

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПИТАНИЯ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОЩНОСТЬЮ

И. С. Сидоренко, В. Г. Григоренко

Х а р ь к о в

Решение вопроса о высокочастотном питании составляет одну из основных задач при создании линейных ускорителей заряженных тяжелых частиц. Она заключается в возбуждении

высокочастотных ускоряющих полей в резонаторах ускорителя и поддержании их амплитуд и фаз с относительно высокой степенью точности. Резонаторы ускорителей возбуждаются высокочастотными генераторами, работающими в импульсном режиме на фиксированной частоте. Общая высокочастотная мощность в импульсе, потребляемая одним ускорителем, достигает нескольких мегаватт.

Условия работы генераторов ускорителей отличаются от условий работы их в телеграфных радиопередатчиках в основном характером нагрузки. Радиопередатчики работают на антенну, обладающую сравнительно слабыми резонансными свойствами, а генератор ускорителя — на резонатор, добротность которого может находиться в пределах от единиц до сотен тысяч и более. При этом условия на поддержание амплитуды и фазы колебаний в резонаторе ускорителя сравнительно жесткие.

Ускорители, состоящие из одного резонатора, обычно питаются автогенераторами, а многорезонаторные — от генераторов с независимым возбуждением. При питании резонатора от автогенератора возникают специфические трудности, которые заключаются в том, что малое частотное разделение основного и соседнего типов колебаний в резонаторе, имеющем большую электрическую длину, затрудняет использование автогенераторов ввиду опасности возбуждения соседнего типа колебаний. Кроме того, при работе автогенератора на высокодобротную нагрузку через короткую линию передачи возникают паразитные колебания. При этом энергия автогенератора сосредоточивается в его колебательных контурах и передающей линии, а не в резонаторе ускорителя.

Известно несколько способов возбуждения устойчивых колебаний в резонаторе ускорителя на частоте, близкой к его собственной. Одним из них является способ предвозбуждения резонатора на собственной частоте и включение «гасящего» сопротивления в линию передачи в целях подавления паразитных колебаний [1, 2, 3]. При включении «гасящего» сопротивления в линию передачи на нем падает 10—50% проходящей мощности, что, естественно, снижает к. п. д. системы питания. При этом «гасящее» сопротивление делает систему одночастотной только в некоторой узкой области частот у основного вида колебаний [4].

Однако параметры системы ВЧ питания можно выбрать так, что на основном виде колебаний будут удовлетворяться условия самовозбуждения, а на паразитном — нет. В случае питания однорезонаторного ускорителя может быть использован автогенератор, самовозбуждающийся через резонатор ускорителя, который входит в цепь самовозбуждения как элемент с большой крутизной фазовой характеристики. При сфазированной цепи обратной связи резонатор работает на резонансе и нагрузка генератора активна. Такая система ВЧ питания использовалась в [5], где было показано, что паразитные колебания не возбуждаются, но

к. п. д. системы оставался все же низким из-за невысокого коэффициента усиления автогенератора по мощности.

Целью настоящей работы является определение возможности создания автогенератора, частота и стабильность колебаний которого определялась бы нагрузкой при малом отборе мощности из нее.

Этим условиям может удовлетворить многокаскадный автогенератор, состоящий из трех—четырёх каскадов усилителей устойчивого усиления и избирательного колебательного контура нагрузки, включенного в цепь обратной связи каскадов генератора. Для такой системы должно выполняться одновременно условие фаз и амплитуд

$$\begin{aligned} K_{св} S_{ср} [Z_э] &= 1; \\ \Sigma \varphi_n &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_{св}$ — коэффициент связи, при котором возможно возбуждение;

$S_{ср}$ — средняя крутизна;

$Z_э$ — эквивалентное сопротивление системы;

φ_n — сумма всех фазовых углов системы.

Сумма фазовых углов может иметь следующие значения:

$$\Sigma \varphi_n = 2\pi n,$$

где n — целое число.

При минимальном коэффициенте передачи Π через резонатор амплитудное условие выполняется лишь вблизи его собственной частоты f_0 . Таким образом, условие фаз приближенно можно записать

$$\frac{2\pi l}{\lambda} + \varphi_p(f) = 2\pi n, \quad (2)$$

где λ — длина волны;

f — частота генерируемого сигнала;

φ_p — фазовый угол на частоте резонанса.

Первый член равенства (2) учитывает сдвиг фаз на всем пути l по цепям, связывающим резонатор с усилителем, а также в самом усилителе; второй член — сдвиг фаз сигнала при прохождении через резонатор. Если $\Pi < -35$ дБ и

$$|f_0 - f| < 0,1\Delta f, \quad (3)$$

где Δf — ширина полосы пропускания резонатора, то с точностью до нескольких процентов

$$\varphi_p(f) = 2 \left(\frac{f_0 - f}{\Delta f} \right). \quad (4)$$

Дифференцируя уравнение (2) с учетом (4), для относительного изменения частоты генератора получаем

$$\frac{df}{f} = \frac{\pi}{Q} \frac{dl}{\lambda} + \left(1 + \frac{\pi}{Q} \cdot \frac{l}{\lambda} \right) \frac{df_0}{f_0} - \frac{1}{Q} \left(\frac{f_0 - f}{\Delta f} \right) \frac{d\Delta f}{\Delta f}, \quad (5)$$

где Q — добротность резонатора.

Первый член уравнения (5) описывает стабилизирующее действие резонатора на частоту автогенератора, второй определяет изменение частоты сигнала вследствие изменения собственной частоты резонатора f_0 , третий — вследствие изменения ширины его полосы пропускания Δf . Величина $\frac{dl}{\lambda}$ определяет изменение фазовой длины пути в генераторе, проходящее из-за нестабильности механических размеров и электрических параметров генератора. С увеличением добротности нагрузки действие этих факторов уменьшается.

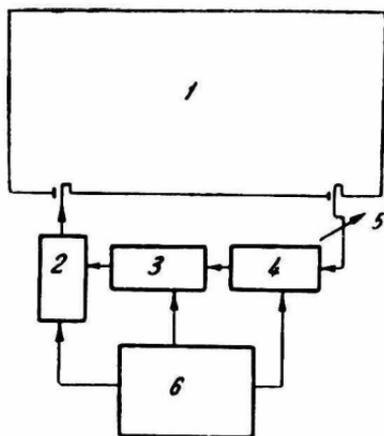


Рис. 1.

В лабораторных условиях был изготовлен макет для проверки и снятия экспериментальных зависимостей описанной системы высокочастотного питания объемных резонаторов. В качестве резонатора нагрузки использовался спиральный коаксиальный резонатор, нагруженный добротностью $Q_0 = 20\,000$. Усилитель состоял из трех каскадов усиления. Оконечный каскад усилителя выполнен на лампе ГУ-50 с выходной мощностью 30 *вт*. Предоконечный каскад — на лампе 6П1П в режиме без сеточных токов, входной каскад усилителя — на лампе 6Ж1П с входной

мощностью $P_{вх} = 3,1 \cdot 10^{-3}$ *вт*. Подробный расчет усилителя здесь не приводится, так как он мало отличается от обычного расчета радиопередатчиков. Блок-схема макета системы показана на рис. 1. Здесь имеется блок трехкаскадного усилителя, резонатор-нагрузка, волномер высокой точности типа ВВ1-Д, индикатор уровня поля и устройство плавного погружения инородных тел в резонатор в целях изменения его параметров.

В резонаторе исследовалось распределение электрических полей вдоль оси резонатора и в пространстве между образующей и спиралью. По измеренным полям определены значения добротности и шунтового (резонансного) сопротивления, которые рассчитаны по формуле

$$R_{ш} = Q_0 \frac{\left[\int_0^l E_z dz \right]^2}{\omega_0 W}, \quad (6)$$

где l — длина резонатора, и составили $6,8 \cdot 10^6$ *ом/м*.

После определения основных параметров резонатора исследовалась зависимость частоты, связанной, как показано на рис. 1, с изменением параметров резонатора. График зависимости изменения резонансной частоты системы с изменением параметров ре-

зонатора приводится на рис. 2. Для изменения параметров использовался латунный стержень диаметром 6 мм, который вводился в полость резонатора по оси. С введением стержня частота колебаний понижалась до собственной резонансной частоты в пределах полосы пропускания колебательных контуров каскадов усилителя. Полоса пропускания усилителя составляет величину 156,73 кГц. Без перестройки цепи обратной связи собственная частота колебаний резонатора изменялась при введении в него латунного стержня на величину 10,8 кГц. Указанные частотные

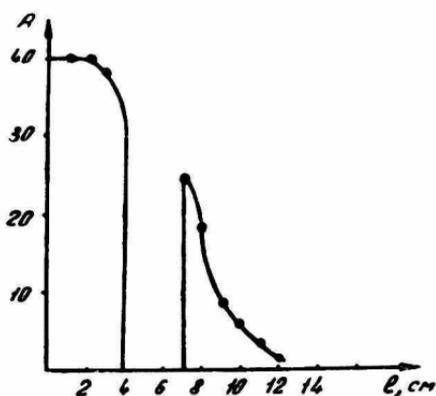


Рис. 2.

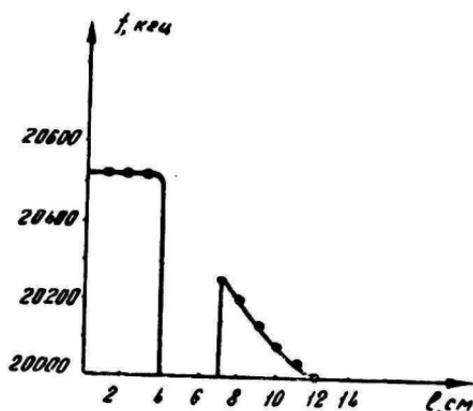


Рис. 3.

изменения наблюдались перед срывом колебаний, который происходит в системе с погружением стержня в зазор между верхней стенкой и спиралью резонатора на глубину 3,85 см.

Колебания в системе отсутствуют до тех пор, пока латунный стержень находится в указанном зазоре. При дальнейшем перемещении стержня во внутреннюю полость спирали колебания в системе вновь возникают на более низкой частоте и с меньшей интенсивностью. По мере дальнейшего перемещения стержня их интенсивность плавно уменьшается до нуля вместе с понижением частоты. Данные измерений частоты и интенсивности колебаний в системе с перемещением латунного стержня в полости резонатора сведены в таблицу. Зависимость интенсивности колебаний в системе с изменением глубины погружения стержня в резонатор показана на графике (рис. 3).

Таким образом, зная возможные изменения собственной резонансной частоты резонатора нагрузки от внешних факторов, можно подобрать полосу пропускания каскадов усилителей и обеспечить тем самым непрерывность колебаний системы по всей полосе возможных частотных изменений резонатора-нагрузки, т. е. получить своеобразное радиотехническое устройство, которое можно назвать Q -каскадным автогенератором.

Описанная система ВЧ питания может быть успешно использована для питания ВЧ мощностью линейных ускорителей заряженных частиц и других резонансных систем, обладающих высокими значениями добротности. Система устойчиво работает в непрерывном и импульсном режимах. Эффективность ее по сравнению с другими системами выше на 15—20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Слетер. «Успехи физических наук», 37, 3, 1949.
2. Л. Альварец и др. «Проблемы современной физики», № 4, 99, 1956.
3. Л. И. Болотин и др. ЖИФ, т. XXXI, 12, 1961.
4. А. П. Федотов, Б. К. Шембель «Радиотехника и электроника», 1, № 12, 1956.
5. O. A. Fridriksson. Grid driver power amplifier for Mark I accelerator Livermore research Laboratory LRL—100, 1954.