

7. П о с п е л о в, Г. Е. Новый взгляд на возможности электропередачи переменного тока в режиме четверти волны / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 5–6. – С. 3–8.

8. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 312 с.

9. И в а к и н, В. Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В. Н. Ивакин, В. Д. Ковалев // Электричество. – 2001. – № 9. – С. 30–37.

10. П о с п е л о в а Т. Г. Потенциальные области использования FACTS и АСМ в Белорусской энергосистеме / Т. Г. Поспелова // Энергия и Менеджмент. – 2006. – № 4 (31). – С. 37–43.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 14.04.2008

УДК 621.385.6

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ОДНОКОНТУРНОМ РЕЗОНАНСНОМ ГЕНЕРАТОРЕ**

**Канд. техн. наук, доц. МОРОЗ В. К., канд. физ.-мат. наук, доц. ПОЛИЩУК А. А.,  
инженеры МИХАЛЬЦЕВИЧ Г. А., САЦУКЕВИЧ Е. М.**

*Белорусский государственный технологический университет,  
Белорусский национальный технический университет*

В одноконтурном генераторе с отражательным полем один и тот же резонатор является и группирователем и улавливателем (рис. 1). Электронный поток, создаваемый катодом 1, фокусируется и управляется напряжением  $U_c$  на управляющей сетке 2. Ускоряющее поле создается сетками 3, имеющими положительный потенциал. При включении генератора в резонаторе возникают свободные колебания, на сетках 3 появляется переменное напряжение, под действием которого электроны группируются по скорости. На отражателе 4 подается напряжение  $U_{отр}$ , отрицательное по отношению к катоду, поэтому электронный поток попадает в тормозящее поле отражателя и возвращается обратно к резонатору.

Напряжение на отражателе можно подобрать так, чтобы группы электронов возвращались к резонатору в тот момент, когда на сетке  $C_1$  отрицательный потенциал, а на сетке  $C_2$  – положительный. Движение электронов тормозится, и они отдают часть своей энергии резонатору. Это повторяется периодически, и в резонаторе возникают незатухающие колебания высокой частоты.

Частота колебаний зависит от размеров резонатора и напряжения на отражателе. При помощи коаксиального витка, введенного в резонатор, можно передать энергию колебаний в нагрузку. Такие генераторы широко используются в схемах радиолокационных станций. С учетом изложенного выше представляет интерес исследовать влияние зазора резонатора на энергетические соотношения в одноконтурном генераторе.

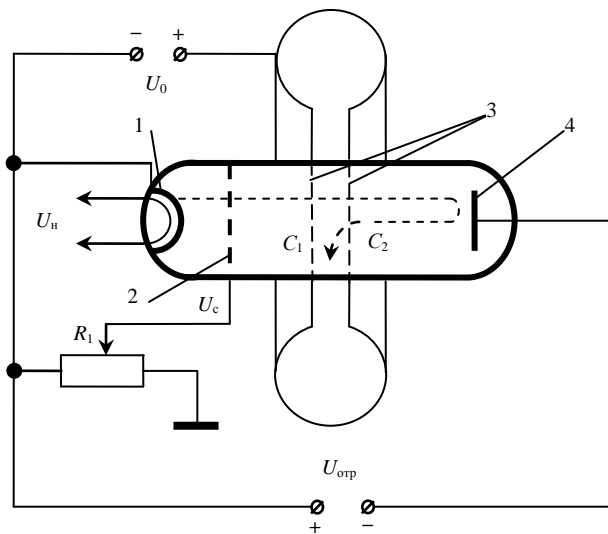


Рис. 1. Одноконтурный резонансный генератор: 1 – катод; 2 – управляющая сетка; 3 – ускоряющие сетки; 4 – отражатель;  $U_n$  – напряжение накала

В ряде работ [1, 2] для упрощения влияния угла пролета электронов на энергетику резонансного генератора действующее напряжение между обкладками резонатора усредняется по времени, т. е. учет конечного угла пролета электронов сводится к уменьшению амплитуды модулирующего переменного напряжения только через введение коэффициента взаимодействия электронного потока с переменным электромагнитным полем. В то же время при разложении в ряд для выходной скорости электронов из резонатора ограничиваются членами первой степени. Все это приводит к тому, что расчет мощности, затрачиваемой на модуляцию, оказывается незначительным. Поэтому потери на модуляцию электронного потока полагают малыми и учитывают их как поправку к тепловым потерям в резонаторе. Однако в действительности за время пролета электронов поле, действующее на поток электронов, изменяется и угол пролета  $\psi_0$  уже нельзя считать невозмущенным, т. е. истинный пролетный угол  $\psi$  выражается в виде степенного ряда

$$\psi = \psi_0 + \mu \frac{d\psi}{d\mu} + \frac{\mu^2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \mu^2} + \dots, \quad (1)$$

где  $\mu$  – параметр использования постоянного ускоряющего напряжения.

С учетом этого выражения определяется величина мощности, расходуемая на модуляцию электронного потока переменным электрическим полем для конечных углов пролета электронов на основе закона сохранения энергии для электронов, пронизывающих резонатор, с учетом всех членов разложения энергии в ряд, вплоть до квадратичных.

При прохождении первичного электронного потока между сетками резонатора со скоростью  $v_0 = \sqrt{\frac{2e}{m}} U_0$ , где  $e$  и  $m$  – абсолютная величина заря-

да и массы электрона, зависящей от постоянного напряжения на резонаторе  $U_0$ , на него воздействует переменное электромагнитное поле. В этом случае уравнение движения электрона между сетками резонатора имеет следующий вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eU}{m} \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $x$  – расстояние между отражателем и резонатором;  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – время пролета электрона.

Интегрируя (2) и подставляя значения скорости и координаты в начальный момент времени  $t'$ , получим выражение для скорости  $v_d$  на границе второй сетки

$$v_d = v_0 [1 - \mu (\cos \omega t - \cos \omega t')] \quad (3)$$

Если потенциал на отражателе электрода ниже потенциала резонатора на катоде, то электроны возвратятся обратно через зазор между двумя сетками резонатора на катод с начальными скоростями, определяемыми формулой (3). Решение (2) при этих дополнительных условиях для скорости  $v_2$  электрона, прошедшего резонатор вторично, будет иметь следующий вид:

$$v_2 = v_d \{1 + \mu_1 [\cos(\psi' + \varphi_2) - \cos \psi']\}, \quad (4)$$

где  $\psi'$  – возмущенный угол пролета электрона в области отражателя;

$$\omega(t - t') = \varphi; \quad \omega t' = \psi; \quad \mu_1 = \mu \frac{v_0}{v_d}.$$

Так как энергия, отдаваемая электроном резонатору, равна разности кинетических энергий на входе и выходе резонатора

$$W = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}, \quad (5)$$

энергия, выделяемая током силой  $I_0$  за единицу времени в резонаторе [3], равна

$$W_k = \frac{e m}{2T} \int_0^T (v_0^2 - v_2^2) dt' = \frac{I_0 U_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(1 - \frac{v_2^2}{V_0^2}\right) d\psi, \quad (6)$$

где  $T$  – время пролета электрона в прямом и обратном направлениях в резонаторе.

Используя уравнения (3), (4) и вводя для упрощения расчетов ряд обозначений, разложение подынтегральной функции первого слагаемого выражения (6) в ряд при ограничении членами первого порядка малости относительно параметра  $\mu$  дает выражение, интегрирование которого приводит к получению величины полной колебательной мощности одноконтурного резонансного генератора малой мощности в виде:

$$W_k = 4\mu I_0 U_0 \sin \frac{\Psi_0}{2} \int_0^T \left( 2\mu \theta_0 \sin \frac{\Psi_0}{2} - 2I_0 U_0 \mu^2 \right) \times \\ \times [2(1 - \cos \Psi_0) - \Psi_0 \sin \Psi_0] - 4\mu^2 I_0 U_0 \Psi (1 - \cos \Psi_0), \quad (7)$$

где  $\theta_0$  – имеет физический смысл угла пролета электрона от центра резонатора к отражателю и обратно;  $I_0$  – ток резонатора.

Из выражения (7) видно, что при конечном угле пролета электронов через зазор резонатора колебательная мощность в генераторе снижается на удвоенную величину модуляционных потерь при прямом пролете электронов и плюс некоторый дополнительный член, пропорциональный углу пролета. Очевидно, что с увеличением угла пролета электронов через зазор резонатора мощность модуляционных потерь может достигать значительных величин. Анализируя соотношение (7) и сравнивая его с аналогичными выражениями для полной колебательной мощности [1, 2], где не учитываются члены разложения в ряд, вплоть до квадратичных, мы видим, что выражение (7) становится эквивалентным для полной колебательной мощности нагруженного резонансного генератора с эквивалентной проводимостью

$$g_e = g_0 \mu^2 \left( \Psi_0 + 1 - \frac{\Psi_0}{2} \operatorname{ctg} \frac{\Psi_0}{2} \right), \quad (8)$$

т. е. учет мощности, идущей на модуляцию электронного потока переменным полем, приводит к значительному увеличению собственной активной проводимости резонатора. Даже в простейшем случае, например при ускоряющем напряжении  $U_0 = 300$  В, проводимость  $g_e$  может почти в два раза превышать внутреннюю проводимость  $g_0 = \frac{I_0}{U_0}$  и в рабочих условиях достигать значений  $(1-4) \cdot 10^{-4}$  См.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что при обратном пролете электронов через ВЧ-зазор резонатора потери на модуляцию электронного потока больше, чем при прямом пролете.

2. Установлено, что с увеличением угла пролета электронов эффективность группирования электронного потока ослабляется.

3. Модуляционные потери могут определять величину и ход кривых, характеризующих основные параметры генератора резонансного типа в зависимости от углов пролета в зазоре резонатора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз, В. К. Некоторые вопросы оптимизации параметров генераторов с отражательными полями / В. К. Мороз, А. А. Полищук, Г. А. Михальцевич // Труды БГТУ. Сер. Физ.-мат. наук и информатики. – Минск, 2004. – Вып. XII. – С. 98–100.
2. Голант, М. Б. Минитроны / М. Б. Голант, Ю. Л. Бобровский. – М.: Радио и связь, 1983. – 95 с.
3. Полищук, А. А. Влияние модуляционных потерь на диапазон и крутизну электронной настройки в генераторах резонансного типа / А. А. Полищук, Г. А. Михальцевич // Труды БГТУ. Сер. Физ.-мат. наук и информатики. – Минск: БГТУ, 2002. – Вып. X. – С. 138–141.

Представлена кафедрой АППиЭ БГТУ

Поступила 17.10.2005