

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ, ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ ВАРИКАПАМИ

Б. М. Дьяченко

Таганрог

Туннельные диоды, применяемые в качестве автогенераторов, перспективны в сочетании с варикапами, являющимися нелинейными безынерционными реактивными элементами. Такой автогенератор может быть использован как частотно-модулированный.

Кроме того, эти варикапы используются для перестройки по диапазону. В работе исследуются автогенераторы (рис. 1, а, б) с туннельными диодами ЗИЗО1Г и варикапы Д-809 [1].

Теоретический анализ. Эквивалентную схему варикапа на низких частотах можно представить в виде емкости $p-n$ перехода C_n , зашунтированной сопротивлением утечки R_n [2]. Ее полная проводимость $y = g - jb$, где $g = \frac{1}{R_n}$; $b = \omega C_n$.

Если варикап подключить к колебательному контуру, то контур расстроится, чтобы скомпенсировать реактивную составляющую проводимости варикапа. Проводимость контура, отнесенного к точкам включения варикапа при малых расстройках, имеет вид

$$\frac{1}{Z_{ce}} = \frac{1}{R_{oe}} + \frac{j\alpha}{R_{oe}}$$

где $\frac{1}{R_{oe}}$ — активная составляющая проводимости контура;

$\frac{j\alpha}{R_{oe}}$ — реактивная составляющая проводимости контура (где α — обобщенная расстройка).

Частоту автоколебаний при наличии варикапа найдем из условия равенства нулю реактивной проводимости схемы (емкостью туннельного диода пренебрегаем ввиду ее малости)

$$\frac{\alpha}{R_{oe}} - \omega C_n = 0. \tag{1}$$

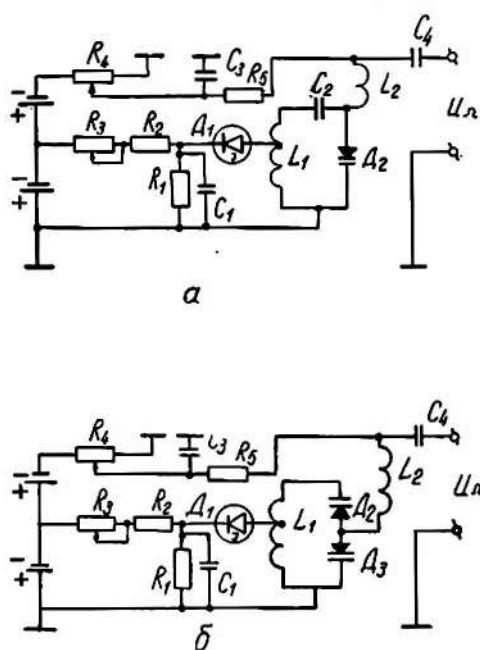


Рис. 1. Принципиальная схема ч. м. генератора на туннельном диоде с контуром, перестраиваемым одним (а) и двумя (б) варикапами

Подставив выражение для обобщенной расстройки $\alpha = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0\delta}$ в (1), получим формулу для расчета отклонения частоты за счет варикапа

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \delta R_{oc} \omega C_n. \quad (2)$$

С целью выявления возможностей для увеличения $\Delta\omega$ произведем во (2) замену $R_{oc} = \rho^2 \frac{\rho}{\delta}$; получим

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \rho^2 \rho \omega C_n, \quad (3)$$

где ω_0 — резонансная частота контура;

ω — частота генерации;

ρ — характеристическое сопротивление.

Из формулы (3) видно, что для увеличения девиации частоты $\Delta\omega$ надо увеличивать характеристическое сопротивление контура ρ , коэффициент включения варикапа в контур ρ , а также использовать варикапы с большим значением емкости $\rho - n$ перехода C_n . Если включить в контур два последовательно включенных варикапа (рис. 1, б), то общая емкость

$$C_n^I = \frac{C_n}{2}.$$

Тогда реактивная составляющая проводимости варикапов

$$b = \frac{\omega C_n}{2},$$

и формула для расчетов девиации частоты будет иметь следующий вид:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{4} \rho^2 \rho \omega C_n. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при последовательном соединении двух варикапов девиация частоты в два раза меньше, чем при одном варикапе. **Максимальная девиация частоты.** Пренебрегаем паразитными элементами схемы и, используя формулу $C_n = k (\varphi_k + U_0)^{-\frac{1}{2}}$ [2], находим частоту автогенератора

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_n}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\varphi_k + U}{\varphi_k + U_0}}, \quad (5)$$

где ω_0 — средняя частота автогенератора;

U_0 — постоянное напряжение, соответствующее частоте ω_0 ;

$$U = U_0 + \Delta U.$$

Разлагая в ряд по степеням $\frac{\Delta U}{\varphi_k + U_0}$ выражение (5), получаем:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta U}{\varphi_k + U_0} - \frac{1}{8} \left(1 - \frac{1}{4}\right) \left(\frac{\Delta U}{\varphi_k + U_0}\right)^2. \quad (6)$$

Обычно требуется, чтобы частота изменялась во времени по тому же закону, что и модулирующее напряжение, т. е. зависимость ω от U (модуляционная характеристика) должна быть линейной и $\Delta\omega$ пропорционально ΔU . Для выполнения этого требования необходимо, чтобы в

правой части разложения (6) третий член разложения был бы много меньше второго, т. е. требуется выполнение условия

$$\frac{1}{8} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\Delta U}{\varphi_k + U_0} \right) \ll 1. \quad (7)$$

Тогда, с учетом выражения

$$K_n = \frac{1}{C_n} \frac{\partial C_n}{\partial U} = - \frac{1}{2(U_0 + \varphi_k)},$$

для коэффициента нелинейности функции $C_n = \varphi(U)$ получим

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = - \frac{1}{4} \frac{\Delta U}{\varphi_k + U_n} = \frac{1}{2} K_n \Delta U.$$

Крутизна модуляционной характеристики определяется из уравнения

$$S = \frac{\partial \omega}{\partial U} = - \frac{1}{4} \frac{\omega_0}{\varphi_k + U_n} = \frac{1}{2} K_n \omega_0.$$

Для получения высокой крутизны модуляционной характеристики нужен высокий коэффициент нелинейности варикапа. При выборе рабочей точки следует иметь в виду, что коэффициент нелинейности максимален при $U = 0$ (т. е. в начале диапазона). Тогда максимальная девиация частоты при максимальном модулирующем напряжении U_2

$$\Delta \omega_{\text{макс}} = \frac{1}{2} K_n \omega_0 U_2.$$

Таким образом, максимальная девиация частоты на частоте ω_0 пропорциональна коэффициенту нелинейности функции $C_n = \varphi(U)$ и модулирующему напряжению, «критерий малости» которого находим из выражения (7)

$$\frac{3}{32} \frac{U_2}{\varphi_k + U_0} \ll 1,$$

где $U_2 = \Delta U$.

Нестабильность средней частоты. При подаче на варикап модулирующего напряжения U_2 средняя частота колебаний автогенератора будет изменяться вследствие изменения среднего значения емкости $p - n$ перехода, так как характеристика $C_n = \varphi(U)$ нелинейна.

Емкость $p - n$ перехода в выбранной рабочей точке определяем по формуле

$$C_p = C_0 \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U_0}}.$$

Тогда можем получить

$$C_n = C_0 \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U_n}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{U_2}{\varphi_k + U_n} \cos \Omega t}}.$$

Разлагая корень в ряд по степеням $\frac{U_2}{\varphi_k + U_0}$, получим

$$C_n = C_p \left[1 - \frac{1}{2} \frac{U_2}{\varphi_k + U_0} \cos \Omega t + \frac{3}{8} \left(\frac{U_0}{\varphi_k + U_0} \right) \cos^2 \Omega t - \frac{15}{48} \left(\frac{U_2}{\varphi_k + U_0} \right)^3 \cos^3 \Omega t + \dots \right].$$

Или после несложных преобразований

$$C_n = C_p \left\{ 1 + \frac{3}{16} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 - \frac{U_\Omega}{2(\varphi_k + U_0)} \left[1 + \frac{15}{48} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right] \cos \Omega t + \right. \\ \left. + \frac{3}{16} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \cos 2\Omega t - \frac{15}{192} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^3 \cos 3\Omega t + \dots \right\}.$$

Из этого разложения видно, что

$$C_{n_0} = C_p \left[1 + \frac{3}{16} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right]; \\ C_{n_1} = C_p \left\{ \frac{U_\Omega}{2(\varphi_k + U_0)} \left[1 + \frac{15}{48} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right] \right\}; \\ C_{n_2} = C_p \left[\frac{3}{16} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right]; \\ C_{n_3} = C_p \left[\frac{15}{192} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^3 \right].$$

В этих выражениях C_{n_0} ; C_{n_1} ; C_{n_2} ; C_{n_3} являются соответственно постоянной составляющей (среднее значение) первой, второй, третьей гармониками емкости $p-h$ перехода варикапов. Из выражения для C_{n_0} видно, что при возрастании амплитуды модулирующего напряжения постоянная составляющая варикапа увеличивается, а следовательно, увеличивается и неустойчивость средней частоты.

При малых значениях модулирующего напряжения, т. е. когда

$$\frac{3}{32} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \ll 1,$$

частоту колебаний автогенератора можно определить по обычной формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_n}}. \quad (8)$$

Подставив в формулу (8) вместо C_n ее среднее значение C_{n_0} , получим выражение для средней частоты генератора при модуляции

$$\omega_{cp} = \frac{1}{\sqrt{LC_p \left[1 + \frac{3}{16} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right]}}$$

или, разложив в ряд, получим

$$\omega_{cp} = \omega_0 \left[1 - \frac{3}{32} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_p}}$ — резонансная частота при отсутствии модулирующего напряжения.

Из выражения (9) видно, что при подаче модулирующего напряжения средняя частота уменьшается грубо в $\left[1 - \frac{3}{32} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right]$ раз. Неустойчивость средней частоты растет с увеличением U_Ω , и коэффициент нелинейности

$$\left[1 - \frac{3}{32} \left(\frac{U_\Omega}{\varphi_k + U_0} \right)^2 \right] = \left[1 - \frac{3}{64} (U_\Omega K_n)^2 \right].$$

Экспериментальное исследование. Для измерения девиации частоты была изготовлена приставка, состоящая из сместителя, УПЧ и дискриминатора. Девиация частоты определялась по показаниям вольтметра АЧ-М2 и характеристике дискриминатора, по осциллографу ЭО-4 контролировались искажения протектированного сигнала.

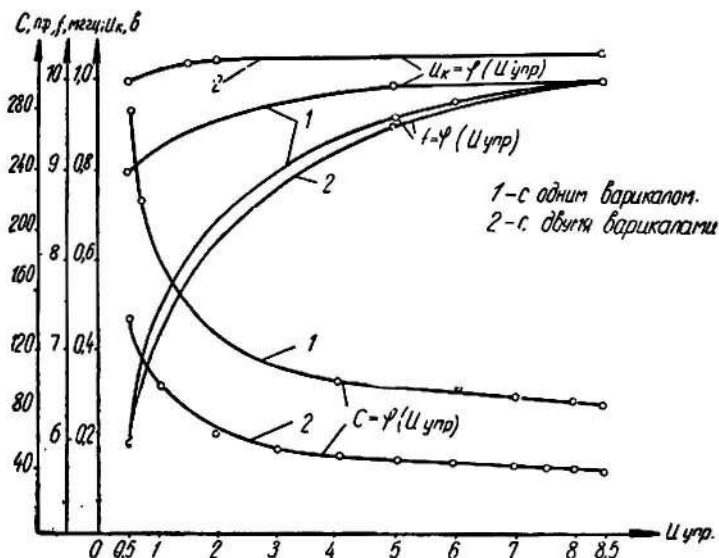


Рис. 2. Зависимости $C = \varphi(U_{упр})$; $f = \varphi(U_{упр})$ и $U_k = \varphi(U_{упр})$ для одного и двух варикапов

Произведем анализ полученных результатов. Так, из графиков рис. 2 видно, что зависимость $f = \varphi(U_{упр})$ в обеих схемах нелинейна, большая нелинейность наблюдается в схеме с одним варикапом. Это объясняется большой нелинейностью зависимости емкости одного варикапа от управляющего напряжения по сравнению с зависимостью емкости двух варикапов, соединенных последовательно. Здесь же (рис. 2) в подтверждение этого заключения приведены кривые $C = \varphi(U_{упр})$ для одного и двух варикапов, а также зависимость $U_k = \varphi(U_{упр})$. Используя зависимости $f = \varphi(U_{упр})$, построены графики напряжения на контуре по диапазону $U_k = \varphi(f)$ (рис. 3). Из приведенных графиков

$$U_k = \varphi(U_{упр}) \text{ и } U_k = \varphi(f)$$

видно, что при прочих равных условиях напряжение на контуре для схемы с двумя варикапами больше по сравнению со схемой с одним варикапом. Вначале диапазона амплитуда напряжения на контуре меньше в обеих схемах, причем для схемы с одним варикапом это уменьшение амплитуды напряжения больше.

Указанные неравномерности напряжения на контуре объясняются меньшим значением добротности контура с одним варикапом по сравнению с контуром с двумя варикапами, более резкой зависимостью добротности контура с одним варикапом от напряжения смещения, а также понижением к. п. д. контура с одним варикапом вследствие большей его нелинейности.

Зависимость девиации частоты от модулирующего напряжения на трех частотах диапазона приведена на рис. 4. Из этих графиков $\Delta f =$

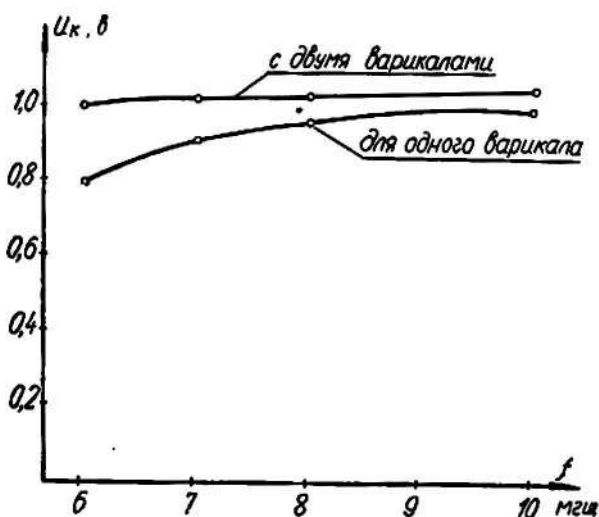


Рис. 3. Зависимость напряжения на контуре по диапазону $U_k = \varphi(f)$ для одного и двух варикапов

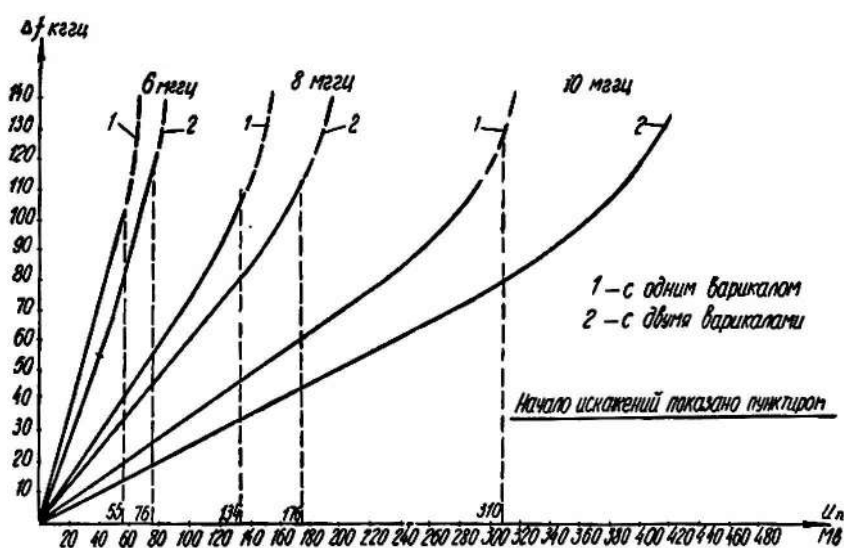


Рис. 4. Зависимость девиации частоты от модулирующего напряжения $\Delta f = \varphi(U_m)$ по диапазону для одного и двух варикапов

искажения на выходе дискриминатора. На частоте 6 мГц для схемы с одним варикапом такой величины модулирующего напряжения будет $U_{\omega} = 55$ мВ: для схемы с двумя варикапами $U_{\omega} = 76$ мВ (рис. 4). Этот недостаток можно устранить, применив плавную или ступенчатую регулировку величины модулирующего напряжения обратно пропорционально напряжению, управляющему емкостью варикапа, как органа перестройки контура. Из графика $\Delta f = \varphi(U_{\omega})$ можно получить количественную характеристику предлагаемого способа.

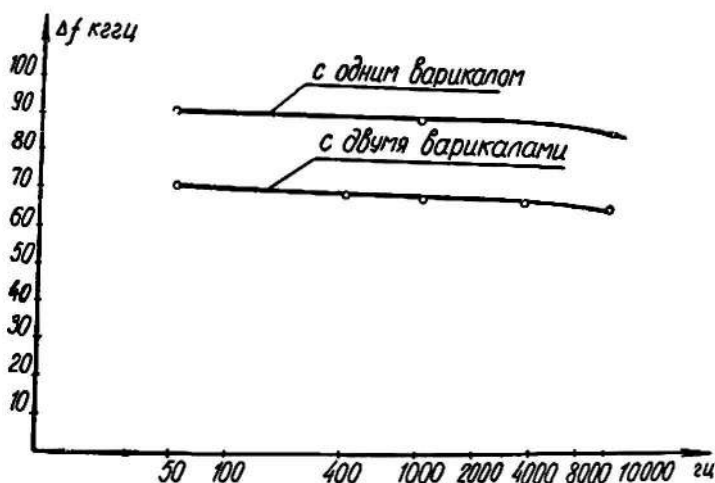


Рис. 6. Зависимость девиации частоты от частоты модулирующего напряжения

Так, для поддержания девиации частоты на уровне 50 кГц по всему диапазону модулирующее напряжение следует изменять в пределах от 28 до 140 мВ для схемы с одним варикапом и от 36 до 190 мВ для схемы с двумя варикапами (рис. 4).

Зависимость девиации частоты от частоты модулирующего напряжения приведена на рис. 6. Эти зависимости снимались в трех точках диапазона при фиксированных значениях модулирующего напряжения, причем величина модулирующего напряжения в каждой точке диапазона выбрана такой, при которой девиация частоты получилась одинаковой.

Как видно из приведенных графиков, девиация частоты с изменением частоты модулирующего напряжения почти постоянна по всему диапазону для обеих схем.

Нестабильность средней частоты в функции модулирующего напряжения показана на рис. 7. Эти зависимости снимались в трех точках диапазона. Моделирующее напряжение изменялось в пределах, обеспечивающих неискаженные сигналы на выходе дискриминатора в каждой точке диапазона.

Как видно из приведенных графиков, нестабильность частоты увеличивается с ростом модулирующего напряжения. При одних и тех же значениях модулирующего напряжения нестабильность частоты по диапазону для схемы с двумя варикапами меньше, чем для схемы с одним варикапом примерно в два раза и больше на низкочастотном конце диапазона. Это объясняется нелинейной зависимостью $C = \varphi(U_{упр})$, которая для обеих схем к высокочастотному концу диапазона меньше. Заметим, что нестабильность средней частоты резко повышается при

достижении модулирующим напряжением таких величин, при которых начинают появляться искажения протектированного сигнала на выходе дискриминатора. Максимальная относительная нестабильность средней частоты для обеих схем, вычисленная по экспериментальным данным, следующая: на частоте 6 мГц равна соответственно $3,3 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$. Минимальная нестабильность на частоте 10 мГц для обеих схем равна $4 \cdot 10^{-4}$ и $2 \cdot 10^{-4}$.

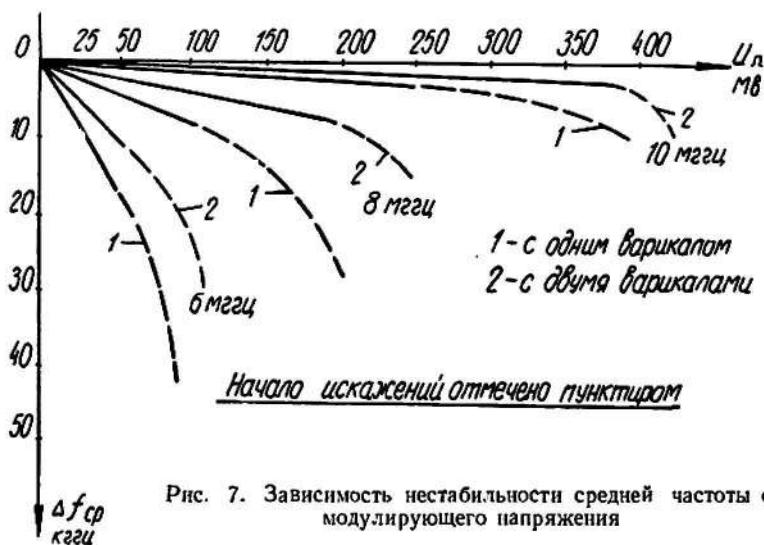


Рис. 7. Зависимость нестабильности средней частоты от модулирующего напряжения

Из вышеизложенного следует, что в схеме с двумя варикапами можно получить по диапазону большую величину и равномерность амплитуды напряжения на контуре, меньшую нестабильность средней частоты, а также большую девиацию частоты при неискаженной модуляции, чем в схеме с одним варикапом. Кроме того, отпадает необходимость в разделительном конденсаторе C_2 (рис. 1, а), роль которого выполняет второй варикап. К недостаткам схемы с двумя варикапами следует отнести необходимость подачи больших значений модулирующего напряжения (чем в схеме с одним варикапом) для достижения той же девиации частоты. Для обеспечения максимальной девиации частоты целесообразно применять один варикап, хотя линейные свойства его, как элемента, используемого для перестройки, гораздо хуже (особенно в начале диапазона), чем двух варикапов.

Однако большие значения девиации частоты при малых значениях модулирующего напряжения дают возможность применять плавную и ступенчатую регулировку модулирующего напряжения обратно пропорционально напряжению, управляющему емкостью варикапа как органа перестройки, тем самым компенсируя его большую нелинейность.

Из всего вышесказанного следует, что использование варикапов в автогенераторах на туннельных диодах возможно как для получения частотной модуляции, так и для перестройки.

В заключение следует отметить, что все теоретические выводы подтвердились экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам под редакцией Н. Н. Горюнов. Изд-во «Энергия», 1964.
2. В. К. Лабутин. Колебательный контур, перестраиваемый нелинейной емкостью. Изд-во «Энергия», Л., 1964