

К анализу обобщённой схемы генератора высокой частоты

А. М. Михеенко

В предлагаемом материале выполнен обобщённый анализ ключевого генератора высокой частоты, который позволяет оценить энергетические показатели генератора в широком диапазоне частот и параметров схемы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективные преобразователи электрической энергии в последние годы нашли самое широкое применение, вытеснив практически всё, что использовалось для этих целей до 80-90 гг прошлого века. В генераторной технике высокой частоты это менее заметно, хотя многое достигнуто и в этой области. В частности, в мощном радиостроении достаточно широко использовался «бигармонический режим» генератора. С появлением мощной твердотельной электроники применение нашли двухтактные схемы последовательных резонансных инверторов (генераторы класса «D») [1].

Возможность повышения к.п.д. и мощности была обнаружена при работе генератора на расстроенную нагрузку ещё в 60-е годы Е.П. Хмельницким [2]. Генераторы аналогичного типа в зарубежной литературе получили условное название «генератор класса Е», а в отечественной «ключевой генератор с формирующим контуром» [3]. Несмотря на то, что генераторы класса «Е» обеспечивают высокий к.п.д. на предельных для ключевого режима частотах, в силу ряда причин их применение ограничивается пока стадией эксперимента. Ниже приводится анализ схемы в самом общем виде для широкого диапазона частот и параметров схемы.

2. АНАЛИЗ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

Упрощённая схема исследуемого генератора представлена на рисунке 1, где АЭ – активный элемент (транзистор, лампа), работающий в режиме «ключа»; VD – диод, обеспечивающий рекуперацию энергии реактивных элементов при «разомкнутом ключе»; L, C – элементы контура, определяющие форму напряжения на АЭ; L_к, C_к – нагрузочный контур, настроенный на частоту управляющего напряжения.

Полагая, что отпирание и запираение АЭ полностью определяется управляющим напряжением (U_y), представим исследуемый генератор двумя эквивалентными схемами, отражающими процессы в генераторе при открытом и закрытом состоянии АЭ.

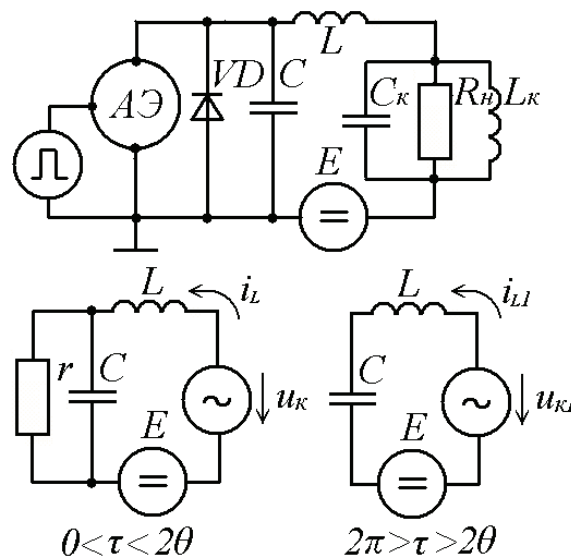


Рис. 1. Схема генератора

Здесь $u_k = U_k \sin(\tau + \varphi)$;

$\tau = \omega t$;

2θ – угол, соответствующий времени, в течение которого АЭ находится в открытом состоянии;

i_{L1} , i_L – токи во внешней цепи генератора для соответствующих эквивалентных схем.

Дифференциальные уравнения для эквивалентных схем принимают вид:

$$\frac{d^2 i_L}{d\tau^2} + \frac{1}{r\omega C} \frac{di_L}{d\tau} + v^2 i_L = \frac{v^2 E}{r} - U_k \left(\frac{v^2 \sin(\tau + \varphi)}{r} + \frac{\cos(\tau + \varphi)}{\omega L} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d^2 i_{L1}}{d\tau^2} + v^2 i_{L1} = -\frac{U_k}{\omega L} \cos(\tau + \varphi). \quad (2)$$

Решение этих уравнений может быть записано в следующем виде:

$$i = \sigma + \xi \varepsilon_1 \cos(\tau + \varphi) - \xi \varepsilon_2 \sin(\tau + \varphi) + I_{11} \exp(p_1 \tau) + I_{12} \exp(p_2 \tau) \dots, \quad (3)$$

$$i_1 = I_{21} \cos \nu(\tau - 2\theta) + I_{22} \sin \nu(\tau - 2\theta) - \frac{1}{\nu^2 - 1} \xi \cos(\tau + \varphi), \quad (4)$$

$$U = -\xi \varepsilon_1 \sin(\tau + \varphi) - \xi \varepsilon_2 \cos(\tau + \varphi) + p_1 I_{11} \exp(p_1 \tau) + p_2 I_{12} \exp(p_2 \tau), \\ U_1 = \nu I_{22} \cos \nu(\tau - 2\theta) - \nu I_{21} \sin \nu(\tau - 2\theta) + \frac{1}{\nu^2 - 1} \xi \sin(\tau + \varphi). \quad (5)$$

Здесь приняты следующие обозначения

$i = i_L \frac{\omega L}{E}$, $i_1 = i_{L1} \frac{\omega L}{E}$, $u = \frac{L}{E} \frac{di_L}{d\tau}$, $u_1 = \frac{L}{E} \frac{di_{L1}}{d\tau}$, – корни характеристического уравнения (1)

$$\nu^2 = \frac{1}{\omega^2 LC}, \quad \sigma = \frac{\omega L}{r}, \quad \xi = \frac{U_k}{E}, \quad \varepsilon_1 = \frac{p_1^2 - (\nu^2 - 1)}{p_1 + (\nu^2 - 1)^2}, \\ \varepsilon_2 = \frac{\sigma \nu^4}{p_1^2 + (\nu^2 - 1)^2}; \quad (6)$$

$I_{11}; I_{12}; I_{21}; I_{22}$ – постоянные интегрирования.

Полагая режим генератора установившимся, определим постоянные интегрирования, используя принцип непрерывности тока в индуктивности и напряжении на ёмкости контура LC:

$$i(0) = i_1(2\pi); i(2\theta) = i_1(2\theta), \quad (7)$$

$$u_c = u_{c1}(2\pi); u_c(2\theta) = u_{c1}(2\theta). \quad (8)$$

$$\text{Здесь } U_c = E - U_k - U_L. \quad (9)$$

На основании (3) – (6) при условиях (7) – (9) получим

$$I_{11} = A_1 + \xi(B_{11} \sin \varphi + B_{12} \cos \varphi); \\ I_{12} = A_2 + \xi(B_{21} \sin \varphi + B_{22} \cos \varphi); \\ I_{21} = A_3 + \xi(B_{31} \sin \varphi + B_{32} \cos \varphi); \\ I_{22} = A_4 + \xi(B_{41} \sin \varphi + B_{42} \cos \varphi). \quad (10)$$

В последних выражениях приняты следующие обозначения:

$$A_1 = \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$A_2 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$B_{11} = \frac{a_2 b_{41} - a_{41} b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{22} = \frac{a_{42} b_1 - a_1 b_{42}}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$B_{12} = \frac{a_2 b_{42} - a_{42} b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{21} = \frac{a_{41} b_1 - a_1 b_{41}}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$a_1 = 1 - \exp(2p_1\theta) \cos 2\nu(\pi - \theta) -$$

$$-\frac{p_1}{\nu} \exp(2p_1\theta) \sin 2\nu(\pi - \theta);$$

$$a_2 = 1 - \exp(2p_2\theta) \cos 2\nu(\pi - \theta) -$$

$$-\frac{p_1}{\nu} \exp(2p_2\theta) \sin 2\nu(\pi - \theta);$$

$$a_3 = \sigma[1 - \cos 2\nu(\pi - \theta)];$$

$$a_{41} = -\varepsilon_2 + q_1 \cos 2\nu(\pi - \theta) + \frac{1}{\nu} q_2 \sin 2\nu(\pi - \theta);$$

$$a_{42} = \varepsilon_2 - q_2 \cos 2\nu(\pi - \theta) + \frac{1}{\nu} q_1 \sin 2\nu(\pi - \theta);$$

$$b_1 = -p_1[1 - \exp(2p_1\theta) \cos 2\nu(\pi - \theta) +$$

$$+ p_2/\nu \exp(2p_1\theta) \sin 2\nu(\pi - \theta)];$$

$$b_2 = -p_2[1 - \exp(2p_2\theta) \cos 2\nu(\pi - \theta) +$$

$$+ p_1/\nu \cos(2p_2\theta) \cos 2\nu(\pi - \theta)];$$

$$b_3 = -\frac{p_1}{\nu} \sin 2\nu(\pi - \theta); \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_1 + \frac{1}{\nu^2 - 1};$$

$$b_{41} = \varepsilon_2 - q_1 \cos 2\nu(\pi - \theta) + \nu q_2 \sin 2\nu(\pi - \theta);$$

$$A_3 = \sigma + A_1 \exp(2p_1\theta) + A_2 \exp(2p_2\theta);$$

$$A_4 = \frac{p_1}{\nu} A_1 \exp(2p_1\theta) + \frac{p_2}{\nu} A_2 \exp(2p_2\theta);$$

$$B_{31} = B_{11} \exp(2p_1\theta) + B_{21} \exp(2p_2\theta) - q_1;$$

$$q_1 = (\varepsilon_3 \sin 2\theta + \varepsilon_2 \cos 2\theta);$$

$$B_{32} = B_{12} \exp(2p_1\theta) + B_{22} \exp(2p_2\theta) - q_2;$$

$$q_2 = (\varepsilon_3 \cos 2\theta - \varepsilon_2 \sin 2\theta);$$

$$B_{41} = \frac{1}{\nu} (p_1 B_{11} \exp(2p_1\theta) + p_2 B_{21} \exp(2p_2\theta) - q_2);$$

$$B_{42} = \frac{1}{\nu} (p_1 B_{12} \exp(2p_1\theta) + p_2 B_{22} \exp(2p_2\theta) - q_1).$$

Подставляя значения постоянных интегрирования (10) в уравнения (3) – (6), получим описание тока и напряжения на индуктивности в установившемся режиме генератора.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЕНЕРАТОРА

Для определения энергетических показателей генератора необходимо определить ток первой гармоники в нагрузке и ток, потребляемый от источника питания.

$$I_1 = \sqrt{I_{1s}^2 + I_{1c}^2} = \frac{I_{1s}}{\cos \varphi} = \frac{I_{1c}}{\sin \varphi}; \quad \text{где } \tan \varphi = \frac{I_{1c}}{I_{1s}}. \quad (11)$$

Здесь

$$I_{1s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\theta} i_L \sin \tau d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{2\theta}^{2\pi} i_{L1} \sin \tau d\tau = \\ = \frac{E}{\pi \omega L} \left(\int_0^{2\theta} i \sin \tau d\tau + \int_{2\theta}^{2\pi} i_1 \sin \tau d\tau \right) = \quad (12)$$

$$= \frac{E}{\pi \omega L} [A_5 + \xi(B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)];$$

$$I_{1c} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\theta} i_L \cos \tau d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{2\theta}^{2\pi} i_{L1} \cos \tau d\tau = \quad (13)$$

$$= \frac{E}{\pi \omega L} [A_6 + \xi(B_{61} \sin \varphi + B_{62} \cos \varphi)].$$

Параметры $A_5, A_6, B_{51}, B_{52}, B_{61}, B_{62}$ определяются следующими выражениями

$$A_5 = \frac{1}{\pi} \left[\sigma(1 - \cos 2\theta) + \frac{A_1}{1 + p_1^2} d_{12} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (A_3 d_{13} + A_4 d_{14}) \right];$$

$$B_{51} = \frac{1}{\nu^2 - 1} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{11} + \frac{B_{21}}{1 + p_2^2} d_{12} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (B_{31} d_{13} + B_{41} d_{14}) \right];$$

$$B_{52} = \frac{1}{\pi} \left[\varepsilon_2 \left(\frac{\sin 4\theta}{4} - \theta \right) - \varepsilon_3 \left(\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4} \right) + \frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{11} + \frac{B_{22}}{1 + p_2^2} d_{12} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (B_{32} d_{13} + B_{42} d_{14}) \right];$$

$$d_{11} = 1 - \exp(2p_1\theta)(\cos 2\theta - p_1 \sin 2\theta);$$

$$d_{12} = 1 - \exp(2p_2\theta)(\cos 2\theta - p_2 \sin 2\theta);$$

$$d_{13} = \cos 2\nu(\pi - \theta) - \cos 2\theta;$$

$$d_{14} = \sin 2\nu(\pi - \theta) + \nu \sin 2\theta.$$

$$A_6 = \frac{1}{\pi} \left[\sigma \sin 2\theta + \frac{A_1}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{A_2}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (A_3 d_{23} + A_4 d_{24}) \right];$$

$$B_{61} = \frac{1}{\pi} \left[\varepsilon_3 \left(\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4} \right) - \varepsilon_2 \left(\frac{\sin 4\theta}{4} + \theta \right) + \frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{B_{21}}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (B_{31} d_{23} + B_{41} d_{24}) \right];$$

$$B_{62} = -\frac{1}{\nu^2 - 1} + \frac{1}{\pi} \left[\frac{B_{12}}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{B_{22}}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{\nu^2 - 1} (B_{32} d_{23} + B_{42} d_{24}) \right];$$

$$d_{21} = -p_1 + \exp(2p_1\theta)(p_1 \cos 2\theta + \sin 2\theta);$$

$$d_{22} = -p_2 + \exp(2p_2\theta)(p_2 \cos 2\theta + \sin 2\theta);$$

$$d_{23} = \nu \sin 2\nu(\pi - \theta) + \sin 2\theta;$$

$$d_{24} = \cos 2\theta - \cos 2\nu(\pi - \theta).$$

Ток, потребляемый от источника,

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\theta} \frac{U_c}{r} d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\theta} \frac{E - U_k - U_L}{r} d\tau = \frac{E_a}{2\pi\omega L} \int_0^{2\theta} \sigma[1 - \xi \sin(\tau + \varphi) - u] d\tau, \quad (14)$$

где U определено выражением (5).

Результат интегрирования в (14)

$$I_0 = \frac{E_a \sigma}{2\pi\omega L} \left\{ \begin{aligned} &2\theta + \xi [\cos(2\theta + \varphi) - \cos \varphi] (1 - \varepsilon_1) + \\ &+ \xi \varepsilon_2 [\sin(2\theta + \varphi) - \sin \varphi] + \\ &+ I_{11} (1 - \exp(2p_1\theta)) + \\ &+ I_{12} (1 - \exp(2p_2\theta)) \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Коэффициент полезного действия на первой гармонике определяется известным соотношением [3]

$$\eta = \frac{1}{2} \xi \frac{I_1}{I_0}. \quad (16)$$

Поскольку $\xi = \frac{U_k}{E} = \frac{I_1 R_n}{E} = \frac{I_{1s} R_n}{\cos \varphi}$, то согласно (12)

$$\xi = \frac{R_n [A_5 + \xi (B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)]}{\omega L \cos \varphi}. \quad (17)$$

С другой стороны,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{1c}}{I_{1s}} = \frac{A_6 + \xi (B_{61} \sin \varphi + B_{62} \cos \varphi)}{A_5 + \xi (B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)}. \quad (18)$$

Система трансцендентных уравнений (17), (18) позволяет определить искомое значение ξ .

4. Вывод

Из проведённого анализа следует, что непосредственные расчёты энергетических показателей генератора весьма трудоёмки из-за громоздких выкладок и невозможности аналитического решения системы уравнений (17), (18).

Поэтому в каждом конкретном случае целесообразно прибегнуть к численным методам с использованием вычислительной техники.

В качестве примера, с помощью ПЭВМ был выполнен расчёт к.п.д. генератора для частного случая $\theta = 90^\circ$ и $R_n = 5r$.

На рисунке 2 приведена картина зависимости к.п.д. генератора от частоты и параметров LC контура на плоскости переменных (p_1, p_2) .

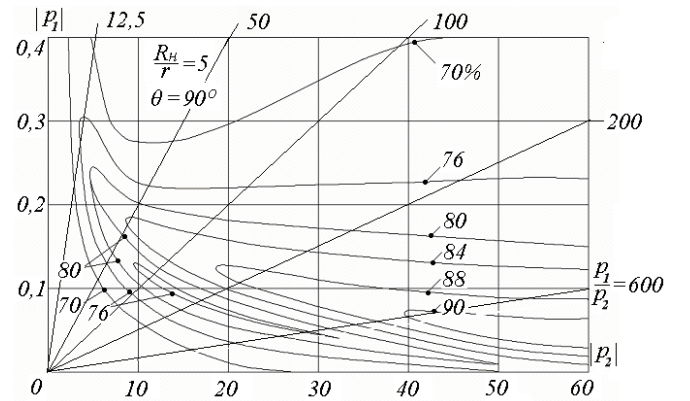


Рис. 2. КПД генератора

В первом приближении $|p_1| \approx \frac{1}{\omega r C}$; $|p_2| = \frac{r}{\omega L}$;

$$p_1 p_2 = \frac{\omega_0}{\omega}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Частотные характеристики к.п.д. генератора можно получить сечением поверхности на рисунке 2 плоскостями, соответствующими конкретным значениям отношения $\frac{P_2}{P_1}$;

графики к.п.д. в функции от $\frac{1}{P_2} = \frac{\omega L}{r}$ представлены на рисунке 3.

Здесь, как и на рисунке 2, рассмотрен частный случай $\theta = 90^\circ$ и $R_n = 5r$.

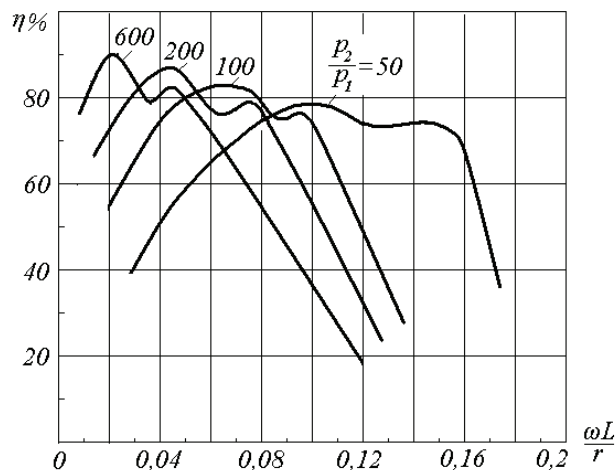


Рис. 3. Частотные характеристики генератора

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриков В. Ф., Петяшин Н. Б., Сиверс М. А. Высокоэффективные формирователи гармонических колебаний. – М.: Радио и связь, 1988. – 192 с.:ил.
2. Хмельницкий Е. П. Работа лампового генератора на расстроенный контур. – М.: Связьиздат, 1962. – 109 с.:ил.
3. Артым А. Д. Усилители классов D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. – М.: Связь, 1980. – 209 с.:ил.

Михеенко Анатолий Михайлович

к.т.н., доцент, кафедра беспроводных информационных сетей и систем СибГУТИ,
тел. 269-82-65, e-mail: amm@neic.nsk.su