

Г. В. Абрамов, И. Р. Добрянский,
Л. В. Макарова

АНАЛИЗ РАБОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

В технике электро- и радиоизмерений, а также при измерениях неэлектрических величин электрическими методами широкое применение находят автогенераторы различного диапазона волн, при этом часто используется влияние различного рода датчиков (например, индуктивных) непосредственно на режим работы и частоту автогенератора. В настоящее время начинают использоваться автогенераторы на туннельных диодах, которые выгодно отличаются от других типов автогенераторов высокой надежностью, малым весом и габаритами, большой долговечностью.

В ряде работ, посвященных этому вопросу, статическая вольт-амперная характеристика диода аппроксимируется степенными полиномами (Л1, Л2, Л3, Л4, Л5). Однако при такой аппроксимации либо результаты получаются грубо приближенными (при аппроксимации полиномом третьей степени), либо вычисления становятся настолько громоздкими, что могут быть проведены лишь с помощью вычислительных машин (при аппроксимации полиномом более высоких степеней), т. е. такой метод аппроксимации не дает достаточно ценных практических результатов. В Л6 используется аппроксимация характеристики туннельного диода выражением

$$i = AU \exp\left(-\frac{U}{U_A}\right) + C_L U + I_s \exp\left(\frac{U}{U_T}\right).$$

Но, как показано в Л3, и этот вид аппроксимации для отечественных диодов дает значительную погрешность.

В предлагаемой статье приводится анализ энергетических характеристик генератора на основе аппроксимации статической вольтамперной характеристики туннельного диода тригонометрическим полиномом. При этом для вычисления коэффициентов аппроксимирующего полинома используется схема Рунге, обеспечивающая простоту вычислений при сохранении значительного ко-

личества узлов интерполяции (здесь используется метод 12 ординат (Л7)). Окончательные формулы позволяют получить высокую точность расчета при относительной простоте вычислений, что достигается использованием хорошо табулированных Бесселевых и тригонометрических функций.

Аппроксимация статической вольтамперной характеристики туннельного диода

На рис. 1 (сплошная линия) приведена вольтамперная характеристика туннельного диода типа ГИ304А. Аппроксимация разрывной функции 1—2—3—4—5—6 потребовала бы сохранения

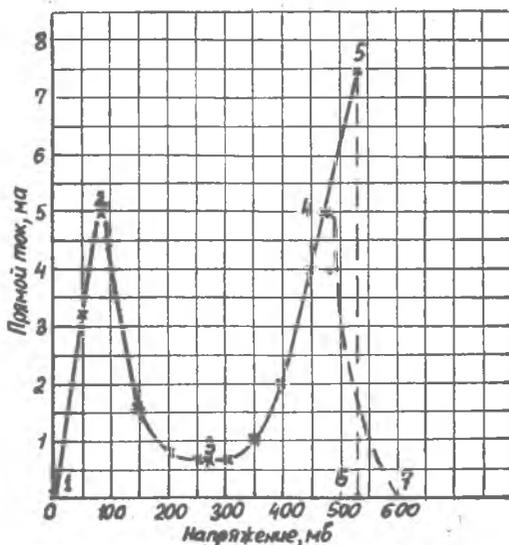


Рис. 1 Типовая вольтамперная характеристика туннельного диода типа ГИ304—А, Б

большого числа составляющих тригонометрического ряда, что значительно затруднило бы дальнейшие исследования. Так как участок 4—5 характеристики является не рабочим, для улучшения сходимости аппроксимирующего ряда построим характеристику участком 4—7, который примерно параллелен участку 2—3 и простирается до пересечения с осью абсцисс при выбранном значении напряжения E_0 . Теперь подвергнем аппроксимации тригонометрическим полиномом кривую 1—2—3—4—7, учитывая, что практически использовать результаты можно

лишь до напряжения на диоде, соответствующего точке 4.

Обозначим напряжение, соответствующее точкам 1—7, через E_0 и введем новую переменную

$$x = 2\pi \frac{U}{E_0}. \quad (1)$$

Здесь U — мгновенное напряжение на диоде.

Тогда аппроксимирующий тригонометрический многочлен, дающий наилучшее приближение в смысле метода наименьших квадратов, будет

$$i = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad (2)$$

если коэффициенты a_0, a_k, b_k будут вычислены по известным формулам Бесселя (Л17):

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N i(x_l) \\ a_k &= \frac{2}{N} \sum_{l=1}^N i(x_l) \cos mx_l \\ b_k &= \frac{2}{N} \sum_{l=1}^N i(x_l) \sin mx_l \end{aligned} \right\} m = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Здесь x_l — значения x для точек интерполяции;
 $i(x_l)$ — значения тока для точек интерполяции;
 $2n+1 \leq N$ — число узлов интерполяции.

В случае $2n+1=N$ ошибка аппроксимации в точках интерполяции будет равна нулю.

Вычисление коэффициентов a_0, a_k, b_k значительно упрощается, если использовать схему Рунге, в частности, для случая 12 ординат. Эту схему можно найти в Л7, Л9 и др. математической литературе.

Для характеристики туннельного диода ГИ304А коэффициенты аппроксимирующего полинома, вычисленные по предлагаемой методике, имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} a_0 &= 2,03 \text{ ма}; a_1 = 0,814 \text{ ма}; a_2 = -1,24 \text{ ма}; a_3 = -1,045 \text{ ма}, \\ a_4 &= -0,422 \text{ ма}; a_5 = -0,12 \text{ ма}; b_1 = -0,476 \text{ ма}; b_2 = 0,52 \text{ ма} \\ b_3 &= 0,675 \text{ ма}; b_4 = 0,072 \text{ ма}; b_5 = -0,5 \text{ ма}; \end{aligned}$$

Следует заметить, что точное совпадение реальной характеристики с аппроксимирующей в нашем случае будет для 9 точек, отмеченных X на рис. 1, т. е. точность аппроксимации достаточно высокая.

Расчет нагрузочных характеристик генератора

На рис. 2 а представлена одна из возможных схем генератора на туннельных диодах.

Здесь R_6, C_6 — блокировочные элементы;
 L_k, C_k, R_3 — элементы нагрузочного контура.

Пренебрегая собственным положительным активным сопротивлением и индуктивностью вводов вводов диода, представим эквивалентную схему генератора (рис. 2б).

Здесь $C_k = C'_k + C_\partial$;

C_∂ — емкость диода;

g_∂ — отрицательная проводимость диода;

$g_3 = \frac{1}{R_3}$ — активная проводимость нагрузочного контура, приведенная к вводам диода.

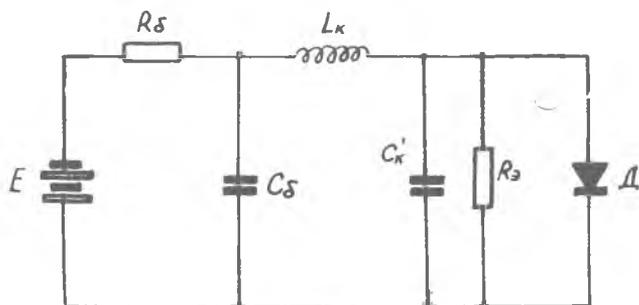
Условием стационарности генератора с отрицательным сопротивлением, как известно (Л10), являются равенства:

$\partial_3 + g_{\alpha}^- = 0$ — условие баланса амплитуд;

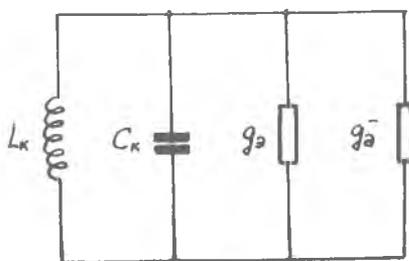
$X_3 + X_d^- = 0$ — условие баланса фаз.

Здесь X_3 — реактивная составляющая нагрузочного контура;

X^- — реактивная составляющая отрицательного сопротивления в нашем случае $X_d^- = 0$, т. к.



а)



б)

Рис. 2, а, б. Схема генератора на туннельных диодах

вольтамперная характеристика туннельного диода имеет форму «тонкой линии», следовательно, частота генерируемых колебаний определится из условия

$$X_3 = 0, \quad (6)$$

т. е. она равна резонансной частоте колебательного контура*.

Для обеспечения высокой стабильности частоты автоколебаний добротность колебательной системы автогенератора выбира-

* Здесь не рассматривается поправка на частоту генерации за счет нелинейности вольтамперной характеристики диода.

ется достаточно высокой, следовательно, переменная составляющая напряжения на диоде в этом случае будет $U_1 \cos \omega t$, тогда

$$u = U_0 + U_1 \cos \omega t, \quad (7)$$

и условие баланса амплитуд примет вид:

$$\partial_3 + \frac{I_1}{U_1} = 0, \quad (8)$$

где U_0 — постоянное напряжение на диоде;

I_1 — амплитуда первой гармоники тока через диод.

Равенство (1) с учетом (7) принимает вид:

$$X = 2\pi \frac{U_0}{E_0} \left(1 + \frac{U_1}{U_0} \cos \omega t \right). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (2), имеем

$$\begin{aligned} i &= a_0 + \sum_{k=1}^n \left\{ a_k \cos \left[k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \left(1 + \frac{U_1}{U_0} \cos \omega t \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + b_k \sin \left[k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \left(1 + \frac{U_1}{U_0} \cos \omega t \right) \right] \right\} = \\ &= a_0 + \sum_{k=1}^n C_k \left[\cos \left(\beta_k - k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) \cos \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \cos \omega t \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sin \left(\beta_k - k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) \sin \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \cos \omega t \right) \right]. \end{aligned}$$

Но

$$\cos \left(k 2\pi \frac{U_1}{U_0} \cos \omega t \right) = I_0 \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p I_{2p} \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) \cos 2p \omega t;$$

$$\sin \left(k 2\pi \frac{U_1}{U_0} \cos \omega t \right) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p I_{2p-1} \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) \cos (2p-1) \omega t.$$

И тогда

$$\begin{aligned} i &= a_0 + \sum_{k=1}^n C_k \left\{ \cos \left(\beta_k - k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) \left[I_0 \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p I_{2p} \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) \cos 2p \omega t \right] + \right. \\ &\quad \left. + \sin \left(\beta_k - k 2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) \left[2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p I_{2p-1} \left(k 2\pi \frac{U_1}{E_0} \right) \cos (2p-1) \omega t \right] \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

Здесь $C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$;

$$\operatorname{tg} \beta_k = \frac{b_k}{a_k};$$

I_0, I_{2p}, I_{2p-1} — функции Бесселя первого рода.

Так как $\operatorname{tg} \beta_k$ имеет период 180° , необходимо уточнить, каким образом выбирается β_k в зависимости от знаков коэффициентов b_k и a_k .

Целесообразно вначале определить угол β'_k из условия $\operatorname{tg} \beta'_k = \frac{|b_k|}{|a_k|}$, затем руководствоваться следующим:

- если $b_k > 0, a_k > 0$, то $\beta_k = \beta'_k$;
- если $b_k > 0, a_k < 0$, то $\beta_k = \pi - \beta'_k$;
- если $b_k < 0, a_k < 0$, то $\beta_k = \pi + \beta'_k$;
- если $b_k < 0, a_k > 0$, то $\beta_k = 2\pi - \beta'_k$.

Из равенства (10) легко определить постоянную составляющую тока диода I_0 и амплитуду первой гармоники I_1 :

$$I_0 = a_0 + \sum_{k=1}^n C_k \cos \left(\beta_k - k2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) I_0 \left(k2\pi \frac{U_1}{E_0} \right); \quad (11)$$

$$I_1 = 2 \sum_{k=1}^n C_k \sin \left(\beta_k - k2\pi \frac{U_0}{E_0} \right) I_1 \left(k2\pi \frac{U_1}{E_0} \right). \quad (12)$$

Теперь легко произвести исследование энергетических характеристик генератора на туннельном диоде. Используя равенства (11) и (12), рассчитываем для конкретно выбранного диода зависимости $I_0 = \varphi_0(U_1)$ и $I_1 = \varphi_1(U_1)$ при различных значениях напряжения смещения U_0 , затем, используя (8), строим нагрузочные характеристики генератора

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \psi_1(g_3) \\ P_\infty &= \frac{1}{2} U_1^2 g_3 = \psi_2(g_3) \\ P_0 &= U_0 I_0 = \psi_3(g_3) \\ P_a &= P_0 - P_\infty = \psi_4(g_3) \\ \eta &= \frac{P_a}{P_0} = \psi_5(g_3) \end{aligned} \right\} \text{Для различных значений } U_0. \quad (13)$$

Иногда удобнее иметь семейство нагрузочных характеристик в зависимости от эквивалентного сопротивления нагрузочного контура

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= \frac{1}{g_3} \\ U_1 &= \Phi_1(R_3) \\ P_\infty &= \Phi_2(R_3) \\ P_0 &= \Phi_3(R_3) \\ P_a &= \Phi_4(R_3) \\ \eta &= \Phi_5(R_3) \end{aligned} \right\} \text{Для различных значений } U_0. \quad (14)$$

Руководствуясь полученными зависимостями (13) и (14), выбирается оптимальный режим работы генератора на туннельном диоде.

В качестве примера использования предлагаемого метода исследования генератора на туннельном диоде на рис. 3, 4, 5,

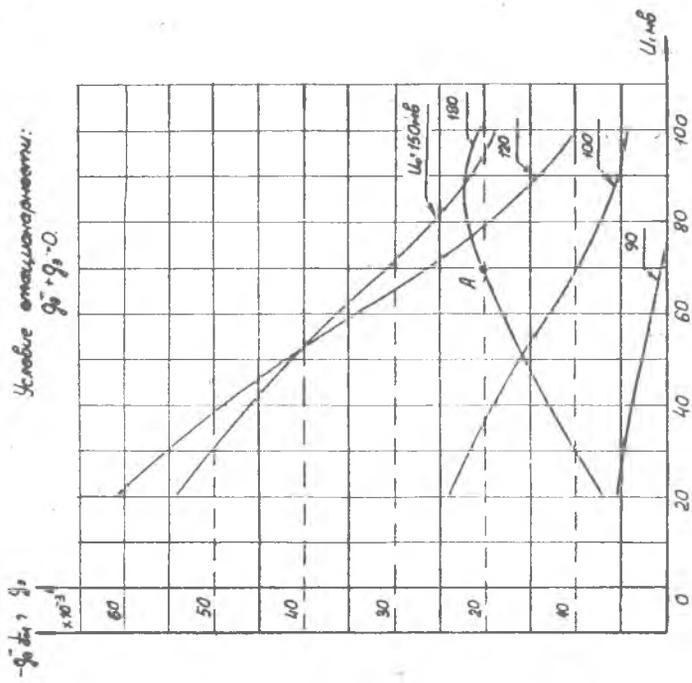


Рис. 3. Колебательные характеристики автогенератора на туннельном диоде ГИ304А и линии активной проводимости колебательного контура

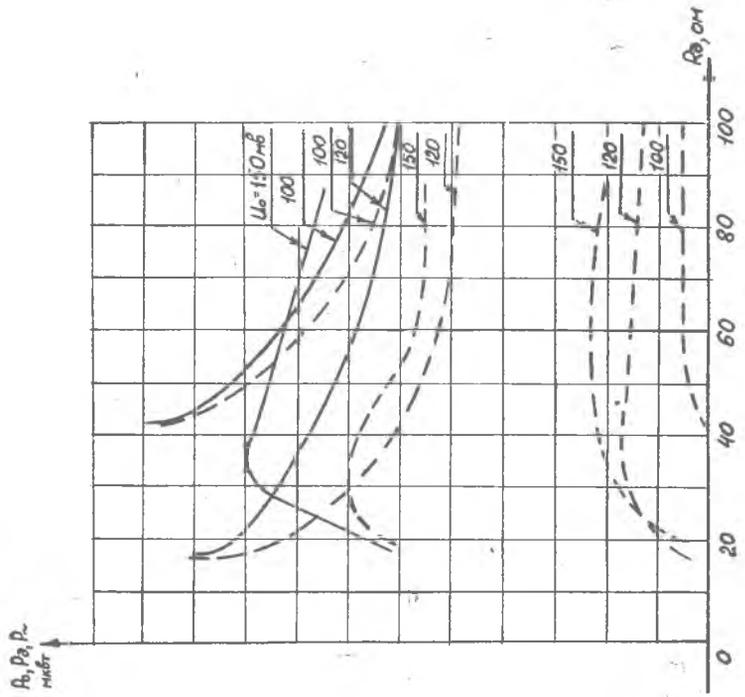


Рис. 4. Нагрузочные характеристики автогенератора на туннельном диоде ГИ304А

приведены результаты расчета, а именно: нагрузочные характеристики генератора с использованием диода ГИ304 при различных напряжениях смещения. Из этих графиков можно сделать вывод, что оптимальный режим для данного генератора будет при $U_0 = 130$ мв и $R_3 = 67$ ом.

По приведенным характеристикам можно легко судить о характере самовозбуждения (мягкий или жесткий режим) автогенератора.

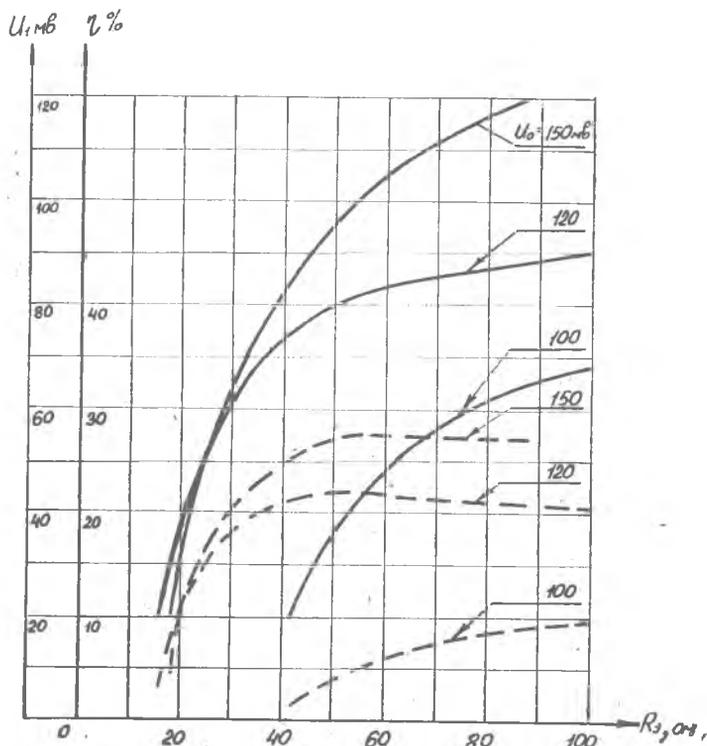


Рис. 5. Нагрузочные характеристики автогенератора на туннельном диоде ГИ304А

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Чжоу. Принципы построения схем на туннельных диодах. Изд. «Мир», Москва, 1966.
2. К. Ким, А. Брендли. Работа туннельного диода на высоких частотах при больших уровнях мощности. «Зарубежная радиоэлектроника», № 11, 1962.
3. В. С. Андреев. Расчет основных характеристик генераторов на туннельных диодах. «Электросвязь», № 11, 1966.
4. В. С. Андреев и др. Расчет генераторов на туннельных диодах по усредненным характеристикам. «Радиотехника», т. 11, № 5, 1967.

5. Э. А. Акчурин, В. В. Рудь. Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение под редакцией Я. А. Федотова, изд. «Советское радио», вып. 14, 1965.

6. Degen U. A. Berechnung der Schwingungsamplitude und der Leistung eines Funneldi odereoszillators «Archiv der Elektrischen Übertragung» Band 18 September 1964, Heft 9.

7. И. С. Березин, Н. П. Жидков. Методы вычислений. Изд. «Наука», Москва, 1966.

8. Е. Янке и др. Специальные функции. Изд. «Наука», Москва, 1964.

9. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Издательство «Наука», Москва, 1965.

10. Я. Грошковский. Генерирование высокочастотных колебаний и стабилизации частоты. Изд. «Иностранная литература», Москва, 1953.

