УДК 621.373

Л. П. ЗАХАРОВ

ПОРОГОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРОВ НА НЕГАТРОНАХ С РЕГУЛИРОВКОЙ АКТИВНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

При установлении пороговых значений параметров генераторо на негатронах с активными потерями в контуре [1] можно исполь зовать результаты решения уравнения стационарности и рассмат ривать условия баланса амплитуд и фаз. Однако для систем третьего порядка эти условия записываются уравнениями шестой и четвертой степеней относительно частоты, а их совместное решение трудоемко [2].

Цель работы — определение пороговых характеристик генератора при различных соотношениях значений его регулируемых и фиксированных параметров. Для этого определяется область устойчивости состояния равновесия нелинейной автоколебательной системы [3] и деформация ее колебательной границы при вариациях параметров.

Рассмотрим принципиальную и эквивалентную по переменному току схемы генератора (рис. 1, *а*, *б*) на негатроне типа N с собствен-

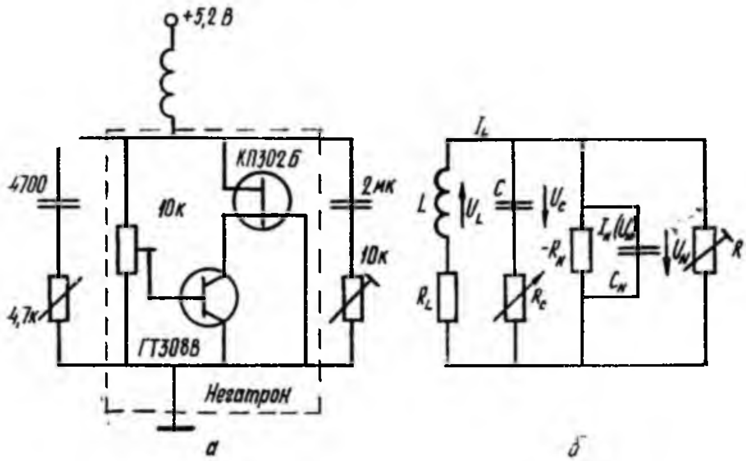

Рис. 1

ной емкостью C_N, который подключен к параллельному LC контуру с переменным резистором R_C в емкостной ветви. Для регулировки отрицательного сопротивления негатрона по переменному току параллельно негатрону включен резистор R. Запишем исходную систему уравнений генератора для действующих значений токов и напряжений (рис. 1):

$$\frac{\mathrm{d}I_L}{\mathrm{d}t} = -\frac{R_L}{L} I_L - \frac{1}{L} U_N + \frac{1}{L} E; \quad \frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t} = -\frac{1}{CR_C} U_C + \frac{1}{CR_C} U_N;$$

$$\frac{\mathrm{d}U_N}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C_N} I_L + \frac{1}{C_N R_C} U_C - \frac{R+R_C}{C_N R R_C} U_N - \frac{1}{C_N} I_N(U_N), \qquad (1)$$

где $I_N(U_N)$ — ВАХ негатрона, аппроксимируемая кубической параболой

$$I_N(U_N) = I_M - \frac{1}{|R_N|}(U_N - U_M) + \frac{1}{3|R_N|^2 U_0^2}(U_N - U_M)^3; \qquad (2)$$

$|R_N|$ — модуль сопротивления негатрона в рабочей точке M; U_0 — параметр ВАХ (рис. 2).

Состояние равновесия данной системы определим, приравняв правые части уравнений (1) к нулю, откуда $U_C = U_N = U_M$; $I_L = I_M$ (3). Рассматривая устойчивость состояния равновесия (3) «в малом», выполняем линеаризацию характеристики негатрона, пренебрегая в (2) кубическим членом, и приводим систему (1) для малых отклонений к виду

$$\Delta I_L = I_L - I_M;\ \Delta U_C = U_C - U_M;\ \Delta U_N = U_N - U_M. \qquad (4)$$

Затем переносим начало фазового пространства в точку M (рис. 2) и используем в преобразованной системе: безразмерные токи и напряжения, полученные с помощью нормировки по параметрам ВАХ,— I_0, U_0,

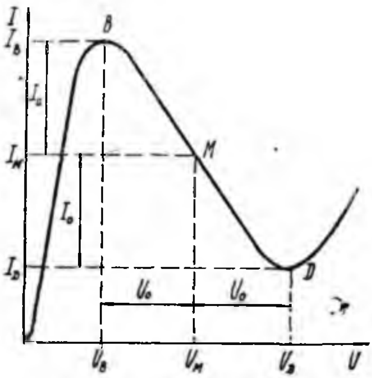

Рис. 2

$$i_L = \Delta I_L / I_0;\ \ u_C = \Delta U_C / U_0;$$
$$u_N = \Delta U_N / U_0; \qquad (5)$$

безразмерные параметры

$$r_L = R_L / |R_N|;\ r_C = R_C / |R_N|;$$
$$r = R / |R_N|;\ r_0 = R_0 / |R_N|;$$
$$\rho = \frac{L}{C\,|R_N|^2};\ c_N = C_N / C \qquad (6)$$

и безразмерное время $\tau = t / C|R_N|$. Тогда имеем систему линейных уравнений

$$\frac{d\,i_L}{d\tau} = -\frac{r_L}{\rho} i_L - \frac{r_0}{\rho} u_N;\quad \frac{d\,u_C}{d\tau} = -\frac{1}{r_C} u_C + \frac{1}{r_C} u_N;$$
$$\frac{d\,u_N}{d\tau} = \frac{1}{c_N r_0} i_L + \frac{1}{c_N r_C} u_C - \frac{r + r_C - r r_C}{r r_C c_N} u_N. \qquad (7)$$

Систему (7) представим в виде векторного уравнения $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A x}$, а затем, взяв матрицу $\boldsymbol{A}$, из коэффициентов (7) запишем характеристическое уравнение $|\boldsymbol{A} - p\boldsymbol{E}| = 0$, где $\boldsymbol{E}$ = единичная матрица третьего порядка. Полученное уравнение после замены $p = \lambda / C|R_N|$ и раскрытия определителя представим как $a_0\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0$. (8)
Приведем зависимость коэффициентов a_i (i равно 0,1, 2, 3) от параметров (6) при $r_L \to 0$:

$$a_0 = \rho c_N r_C r; \qquad (8\ а)$$
$$a_1 = \rho\,[r(1 + c_N) + r_C(1 - r)]; \qquad (8\ б)$$
$$a_2 = \rho(1 - r) + r_C r; \qquad (8\ в)$$
$$a_3 = r. \qquad (8\ г)$$

В области устойчивости состояний равновесия данной системы, как известно, выполняются условия $a_i > 0$ (9); $\Delta_{n-1} > 0$ (9а), где Δ_{n-1}— предпоследний определитель матрицы Гурвица. Следовательно, область устойчивости рассматриваемой системы третьего порядка ограничена колебательной границей (КГ) — в общем случае гиперповерхностью, заданной уравнением $\Delta_{n-1} = a_1 a_2 - a_3 a_0$ (10), выполнение которого соответствует появлению пары сопряженных чисто мнимых корней уравнения (8) $p_{1,2} = \pm j\omega$, причем в схеме возникают синусоидальные колебания с частотой ω_q, определяемой по формуле $\omega_q = \sqrt{a_2/a_0}$ (11), или $\omega_q = \sqrt{a_3/a_1}$ (12). Здесь ω_q — относительная круговая частота, $\omega_q = \omega C \mid R_N \mid$.

В практических схемах целесообразно использовать не более двух регулируемых параметров, например, R_C и R (рис. 1). В этом случае область устойчивости представляет собой «отпечаток» в сечении гиперповерхности (10) плоскостью параметров r_C, r. Поставленную задачу можно решить, подставив в (10) значения a_i из (8), выделив на плоскости r_C, r область, в которой выполняются условия (9), и вычислив частоты по формулам (11), (12) в точках, соответствующих КГ.

Ввиду сложности указанной операции для определения пороговых значений параметров генератора целесообразно использовать приближенный метод [1]. В данном случае его применение обосновано тем, что выражение для a_0 (8а) содержит в качестве сомножителя параметр c_N, который, с физической точки зрения, можно считать малым, т. е. $c_N \ll 1$ (6). Поэтому точное уравнение КГ (10) можно заменить приближенным $\Delta_{n-1} \approx a_1 a_2 = 0$, распадающимся на два уравнения: $a_1 = 0$ и $a_2 = 0$. Используя в них значения a_1, a_2, из (8) запишем уравнения гипербол

$$r = -\frac{r_C}{1 + c_N - r_C}; \tag{13}$$

$$r = \frac{\rho}{\rho - r_C}, \tag{13 а}$$

которые с достаточной точностью аппроксимируют изменение КГ вне окрестности точки пересечения кривых, заданных приближенными уравнениями, где поведение КГ уточняется известными методами.

Поведение КГ, которая претерпевает качественные деформации при неотрицательных значениях параметров (6) и выходе параметра ρ за верхние границы интервалов $[0 < \rho \leqslant c_N,\ c_N < \rho < 1 + c_N]$ при значениях $\rho_1 \sim c_N$; $\rho_2 \sim 1 + c_N$, показано на рис. 3, *а*, *б*, *в*. С помощью непосредственной проверки нетрудно убедиться в том, что условия (9) выполняются в областях графиков, покрытых штриховкой.

Частоту колебаний на участке границы колебательной неустойчивости, проходящей в области реализуемых значений параметров $r_C \geqslant 0$, $r \geqslant 1$, определим для ветви гиперболы, описываемой уравнением (13), по формуле (11). Учитывая, что $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и $\rho = L/C \mid R_N \mid^2$, и производя замену переменной в соответствии с (13), имеем

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{r_C^2 - \rho(1 + c_N)}{r_C^2 c_N}. \tag{14}$$

Для ветви гиперболы, описываемой уравнением (13а), аналогично получим

$$\frac{\omega_2}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho(1+c_N) - r_C^2}}. \qquad (14\ а)$$

Кривые функций $\eta_1 = \frac{\omega_1}{\omega_0}\frac{1}{\sqrt{1+c_N}}(r_C)$ и $\eta_2 = \frac{\omega_2}{\omega_0}\frac{10}{\sqrt{c_N}}(r_C)$ на КГ при различных значениях ρ представлены на рис. 3, *г*, *д*, *е*. Согласно рисунку степень отличия пороговых частот уменьшается для ряда фиксированных значений $r^* (r^* > 1)$.

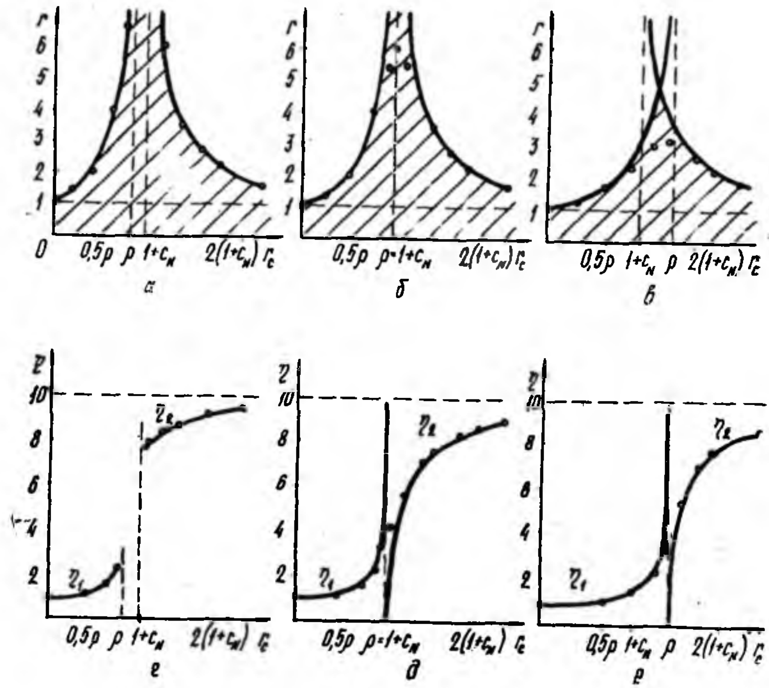

Рис. 3

Экспериментальные исследования рассматриваемых режимов выполнялись на лабораторном макете генератора, в котором в качестве негатрона использовалась структура из биполярного транзистора типа ГТ308В и полевого транзистора КП302Б, а колебательный контур настраивался на частоту 100 КГц. Параметры негатрона в рабочей точке $|R_N| = 750$ Ом; $C_N = 100$ пФ. Параметр ρ регулировался сердечником из ферромагнитного материала. Результаты эксперимента, отмеченные точками на рис. 3, полностью подтверждают данные анализа.

Осуществление регулировки зоны устойчивости и пороговых частот колебаний в широких пределах, а также простота схемотехнического решения рассматриваемого генератора свидетельствуют о целесообразности его применения, например, в качестве компаратора с широкими функциональными возможностями.

Список литературы: 1. *Биберман Л. И.* Широкодиапазонные генераторы на негатронах. М., 1982. 88 с. 2. *Биберман Л. И.* Двухпороговая генерация в автоколебательных системах // Радиотехника. 1986. № 10. С. 29—31. 3. *Конторович М. И.* Нелинейные колебания в радиотехнике (автоколебательные системы). М., 1973. 320 с.

Поступила в редколлегию 26.06.87