитуда осуществляется при меньших смещениях, чем в пассивной.

С увеличением амплитуды внешнего сигнала увеличивается амплитуда вынужденных колебаний и расширяется полоса синхронизации.

Имеется усиление сигнала на третьей гармонике в регенерированной системе по сравнению с сигналом в резонансной пассивной системе.

При малой нелинейной емкости и учете предельных свойств волнового резонатора *р*—*n*-переход, на который действует внешний сигнал, можно рассматривать как эквивалентный генератор внешнего сигнала с частотой основного тона.

В заключение приношу глубокую благодарность доц. И. И. Минаковой за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сифоров В. И. «Радиотехника», № 5, 1946. 2. Хохлов Р. В. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ.-мат. наук, № 12, 1954. 3. Гайлит Т. А., Минакова И. И. «Радиотехника», № 7, 1956.

Ганлиг Г. А., Минакова Л. П. К. «Радноскинка», № 1, 1963.
 Шеманаев Г. Д. «Радиотехника и электроника», № 1, 1963.
 Берман Л. С. Нелинейная полупроводниковая емкость. М., Физматгиз, 1963.
 Брагинский В. Б., Дианова В. А., Мустель Е. Р. «Радиотехника и электроника», № 7, 1961.
 Теодорчик К. Ф. Автоколебательные системы. ГИТТЛ, 1952.

8. Бойко Б. П., Минакова И. И., Савельева З. И. «Изв. вузов», радиотехника, № 6, 1960.

9. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М., 1955.

Поступила в редакцию 23. 5 1964 г.

Кафедра теории колебаний