УДК 621.3.011.4

ВАКУУМНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ

© 2012 А. А. Рыжов, Н. К. Юрков, А. А. Ромашин

Пензенский государственный университет

Предложен способ уменьшения температурной нестабильности в вакуумных конденсаторах с использованием биметаллов. Представлены расчеты изменения емкости конденсатора с биметаллической пластинкой при нагреве.

Вакуумный конденсатор, биметалл, емкость, температурный коэффициент емкости.

Введение

Вакуумные конденсаторы нашли широкое применение в высоковольтной высокочастотной радиоэлектронной аппаратуре. Использование вакуума в качестве диэлектрика позволяет создать конденсаторы, которые в определенной области рабочих частот при небольших весах и габаритах обладают лучшей совокупностью электрических и эксплуатационных характеристик по сравнению с газонаполненными, слюдяными и керамическими.

Вакуумные конденсаторы имеют высокую температурную стабильность. Температурный коэффициент емкости их (ТКЕ) составляет (40-80)$\cdot 10^{-6}\ \frac{1}{°C}$ у постоянных конденсаторов и (80-120)$\cdot 10^{-6}\ \frac{1}{°C}$ у конденсаторов переменной емкости.

Для эксплуатации новой радиоэлетронной аппаратуры требуются вакуумные конденсаторы с ТКЕ в 4-5 раз меньше.

Для воздушных конденсаторов переменной емкости с плоскими электродами для снижения ТКЕ было предложено использовать биметаллическую пластинку в качестве движителя ротора. При повышении температуры биметаллическая пластина воздействует на ротор, положение пластин относительно друг друга изменяется, емкость блока уменьшается, компенсируя изменение его ёмкости за счет расширения пластин, вызванного повышением температуры [1].

Другое решение проблемы компенсации температурного изменения величины емкости переменных воздушных конденсаторов связано с использованием биметаллической пластинки в качестве емкостного электрода. Температурная компенсация емкости может быть выполнена, если эта пластинка будет при нагреве отклоняться от смежного электрода, уменьшая емкость блока.

На рис. 1 приведены обозначения рамеров плоского конденсатора. Верхняя пластинка выполнена из биметалла [2,3]. Длина пластины l ширина b, толщина h, площадь ее $S = bl$.

Расстояние между пластинами при нулевом нагреве равно y_0. На расстоянии x от места заделки при нагреве на Δt пластины отодвинутся друг от друга на величину $y_0 + y$. Емкость обеих пластин при нулевом нагреве составит [1]:

$$C_0 = \frac{kS}{y_0}. \tag{1}$$

Емкость элемента площадью $dS = bdx$ на расстоянии x будет равна:

$$dC = k\frac{bdx}{yo + y}. \tag{2}$$

Разность положений биметаллической пластинки в теплом и холодном состоянии на расстоянии x от места заделки составит:

$$y = (y_0 + y) - y_0 = \frac{kx^2Dt}{h}. \tag{3}$$

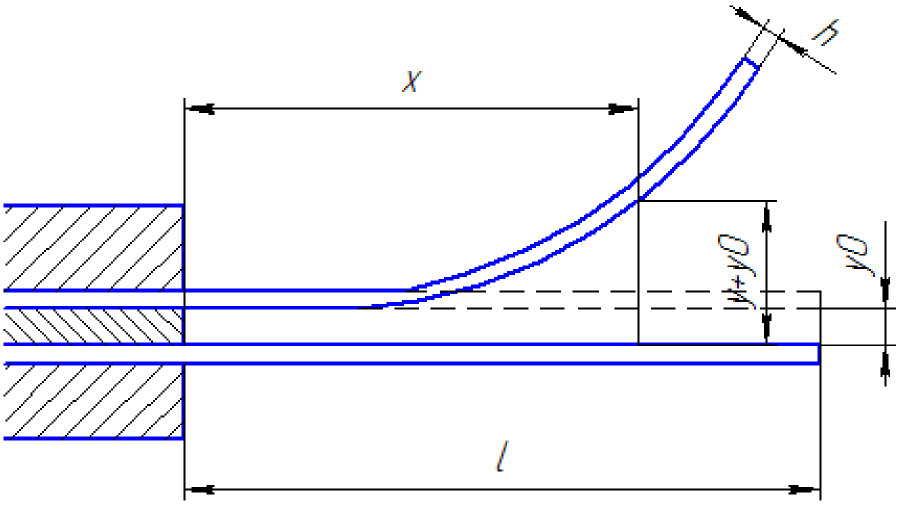

Рис. 1. Схема конденсатора с биметаллической пластинкой (для расчета)

Разделив обе части равенства на y_0, получим:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{kx^2\Delta t}{y_0 h} = a^2 x^2, \tag{4}$$

где $a^2 = \dfrac{k\Delta t}{hy_0}$.

Емкость всей площадки при нагреве может быть найдена из равенства:

$$C = \frac{kb}{y_0}\int_o^l \frac{dx}{1+a^2x^2} =$$

$$= \frac{kb}{ay_0} arctgal \approx \frac{kb}{ay_0}\left(al - \frac{a^3l^3}{3}\right). \tag{5}$$

Изменение емкости, вызванное нагревом, составит

$$DC = C - C_0 \approx -\frac{kba^2l^3}{3y_0} = \frac{k_1kbl^3Dt}{3hy_0^2}, [\Phi]. \tag{6}$$

Емкость при нагреве Δt будет [1]:

$$C = C_0 + \Delta C = C_0(1 - \frac{k_1l^2}{3hy_0}), \tag{7}$$

где k_1 – удельный прогиб биметаллической пластинки, $\frac{1}{°C}$, $k = e \cdot e_0$,

e – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;

e_0 – $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Формула (7) получена при использовании ряда допущений.

Можно предложить другой подход определения изменения емкости от температуры для системы биметаллическая пластинка – бесконечная однородная пластинка.

При проектировании конденсатора с «нулевым» (малым) ТКЕ с использованием биметаллической пластинки необходимо приравнять полученное выражение ΔC к изменению емкости конденсатора с плоскими электродами, то есть с параллельными пластинами из однородного металла.

Формула изменения емкости при нагреве за счет изгиба биметаллической пластины

$$\Delta C = \frac{k\varepsilon_0\varepsilon bl\Delta t}{3hy_0^2}, [\Phi] \tag{8}$$

где l – длина пластины, м; b – ширина пластинки, м; h – толщина пластины, м; y_0 – начальный зазор между электродами, м; Δt – нагрев, ^{0}С.

Биметаллическая прямая пластинка при нагреве деформируется так, что в результате образует часть окружности. Радиус окружности, являющейся нейтральной осью второго слоя пластинки, показанной на рис.1, может быть найден следующим образом. Предполагается, что до нагрева прямая пластина прямоугольного сечения одинакова по всей длине, во всех точках имеет температуру t_0.

При этой температуре в пластине нет внутренних напряжений. Из всей длины l

биметаллической пластинки рассмотрим только ее элементарную длину *dx*. Обозначим температурный коэффициент линейного расширения 1 и 2 компонентов соответственно через a_1 и $a_{2.}$. Если температура пластинки $t_{0,}$, то вследствие нагрева, равного $\Delta t = t - t_0$, она деформируется (рис. 1). Так как пластинка на всей длине имеет одно и то же сечение, одинаковые температуру и внутреннее напряжение, то ее изгиб будет равномерным и после деформации она будет представлять дугу окружности. Напряжение обоих слоев распределяется по сечению относительно нейтральной оси каждого слоя, как показано на рис. 2 (справа). Длины по нейтральным осям рассматриваемых частей пластинки после ее нагрева обозначим в соответствии с рис. 1:

$$dx_1 = (1 + a_1\Delta t)dx = (r_2 + h_n)dj \ , \tag{9}$$

$$dx_2 = (1 + a_2\Delta t)dx = r_2 dj \ . \tag{10}$$

Исключая из этих двух уравнений угол dj, получаем:

$$\frac{1 + a_1\Delta t}{r + h_n} = \frac{1 + a_2\Delta t}{r_2}. \tag{11}$$

После простого преобразования найдем радиус кривизны нейтральной оси второго слоя

$$r_2 = \frac{h_n(1 + a_2\Delta t)}{(a_1 - a_2)\Delta t}. \tag{12}$$

Так как a_2 обычно имеет величину порядка 10^{-6}, а максимальная величина нагрева Δt может достигать только несколько десятков градусов, то радиус кривизны приближенно выразится как:

$$r_2 \approx \frac{h_n}{(a_1 - a_2)\Delta t}; \tag{13}$$

$$\frac{1}{r_2} \approx \frac{(a_1 - a_2)\Delta t}{h_n} \tag{14}$$

при $r_2 > h, \ r_1 \approx r_2 = r$.

Как известно из теории упругости, линия изгиба продольных волокон пластинки (для малых изгибов) математически выражается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \pm\frac{1}{r} = \frac{M}{E_0 I_0}, \tag{15}$$

где M – изгибающий момент; E_0 – эффективный модуль упругости всего сечения пластинки; I_0 – момент инерции сечения пластинки.

Подставляя значение радиуса r из (14), получаем:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(a_1 - a_2)\Delta t}{h_n}. \tag{16}$$

Интегрируя это уравнение, можно найти:

$$y = \frac{(a_1 - a_2)Dt}{2h_n}x^2 + C_1 x + C_2. \tag{17}$$

На рис. 2 представлена биметаллическая пластинка длинной l прямоугольного сечения $S = bh$. До нагревания, т.е. при $\Delta t = 0$, пластинка прямая [4]. После нагрева на величину $\Delta t = t + t_0$ пластинка деформируется, образуя часть окружности. Постоянные интегрирования C_1 и C_2 в (17) определяются из условий, что при $x = 0$, $y = 0$.

Отсюда следует, что $C_1 = C_2 = 0$. Поэтому (17) можно написать в виде:

$$y = \frac{(a_1 - a_2)\Delta\partial}{2h_n}x^2. \tag{18}$$

Этим уравнением определятся координаты производной точки пластинки на расстоянии x от места закрепления. Для свободного конца пластинки это уравнение принимает следующий вид:

$$\Delta y = \frac{(a_1 - a_2)l_2\Delta t}{2h_n}, \tag{19}$$

где $l = x$, а вместо y перемещение свободного конца пластинки записано в виде Δy. Обозначая через k постоянную величину $k = \frac{a_1 - a_2}{2h_n} = \frac{(a_1 - a_2)h}{2h_n}$, представим Δy в более простом виде:

$$\Delta y = \frac{kl^2\Delta j}{h}. \tag{20}$$

Этим важным и очень часто встречающимся в литературе уравнением выражается прогиб прямой биметаллической пластинки, имеющей одинаковое по всей длине прямоугольное сечение $S=bh$, толщину $h=l$ и ширину b, при ее одинаковом нагреве Δt по всему сечению и по всей длине. Следует иметь в виду, что (17) дает удовлетворительную точность в том случае, если прогиб Δy значительно меньше длины пластинки l. Постоянная k называется удельным изгибом, т.е. изгибом свободного конца прямой пластинки, толщина и длина которой равны единице (например, $h=1$, мм $l=1$ мм или $h=1$ см, $l=1$см), при нагреве $\Delta t = 1^{0}C$. Для часто применяемых биметаллических материалов эта постоянная всегда указывается и является сравнительно малой величиной.

Постоянная k в практике чаще всего определяется экспериментальным путем. Для расчета иногда необходимо знать угол поворота сечения пластинки (рис. 3). Для практического применения можно использовать выражение:

$$a = \frac{2k\Delta j}{h} \tag{21}$$

и для конечной точки:

$$a_0 = \frac{2kx\Delta j}{h}. \tag{22}$$

Полученные формулы и способы использования биметаллических пластинок в качестве емкостных частей вакуумного кон-

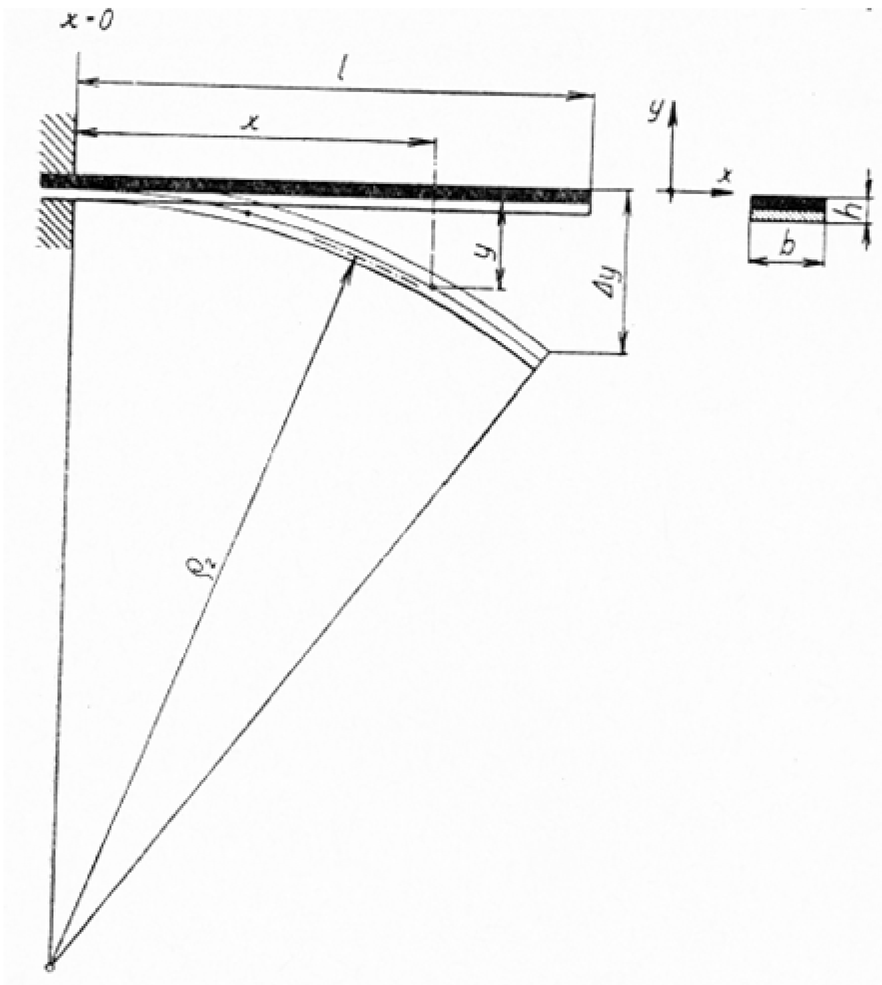

Рис. 2. Изгиб биметаллической прямой пластинки, вызванной ее нагревом

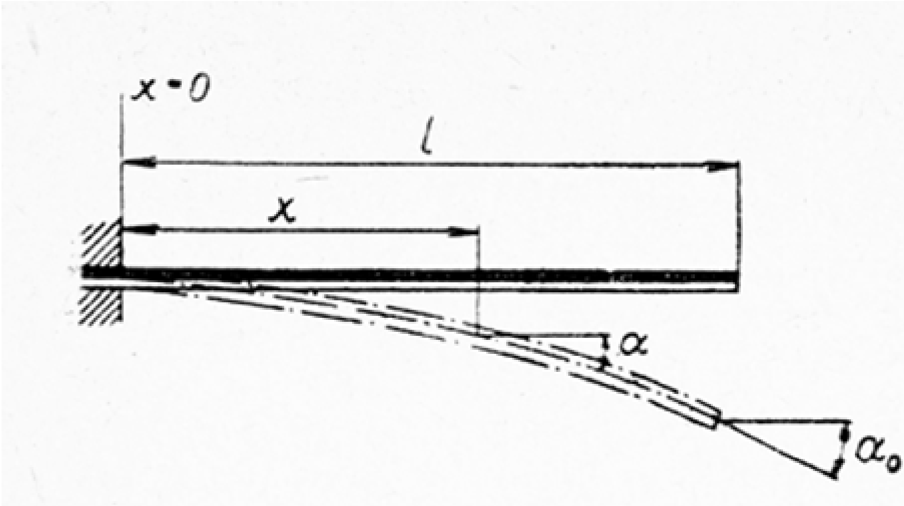

Рис. 3. Угол поворота сечения пластинки при ее изгибе

денсатора дают возможность создания конденсатора с минимальным ТКЕ.

Заключение

Предложенный способ уменьшения температурного коэффициента емкости с помощью биметаллических пластинок дает возможность уменьшить влияние нагрева на изменение емкости вакуумных конденсаторов. Применение биметаллических пластинок позволяет уменьшить в 4…5 раз ТКЕ вакуумных конденсаторов по сравнению с существующими.

Библиографический список

1. Кашпар, Ф. Термо-биметаллы в электротехнике: Пер. с чеш. / [Текст] Кашпар Ф. - М.-Л. : Б.и., 1961.- 447с.

2. Рыжов, А.А. Расчет напряженности электростатического поля на внутренней поверхности керамической оболочки вакуумного конденсатора [Текст] / А.А. Рыжов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2011». – Пенза: ПГУ, 2011.- Т. 2. - С. 201 – 202.

3. Clyne, T.W. «Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding» Key Engineering Materials (Switzerland). 1996.-Vol. 116-117, pp. 307-330.

4. Юрков, Н.К. Методика расчета коэффициента температурного изменения и коэффициента деления высоковольтного вакуумного делителя [Текст] / Н.К. Юрков, Э.Н. Смирнов, В.П. Буц // Известия Института инженерной физики. - 2010. - №3. - С.48 - 53.

VACUUM CAPACITORS WITH HIGH TEMPERATURE STABILITY

© 2012 A. A. Ryzhov, N. K. Jurkov, A. A. Romashin

Penza State University

The article deals with the approach of decreasing of temperature instability in vacuum capacitors using bimetals. The calculations of capacitor capacitance change with bimetallic strip during heating are given.

Vacuum capacitor, bimetal, capacitance, temperature coefficient of capacitance.

Информация об авторах

Рыжов Александр Алексеевич, аспирант, Пензенский государственный университет. E-mail: pgufr@mail.ru. Область научных интересов: конденсаторы для радиоэлектронной аппаратуры.

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет. E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Область научных интересов: надежность и качество радиоэлектронной аппаратуры.

Ромашин Александр Александрович, студент, Пензенский государственный университет. E-mail: rgu@penza.net. Область научных интересов: элементарная база радиоэлектронных средств.

Ryzhov Alexander Alekseevich, post-graduate student, Penza State University. E-mail: pgufr@mail.ru. Area of scientific: capacitors for electronic equipment.

Jurkov Nikolay Kondratjevich, doctor of technical sciences, professor, head of design and production radio-electronic equipment, Penza State University**.** E-mail: yurkov_nk@mail.ru. Area of scientific: reliability and quality of electronic equipment.

Romashin Alexander Alexandrovich, student, Penza State University. E-mail: rgu@penza.net. Area of scientific: elementary base electronic means.