

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

01

Журнал технической физики, т. 66, в. 5, 1996

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПАРЕ СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАТОРОВ

© В.И.Иванников, Ю.Д.Черноусов, И.В.Шеболаев

Институт химической кинетики и горения СО РАН,

630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 22 марта 1994 г.

В окончательной редакции 12 октября 1994 г.)

В настоящее время аналитическое описание переходных процессов известно лишь для одиночного резонатора [1-3]. Численно решена задача о накоплении энергии в резонаторе, связанном с подводющей линией через другой, дополнительный резонатор [4], и исследованы условия достижения высокой эффективности накопления [5].

В данной работе аналитически рассмотрены переходные процессы в системе, состоящей из двух равночастотных связанных резонаторов, при условии, что частота внешнего генератора равна их собственной резонансной частоте ω_0 .

Исходя из метода падающих и отраженных волн [6] каждый резонатор можно представить в виде отрезка линии (волновода), в котором распространяются две встречные волны. При этом первый резонатор связан с подводющим волноводом и вторым резонатором через реактивные диафрагмы с коэффициентами прохождения волны T_1, T_2 . Предполагая, что запасенные в резонаторах энергии W_1, W_2 зависят от времени, можно записать для их производных следующие выражения:

$$\begin{aligned} \frac{dW_1}{dt} &= \frac{|a|^2}{2} - \frac{|b|^2}{2} - P_1 - \frac{|a_1|^2}{2} + \frac{|b_1|^2}{2}, \\ \frac{dW_2}{dt} &= -P_2 + \frac{|a_1|^2}{2} - \frac{|b_1|^2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где a — внешняя волна, падающая на входную диафрагму первого резонатора; b — волна, отраженная от первого резонатора в подводющий волновод; a_1 — волна в первом резонаторе, падающая на диафрагму, разделяющую резонаторы; b_1 — волна в первом резонаторе, отраженная от второго; $P_1 = \omega_0 W_1 / Q_1$, $P_2 = \omega_0 W_2 / Q_2$ — внутренние потери в резонаторах, определяемые их собственными добротностями Q_1, Q_2 .

Волны b , b_1 складываются из волн, отраженных от диафрагм и излученных из резонаторов,

$$b = \Gamma_1 a + b_{r1}, \quad b_1 = \Gamma_2 a_1 + b_{r2}. \quad (2)$$

где $\Gamma_1 = -(1 - |T_1|^2)^{1/2}$, $\Gamma_2 = -(1 - |T_2|^2)^{1/2}$ — коэффициенты отражений от диафрагм; b_{r1} — волна, излученная из первого резонатора в подводящую линию; b_{r2} — волна, излученная из второго резонатора в первый.

Амплитуды волн a_1 , b_{r1} , b_{r2} выражаются через запасенные энергии

$$|a_1| = \frac{1}{|T_2|} \sqrt{\frac{2\omega_0 W_1}{Q_{E12}}}, \quad |b_{r1}| = \sqrt{\frac{2\omega_0 W_1}{Q_{E11}}}, \quad |b_{r2}| = \sqrt{\frac{2\omega_0 W_2}{Q_{E22}}},$$

где Q_{E11} — внешняя добротность первого резонатора, связанная с излучением энергии в подводящий волновод; Q_{E12} , Q_{E22} — аналогично определенные внешние добротности первого и второго резонаторов, отнесенные к разделяющей их диафрагме.

Если резонаторы имеют высокие собственные добротности ($Q_1, Q_2 \gg 1$), а связь между ними и подводящим волноводом ограничена условиями $Q_{E11} \gg 1$, $Q_{E12}, Q_{E22} \gg Q_1$, $Q_{E12}, Q_{E22} \gg Q_2$, то последующей заменой W_1, W_2 на новые переменные — нормированные амплитуды колебаний $V_1 = (2W_1)^{1/2}$ и $V_2 = (2W_2)^{1/2}$ система уравнений (1) приводится к виду

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} &= -\frac{\omega_0(1+k_1)}{2Q_1} V_1 - \frac{\omega_0 k_c}{2} V_2 + \sqrt{\frac{\omega_0 k_1}{Q_1}} a, \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{\omega_0 k_c}{2} V_1 - \frac{\omega_0}{2Q_2} V_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_1 = Q_1/Q_{E11}$ — коэффициент связи первого резонатора с подводящей линией, $k_c = 2(|T_2|^2 Q_{E12} Q_{E22})^{-1/2}$ — коэффициент связи между резонаторами.

Последнее выражение соответствует определению $k_c = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_0$ через резонансные частоты системы ω_1, ω_2 , при условии $\omega_0/Q_1, \omega_0/Q_2 \ll (\omega_2 - \omega_1)$.

Решение системы уравнений (3) зависит от корней характеристического уравнения, определяемых выражением

$$R_{1,2} = -\frac{\omega_0}{4} \left(\frac{1+k_1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \pm \frac{\omega_0}{4} \sqrt{\left(\frac{1+k_1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right)^2 - 4k_c^2}. \quad (4)$$

В случае действительных корней решение имеет вид

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_{01} + C_{11} e^{R_1 t} + C_{12} e^{R_2 t}, \\ V_2(t) &= V_{02} + C_{21} e^{R_1 t} + C_{22} e^{R_2 t}, \end{aligned} \quad (5)$$

при комплексных

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_{01} + D_{11}e^{At} \sin \Omega t + D_{12}e^{At} \cos \Omega t, \\ V_2(t) &= V_{02} + D_{21}e^{At} \sin \Omega t + D_{22}e^{At} \cos \Omega t, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= -\frac{\omega_0}{4} \left(\frac{1+k_1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right), & \Omega &= \frac{\omega_0}{4} \sqrt{4k_c^2 - \left(\frac{1+k_1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right)^2}, \\ V_{01} &= \frac{2\sqrt{k_1 Q_1 / \omega_0}}{1+k_1+k_c^2 Q_1 Q_2} a, & V_{02} &= \frac{2k_c Q_2 \sqrt{k_1 Q_1 / \omega_0}}{1+k_1+k_c^2 Q_1 Q_2} a. \end{aligned}$$

Постоянные $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ определяются из начальных условий. При этом отношение амплитуд установившихся колебаний не зависит от коэффициента связи первого резонатора с подводющей линией ($V_{02}/V_{01} = k_c Q_2$).

Если выполнено условие согласования по входу в установившемся режиме $k_1 = 1 + k_c^2 Q_1 Q_2$, то амплитуды установившихся колебаний принимают значения

$$V_{01} = \sqrt{Q_1 / (\omega_0 k_1)} a, \quad V_{02} = k_c Q_2 \sqrt{Q_1 / (\omega_0 k_1)} a. \quad (7)$$

В частном случае, если внешний генератор включается в момент времени $t = 0$, при этом $V_1(0) = V_2(0) = 0$, то

$$\begin{aligned} C_{11} &= V_{01} \frac{R_2(2Q_2 R_1 + \omega_0)}{\omega_0(R_1 - R_2)}, & C_{12} &= -V_{01} \frac{R_1(2Q_2 R_2 + \omega_0)}{\omega_0(R_1 - R_2)}, \\ C_{21} &= V_{02} R_2 / (R_1 - R_2), & C_{22} &= -V_{02} R_1 / (R_1 - R_2), \\ D_{11} &= V_{01}(2Q_2 A^2 + 2Q_2 \Omega^2 + \omega_0 A) / (\omega_0 \Omega), & D_{12} &= -V_{01}, \\ D_{21} &= V_{02} A / \Omega, & D_{22} &= -V_{02}. \end{aligned}$$

Для волны, излученной из первого резонатора в подводющий волновод, во всех случаях справедливо выражение

$$b_{r1}(t) = \sqrt{\omega_0 k_1 / Q_1} V_1(t). \quad (8)$$

Таким образом, при действительных корнях характеристического уравнения переходные процессы в системе затухают монотонно, а при комплексных имеют вид затухающих колебаний. Причиной колебаний является периодическая перекачка энергии между резонаторами, возникающая при сдвиге фаз СВЧ колебаний в них, близком к $\pi/2$. Именно такой сдвиг фаз соответствует выбранной частоте внешнего генератора ω_0 . При этом период колебаний может быть много меньше постоянной времени их затухания ($2\pi/\Omega \ll -1/A$), что позволяет осуществить быстрый ввод и вывод энергии из резонатора. Это имеет большое значение в ряде приложений, например технике ЭПР спектроскопии.

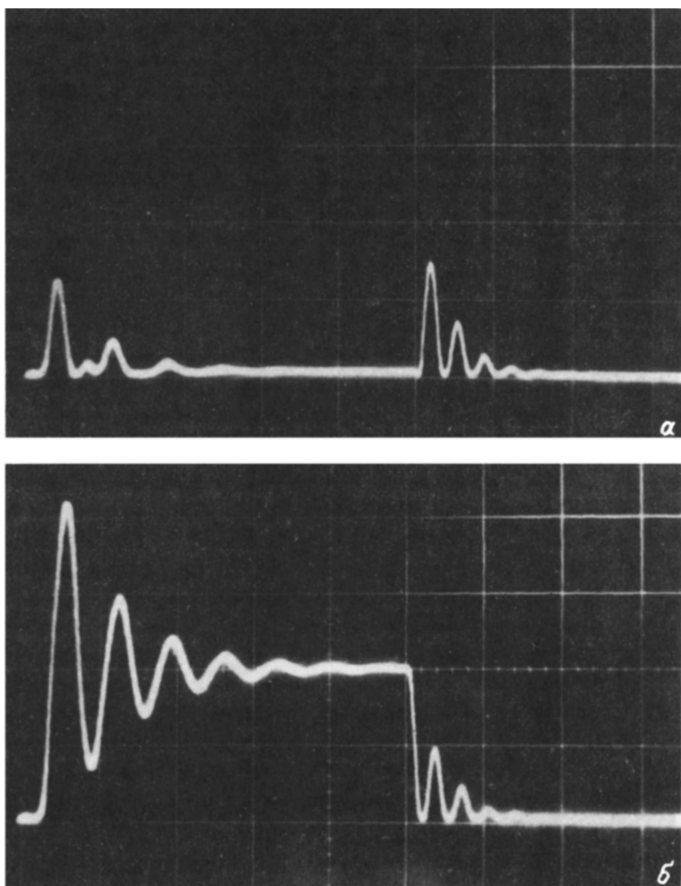


Рис. 1. Осциллограммы сигналов в первом (а) и во втором (б) резонаторах.

Система уравнений (3) справедлива не только при ступенчатом включении или выключении генератора, но также, когда внешняя волна произвольным образом зависит от времени. Практическое значение имеет случай, когда $a(t) = a_0 \sin(\Omega_1 t)$, где $\Omega_1 = \omega_0(k_c^2 Q_2^2 - 1)^{1/2} / (2Q_2)$. Если при этом выполнено условие $(1 - k_1)/Q_1 + 1/Q_2 = 0$, то система (3) имеет решение

$$V_1(t) = V_0 \sin(\Omega_1 t), \quad V_2(t) = -V_0 \cos(\Omega_1 t + \delta), \quad (9)$$

где $\delta = \arctg(k_c^2 Q_2^2 - 1)^{-1/2}$, $V_0 = a_0[\omega_0(1/Q_1 + 1/Q_2)]^{-1/2}$.

Такой режим характерен отсутствием отражения ($b = 0$) при зависящей от времени внешней падающей волне и реализован в системе высокочастотного питания LEP [7].

Для проверки основных результатов проведено экспериментальное моделирование переходных процессов в двух наиболее характерных случаях. На рис. 1 приведены осциллограммы сигналов в первом (а) и во втором (б) резонаторах при $k_1 = 1.0$, $k_c = 0.5 \cdot 10^{-4}$. Переходные процессы имеют при этом монотонно затухающий характер, свойственный системе со слабой связью между резонаторами. На рис. 2 приведены

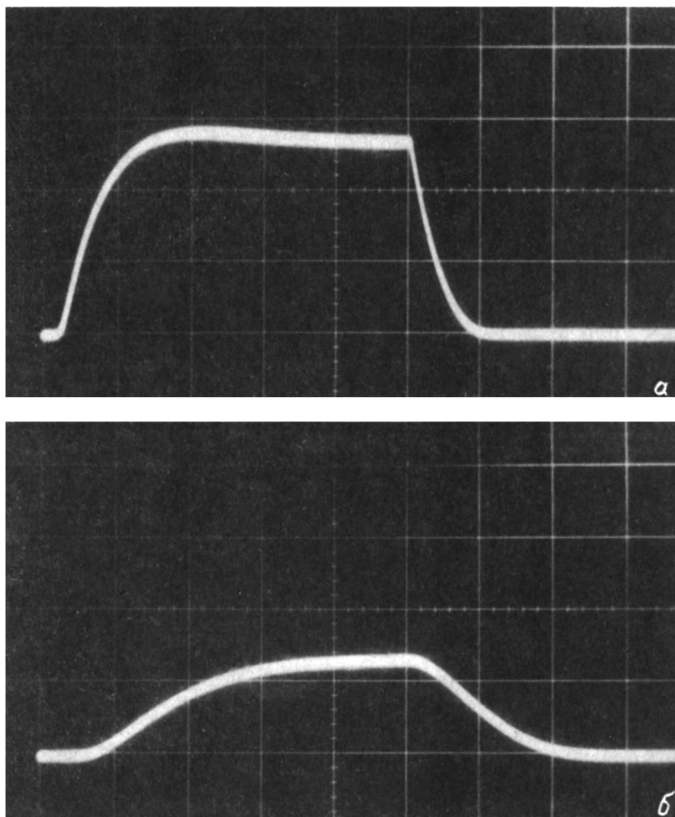


Рис. 2. Осциллограммы сигналов в первом (а) и во втором (б) резонаторах.

аналогичные осциллограммы при $k_1 = 1.0$ и $k_c = 1.0 \cdot 10^{-3}$, когда переходные процессы приобретают вид затухающих колебаний. Период колебаний на переднем фронте СВЧ импульса во втором резонаторе совпадает с расчетным значением $\tau_k = 2\pi/\Omega = 0.7$ мкс. Вдвое меньший период колебаний в первом резонаторе, а также на заднем фронте СВЧ импульса во втором обусловлен тем, что здесь амплитуда колебаний дважды за период проходит через нуль, меняя знак на противоположный. Поскольку уровень СВЧ сигнала измеряется детекторной головкой, регистрирующей абсолютную величину амплитуды, на ее выходе наблюдаются колебания с удвоенной частотой. Нерегулярность колебаний на переднем фронте в первом резонаторе объясняется наличием небольшого постоянного уровня, равного установившемуся значению амплитуды, относительно которого происходят колебания. Этот уровень либо добавляется, либо вычитается из амплитуды колебаний (через полупериод), а характеристика детекторной головки, близкая к квадратичной, усиливает эффект.

Измерения проводились на частоте 2860 МГц. Резонаторы имели равную собственную добротность, измеренное значение которой составило 10 000. На вход первого резонатора по подводящему волноводу подавались СВЧ импульсы длительностью 5 мкс с периодом следования 10 мкс. Коэффициент связи k_c измерялся в первом случае по отношению амплитуд установившихся колебаний в резонаторах, а во втором по разности резонансных частот системы.

Таким образом, исходя из метода падающих и отраженных волн получено аналитическое решение для переходных процессов в паре высокодобротных связанных резонаторов, работающих на собственной резонансной частоте. Частные случаи этого решения соответствуют известным результатам и подтверждаются проведенными экспериментами.

Система уравнений (3) легко обобщается на случай произвольного числа последовательно связанных резонаторов, что существенно расширяет ее возможности и область применения.

Список литературы

- [1] Slater J.C. Microwave Electronics. New York: Van Nostrand, 1951. 406 p.
- [2] Альварес Р.А. // ПНИ. 1986. № 10. С. 66-73.
- [3] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ВАНТ. Сер. ЯФИ (ТиЭ). 1989. № 6 (6). С. 55-58.
- [4] Бараев С.В., Коровин О.П., Минькин К.Г. // ЖТФ. 1983. Вып. 2 (53). С. 413-415.
- [5] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 4. С. 723-725.
- [6] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.
- [7] Geschonke G., Hansen S. // Particle Accelerators. 1990. Vol. 29. P. 77-84.

01;09;12

Журнал технической физики, т. 66, в. 5, 1996

ЭФФЕКТ ГАШЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

© Р.М.Касимов, М.А.Калафи, Э.Р.Касимов, Ч.О.Каджар, Э.Ю.Салаев

Научно-исследовательский институт фотоэлектроники АН Азербайджана,
370602 Баку, Азербайджан
(Поступило в Редакцию 16 января 1995 г.)

Проблема создания неотражающих поглотителей электромагнитного излучения на основе доступных композиционных материалов и простой технологии их приготовления представляет большой практический интерес и привлекает внимание многих исследователей [1-3].

На основе анализа данных работы [3], а также предложенного в работе [4] метода измерения диэлектрических свойств полярных жидкостей и растворов в диапазоне СВЧ можно показать, что в слое полярного вещества при определенных частотах падающего излучения должен наблюдаться эффект полного гашения отраженного от проводящей поверхности электромагнитного излучения. Такое гашение веществом покрытия отраженного от идеально проводящей поверхности излучения будет иметь место в точках минимумов зависимости модуля коэффициента отражения волны R от толщины l слоя вещества, когда