

П.В.Кутровский, Е.Н.Талицкий, С.В. Шумарин

К расчету собственных частот колебаний ячеек радиотехнических устройств

Исследовано влияние электрорадиоэлементов (ЭРЭ) на собственную частоту колебаний ячеек радиотехнических устройств. Показано, что в случае жесткого крепления ЭРЭ существующие расчетные формулы не пригодны. Предлагается уточненная формула, полученная на основе вычислительного эксперимента и метода Брандона.

Investigated the influence of electroradioelements (ERE) on natural frequency of fluctuations of cells in radio engineering devices. It is shown, that in case of rigid fastening ERE existing settlement formulas are not suitable. Offered the specified formula received on the basis of computing experiment and method of Brandon.

Для проверки отсутствия резонансных колебаний ячеек радиотехнических устройств (РТУ) необходимо определять собственную частоту колебаний (СЧК) конструкции. Для “классических” способов крепления, к которым относятся свободный край, свободное опирание и жесткое защемление, расчет ведется по формуле Рэля-Ритца, в которую для учета влияния ЭРЭ введен коэффициент $K_{ЭРЭ}$ [1]:

$$f = \frac{\alpha_i}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} K_{ЭРЭ}; \quad (1)$$

$$\text{где} \quad K_{ЭРЭ} = 1 / \sqrt{1 + m_{ЭРЭ} / m_{пл}}, \quad (2)$$

В этих выражениях a , h , D , ρ – длина, толщина, цилиндрическая жесткость платы и плотность материала соответственно; α_i – коэффициент, зависящий от способа крепления платы, соотношения сторон и номера СЧК; $m_{ЭРЭ}$, $m_{пл}$ – масса ЭРЭ и платы соответственно.

Как видно из формулы (2) $K_{ЭРЭ} \leq 1$, т.е. ЭРЭ всегда уменьшают СЧК платы.

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что данная зависимость справедлива лишь для ЭРЭ, крепящихся на выводах. Однако, для повышения вибропрочности часто применяют жесткое крепление корпуса ЭРЭ к плате путем приклеивания и т.д. В этом случае СЧК возрастает из-за увеличения жесткости конструкции. На рис.1 видно расхождение

между результатами расчета по формуле (1) и результатами эксперимента, которое может превышать 100%.

Для уточнения формул (1, 2) было исследовано влияние различных факторов, обусловленных жестким креплением ЭРЭ на плате (рис.2), модель крепления которой соответствует свободному опиранию по контуру, на СЧК. Такой способ крепления соответствует, примерно, креплению ячеек в блоке по направляющим. Для этого был проведен вычислительный эксперимент в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ)[2] с использованием системы конечно-элементного анализа (СКЭА). Матрица ПФЭ составила $5^3 3^2 4^1$, где шесть факторов, влияющих на СЧК ячейки с ЭРЭ, варьировались на различном числе уровней в зависимости от степени влияния. Всего было проведено 4500 вычислений.

Факторами влияние которых определялось, были: отношение площади, занимаемой жестко прикрепленными к плате ЭРЭ, к площади ячейки ($S_э/S_п = 0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75.$), в дальнейшем называемое коэффициентом заполнения ячейки; отношение сторон ячейки ($a/b = 1; 1,2; 1,5; 2; 2,5.$); площадь ячейки ($S_п = 0,007; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05\text{м}^2.$); отношение сторон ЭРЭ к числу ЭРЭ вдоль соответствующей стороны ячейки ($a_э n_b / b_э n_a = 0,25; 1; 4.$); высота ЭРЭ ($h_э = 0,001; 0,003; 0,005\text{м.}$); количество ЭРЭ ($n_э = 0; 36; 64; 100\text{шт.}$).

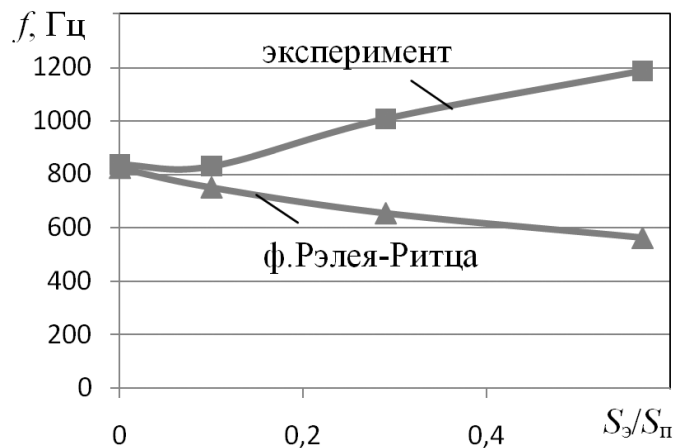


Рис.1. Зависимость СЧК от относительного заполнения ячейки жестко закрепленными ЭРЭ; $S_э$ – площадь занимаемая ЭРЭ; $S_п$ – площадь платы

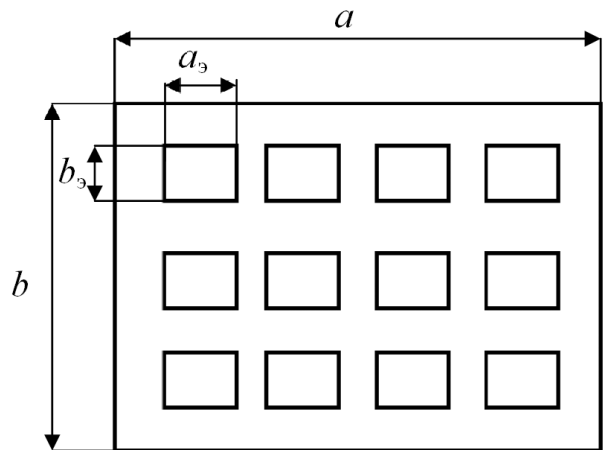


Рис.2. Схема ячейки с ЭРЭ

Обработка статистических данных производилась с использованием метода Брандона, который позволяет представить зависимость функции от нескольких факторов в виде произведения функций от этих факторов:

$$K = K_1\left(\frac{S_3}{S_{\Pi}}\right)K_2\left(\frac{a}{b}\right)K_3(S_{\Pi})K_4\left(\frac{a_3n_b}{b_3n_a}\right)K_5(h_3)K_6(n_3),$$

На рис.3. представлены усредненные промежуточные зависимости коэффициентов K_i ($i=1, 2..6$) от каждого фактора. Например, K_1 (рис.3а) при $S_3/S_{\Pi} = 0$ является средним по всем сочетаниям факторов, в которых $S_3/S_{\Pi} = 0$.

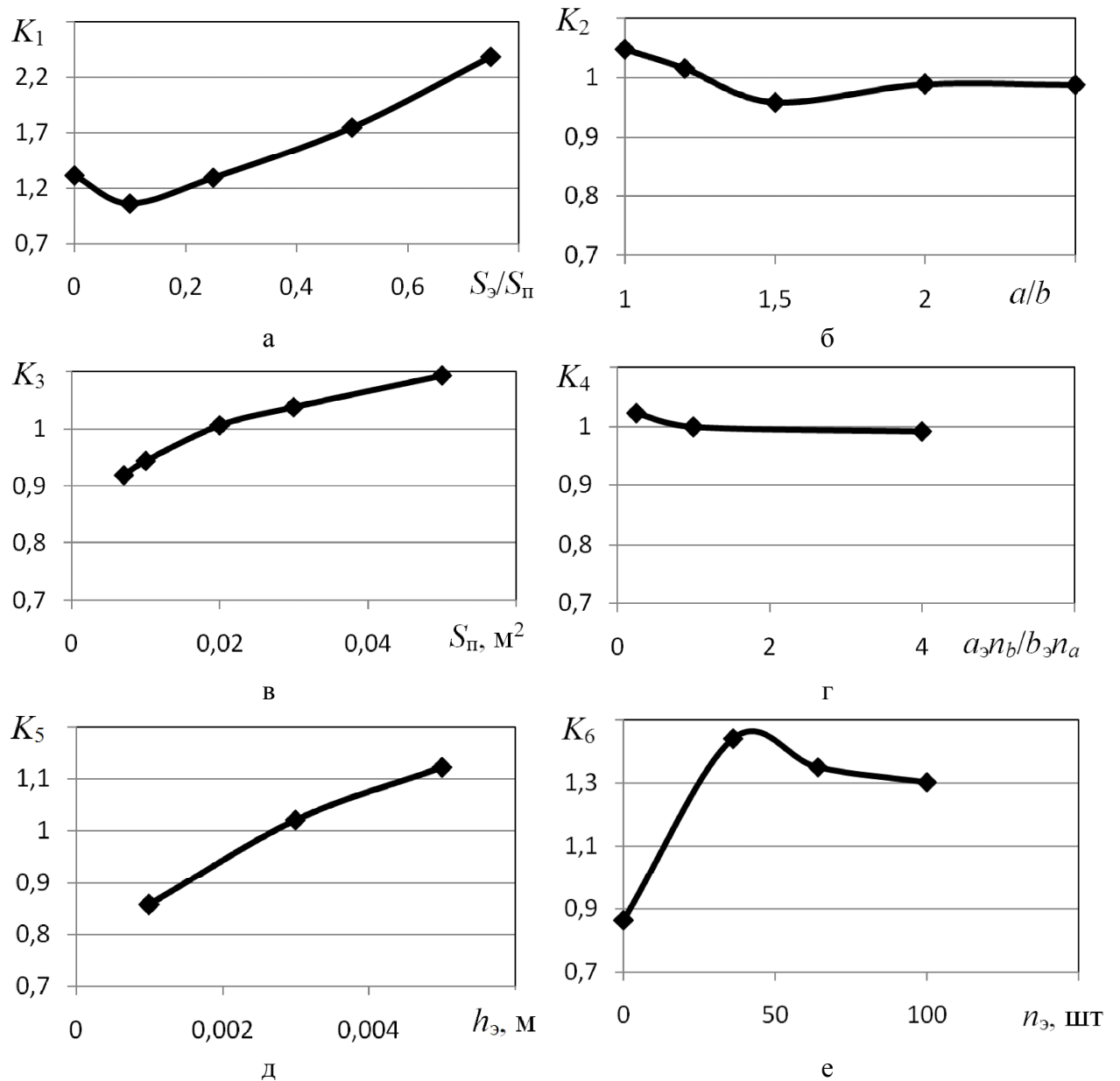


Рис.3. Зависимости коэффициентов K_i от параметров платы и ЭРЭ

Из рис.3а видно, что при заполнении платы примерно на 10% СЧК конструкции уменьшается. Это происходит, по-видимому, вследствие того, что вносимая ЭРЭ, дополнительная масса влияет больше, чем повышение жесткости. При дальнейшем увеличении заполнения ячейки ЭРЭ СЧК возрастает за счет большего влияния жесткости ЭРЭ. Так как точно определить влияние жесткости каждого ЭРЭ не представлялось возможным, то условно жесткость ЭРЭ принималась равной жесткости модели с габаритами ЭРЭ, но выполненной из дюралюминия. Варьирование жесткости ЭРЭ осуществлялось путем увеличения их высоты.

Из рис.3б видно, что значение усредненного коэффициента K_2 для плат различных площадей, количества и высот ЭРЭ имеет сложную зависимость. Это связано с неоднозначным влиянием заполнения ячейки ЭРЭ и их параметров. Наибольшее значение коэффициента K_2 наблюдается у квадратной платы.

Из рис.3в видно, что большее увеличение СЧК при установке ЭРЭ с жестким креплением значительно для ячеек большей площади.

Коэффициент K_4 , определяющий зависимость СЧК от отношения сторон ЭРЭ к отношению сторон платы, как видно из рис.3г, изменяется незначительно, не превышает 4% и поэтому им можно пренебречь.

Зависимость СЧК от высоты ЭРЭ, то есть фактически от жесткости, является линейной и с ростом h , возрастает (рис.3д).

Увеличение количества жестко закрепленных ЭРЭ значительно повышает СЧК (рис.3е).

Таким образом, жесткое крепление ЭРЭ в среднем может увеличить СЧК ячейки на 50%. Однако увеличение с 36 до 64 ЭРЭ, при прочих равных факторах, несколько уменьшает СЧК. Это, по-видимому, происходит за счет того, что при постоянном заполнении ячейки ($S_э/S_п$), количество свободных пространств между ЭРЭ с ростом их числа - увеличивается, что уменьшает жесткость.

Коэффициент, учитывающий влияние жестко закрепленных ЭРЭ на СЧК свободно опертых плат после обработки экспериментальных данных по методу Брандона, с включенным в него коэффициентом $K_{ЭРЭ}$, имеет вид:

$$K = K_1 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right) K_2 \left(\frac{a}{b} \right) K_3(S_{II}) K_4(h_3) K_5(n_3) K_{ЭРЭ}, \quad (3)$$

где
$$K_1 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right) = 1,31 - 5,4 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right) + 35,34 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right)^2 - 66,78 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right)^3 + 42,38 \left(\frac{S_3}{S_{II}} \right)^4$$

$$K_2 \left(\frac{a}{b} \right) = -1,13 + 6,43 \left(\frac{a}{b} \right) - 6,7 \left(\frac{a}{b} \right)^2 + 2,9 \left(\frac{a}{b} \right)^3 - 0,44 \left(\frac{a}{b} \right)^4$$

$$K_3(S_{II}) = 1,351 + 0,087 \ln(S_{II})$$

$$K_4(h_3) = 0,801 + 66,42h_3$$

$$K_5(n_3) = 0,7 + 0,027n_3 - 0,0005n_3^2 + 2,6 \cdot 10^{-6}n_3^3$$

Таким образом в формуле (1) вместо коэффициента $K_{ЭРЭ}$ (2) в случае свободного опирания прямоугольной платы по контуру необходимо применять коэффициент K (3).

Для проверки полученных результатов был проведен эксперимент с использованием вибростенда ВЭДС-200. Исследовалась плата с габаритными размерами 137x60x1,4мм, способ крепления, которой соответствовал свободному опиранию по контуру. Для эксперимента было изготовлено специальное приспособление, имитирующее такое крепление. Сравнение результатов расчета и эксперимента приведено на рис.4.

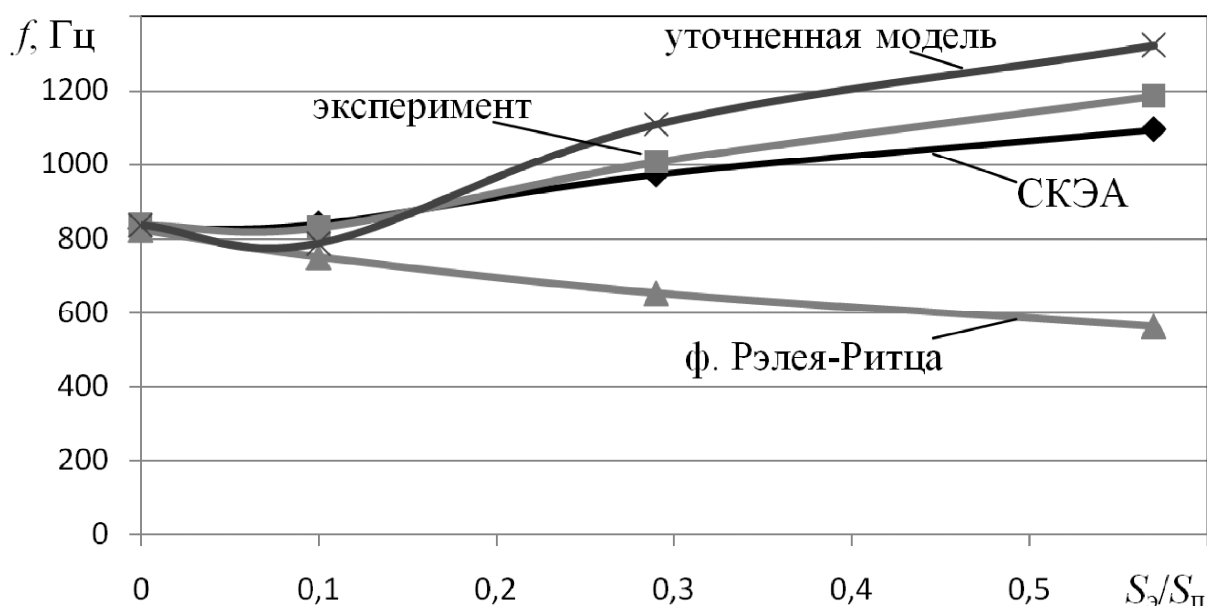


Рис.4. Зависимость СЧК от заполнения ячейки жестко закрепленными ЭРЭ

Таким образом полученная математическая модель позволяет рассчитать СЧК ячеек РТУ с жестко закрепленными ЭРЭ способ крепления которых соответствует свободному опиранию с погрешностью не более 15% в диапазоне площадей плат от 70 до 500 см², отношением сторон от 1 до 2,5 и высотой ЭРЭ до 4мм.

Сравнение расчетов СЧК на современных персональных компьютерах с применением формул (1, 3) и СКЭА «Ansys» показало, что скорость расчета с использованием полученных формул сокращает машинное время не менее чем на два порядка, что особенно существенно при решении оптимизационных задач.

Результаты работы показывают, что целесообразно разработать формулы для расчета СЧК ячеек с жестко закрепленными на плате корпусами ЭРЭ для различных способов крепления, характерных для РТУ.

Литература

1. Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры. М.: Сов.радио, 1977.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.