Вестник
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 1 — 1965

О. А. КУРДЮМОВ

МЕТОД ОЦЕНКИ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Описывается метод оценки величин коэффициентов связи в системе трех объемных резонаторов. Приводится подробная схема расчета. Показано, что погрешность измерения коэффициентов связи не превышает $\pm 70\%$. Расчеты подтверждены экспериментальными данными.

В последние годы в физике и технике все чаще приходится решать задачи, приводящие к образованию систем связанных объемных резонаторов. Такой задачей, например, является стабилизация частоты генераторов СВЧ методом затягивания или методом захватывания.

До сих пор центр тяжести в теоретических и экспериментальных исследованиях таких систем приходился на двухконтурные. Измерение величин коэффициентов связи в этом случае не составляет проблемы, так как они могут быть рассчитаны по частотным кривым системы [1]. При наличии трех или более связанных контуров этот метод уже не может быть применен ввиду невозможности разделения влияния на частотные кривые всех коэффициентов связи. Теоретический расчет коэффициентов связи в многоконтурных системах с распределенными постоянными представляется весьма сложным, так как требует учета многократных отражений энергии от всех неоднородностей.

В настоящей статье описывается метод оценки величин коэффициентов связи в трехконтурной системе, применяемой для стабилизации частоты клистрона затягиванием. Приводятся результаты расчета ошибок измерений и некоторые экспериментальные результаты.

Схема и обозначения

Представляем эквивалентную схему электронного промежутка клистрона в оптимальном режиме в виде генератора переменного напряжения E с внутренним сопротивлением z_0. Эквивалентный генератор связан с контуром с параметрами L_1, C_1, R_1 через сопротивления связи — реактивное X_0 и активное r_0. Нагрузку считаем чисто активной и равной волновому сопротивлению линии z_0. Активное сопротивление выходной связи обозначаем r_3, а активные сопротивления внутренних связей (соответствующие реактивным сопротивлениям X_1 и X_2) включаем в активные сопротивления контуров.

Введем обозначения для общепринятых диссипативных коэффициентов связи

$$\beta_i = \frac{X_i^2}{R_i R_{i+1}}, \tag{1}$$

где $i=0, 1, 2, 3$, $R_0=R_4=z_0$ и кбв, соответствующих активным сопротивлениям связей

$$\alpha_i = \frac{r_i}{z_0}. \tag{2}$$

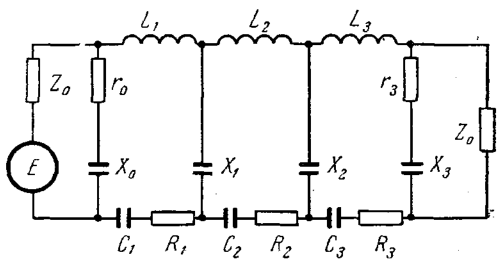

Рис. 1

Обобщенные коэффициенты связи h_i, связанные с коэффициентами β_i следующими формулами, физически реализуются

$$h_0 = \cfrac{\beta_0}{1+\cfrac{\beta_1}{1+\cfrac{\beta_2}{1+\cfrac{\beta_3}{1+\alpha_3}}}}, \qquad h_2 = \frac{\beta_2}{\left(1+\cfrac{\beta_3}{1+\alpha_3}\right)\left(\cfrac{\beta_1}{1+\cfrac{\beta_0}{1+\alpha_0}}\right)},$$

$$h_1 = \frac{\beta_1}{\left(1+\cfrac{\beta_0}{1+\alpha_0}\right)\left(1+\cfrac{\beta_2}{1+\cfrac{\beta_3}{1+\alpha_3}}\right)}, \qquad h_3 = \cfrac{\beta_3}{1+\cfrac{\beta_2}{1+\cfrac{\beta_1}{1+\cfrac{\beta_0}{1+\alpha_0}}}}. \tag{3}$$

Метод расчета

Формулы (3) позволяют, измерив любые четыре коэффициента связи из восьми (β_0, β_1, β_2, β_3, h_0, h_1, h_2, h_3), а также α_0 и α_3, найти все остальные. Наиболее удобно экспериментально находить коэффициенты β_0, β_3, h_3 и коэффициент передачи системы $\frac{1}{L_0}$

$$L_0 = \frac{\beta'_{1\text{г}}}{\left(1+\cfrac{\beta'_{1\text{г}}}{1+\alpha_1}\right)(1+\alpha_1^2)} \cdot \frac{1+\alpha_3+h_3}{h_1 h_2 h_3 (1+h_0)}, \tag{4}$$

где $\beta'_{1\text{г}}$ — коэффициент связи одиночного «горячего» клистрона с нагрузкой z_0. Коэффициенты β_0 и α_0 могут быть найдены из условия согласования одиночного клистрона с нагрузкой

$$\frac{\beta_0}{1+\alpha_0} = 1 + \frac{\beta'_{1\text{г}}}{1+\alpha_1}. \tag{5}$$

Коэффициенты h_3 и α_3 могут быть измерены только для «холодной» системы, поэтому для определения h_3 «горячего» требуется знание отношения активных горячего и холодного сопротивлений контура клистрона $\frac{R_{1г}}{R_{1x}}$, которое может быть найдено через отношение соответствующих собственных добротностей.

Измерение коэффициентов β_3 и L_0 может быть произведено только при специальных предположениях о малости величин коэффициентов h_1 и h_2. Так, при достаточно малом коэффициенте связи h_2 третий контур (L_3, C_3, R_3) можно отключить от системы и измерить его коэффициенты связи, в том числе коэффициент β_3. Ошибка в его определении тем меньше, чем меньше h_2. При h_2, меньших на порядок, чем h_3, этой ошибкой можно пренебречь. При достаточно малом коэффициенте связи h_1 нагрузку, пересчитанную к электронному промежутку клистрона, можно считать одинаковой при подключении к клистрону волновой нагрузки или системы синхронных контуров. Это позволяет измерить коэффициент передачи системы, описываемый простой формулой (4). При произвольных величинах коэффициента связи формула (4) значительно усложняется, так как приходится учитывать колебательную характеристику клистрона и аппроксимировать ее аналитической функцией. Это сильно усложнит весь расчет и приведет к существенной ошибке.

Типичная схема, применяемая для стабилизации частоты клистрона затягиванием, имеет коэффициенты h_1 и h_2 достаточно малые, поэтому описанный метод может быть с успехом применен для оценки величин коэффициентов связи в подобных системах.

Схема расчета

Экспериментально измеряются величины $\beta'_{1г}$, α, $\frac{R_{1г}}{R_{1x}}$, L_0, h_{3x}, α_3, β_3. Порядок вычисления коэффициентов связи должен соответствовать порядку приводимых ниже формул

$$h_{3г} = \frac{\beta_3}{1 + \left(\frac{\beta_3}{h_{3x}} - 1\right) \frac{R_{1г}}{R_{1x}} \cdot \frac{2(1+\alpha_1) + \beta'_{1г}}{1 + \alpha + \frac{R_{1г}}{R_{1x}}(1 + \alpha_1 + \beta'_{1г})}}, \tag{6}$$

$$h_2 = \frac{\beta_3 - h_{3г}}{h_{3г}\left(1 + \frac{\beta_3}{1+\alpha_3}\right)}, \tag{7}$$

$$h_1 = 0{,}5 - \frac{1 + \alpha_3 + h_{3г}}{2h_2 h_{3г} L_0} \cdot \frac{\beta'_{1г}}{\left(1 + \frac{\beta'_{1г}}{1+\alpha_1}\right)(1+\alpha_1)^2} \pm$$
$$\pm \sqrt{\left[\frac{1 + \alpha_3 + h_{3г}}{2h_2 h_{3г} L_0} \cdot \frac{\beta'_{1г}}{\left(1 + \frac{\beta'_{1г}}{1+\alpha_1}\right)(1+\alpha_1)^2} - 0{,}5\right]^2 +}$$
$$\overline{+ \frac{1 + \alpha_3 + h_{3г}}{h_2 h_{3г} L_0} \cdot \frac{\beta_{1г}}{(1 + \alpha_1 + \beta'_{1г})(2 + 2\alpha_1 + \beta'_{1г})}}. \tag{8}$$

Знак в формуле (8) выбирается из условия $h_1 > 0$

$$h_0 = \frac{1 + \frac{\beta'_{1г}}{1+\alpha_1}}{1 + h_1\left(2 + \frac{\beta'_{1г}}{1+\alpha_1}\right)}, \qquad (9)$$

$$\beta_1 = \frac{h_1(1+h_2)(1+h_2)}{(1-h_1h_2)(1-h_0h_1)}. \qquad (10)$$

После нахождения значения β_1 из (10) производят уточнение значения $h_{3г}$ из (11), после чего находят также уточнения h_2, h_1, h_0, β_1 из (7)—(10) и β_2 из (12)

$$h_{3г} = \frac{\beta_3}{1 + \left(\frac{\beta_3}{h_{3x}} - 1\right)\frac{1 + \frac{R_{1г}}{R_{1x}}\left(1 + \beta_1 + \frac{\beta_{1г}}{1+\alpha_1}\right)2(1+\alpha_1+\beta'_{1г})}{2 + \beta + \frac{\beta'_{1г}}{1+\alpha_3}1 + \alpha_1 + \frac{R_{1г}}{R_{1x}}(1+\alpha_2+\beta'_{1г})}}, \qquad (11)$$

$$\beta_2 = \frac{h_2(1+h_1)(1+\alpha_3+h_{3г})}{(1-h_1h_2)(1+\alpha_3-h_2h_3)}. \qquad (12)$$

Оценка ошибок рассчитываемых величин и экспериментальные данные

При измерении малых значений кбв методом аттенюатора необходимо учитывать неоднородность, вносимую зондом в виде поправки к измеренным значениям кбв [2]. При учете этой поправки, при точности измерительной линии не ниже $\pm 5\%$, точности измерительного аттенюатора не ниже $+0{,}3$ *дб* от 0 до 15 *дб* и $\pm 0{,}5$ *дб* от 15 до 30 *дб*. Можно считать, что относительные погрешности рассчитываемых коэффициентов связи не будут превышать значений, приведенных в таблице

Коэффициенты	$h_{3г}$	h_2	h_1	h_0	β_1	β_2	β_3
Предельная погрешность, %	± 15	± 25	± 10	± 10	± 50	± 70	± 15

Если по рассчитанным таким образом коэффициентам связи вычислить коэффициент стабилизации частоты, то его величина не должна отличаться от измеренной более чем в два раза.

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась для трехконтурной системы, содержащей следующие элементы: клистрон К-54, прямоугольный резонатор на волне типа H_{015} с собственной добротностью 1000 и цилиндрический резонатор на волне типа H_{011} с собственной добротностью 20 000. Все реактивные сопротивления связей носили емкостной характер и были осуществлены в виде круглых и прямоугольных диафрагм.

Полученные значения коэффициента стабилизации частоты при оптимальном режиме клистрона отличались от рассчитанных не более чем в два раза. Учитывая сложность задачи, определения коэффициентов связи в многоконтурных системах с распределенными постоянными погрешности измерений описанного метода можно считать допустимыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ирисов Е. А. Диссертация. МГУ, 1958.
2. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Физматгиз, М., 1963.

Поступила в редакцию
13. 2 1964 г.

Кафедра
физики колебаний