

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВАКУУМНЫХ ЕМКОСТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ¹

Аннотация. Дается анализ методов обеспечения температурной стабильности высоковольтных делителей напряжения на основе вакуумных конденсаторов. Приведена методика расчета коэффициента температурного изменения и коэффициента деления вакуумных устройств.

Ключевые слова: температурная стабильность, вакуумные устройства, емкостные делители.

Abstract. Is given analysis of the methods of the provision to warm-up stability of the high-tension divisors of the voltage on base vacuum capacitor. The brought methods of the calculation of the factor of the warm-up change and factor of the fission vacuum device.

Keywords: warm-up stability, vacuum device, capacitive divisors.

Введение

Среди ограниченного количества публикаций по вакуумным емкостным делителям высоких напряжений отсутствуют работы по оценке температурной стабильности важнейшей их характеристики – коэффициента деления, в то время как в проблеме снижения метрологических погрешностей одним из основных путей является установление факторов, влияющих на стабильность работы вакуумных приборов.

Особую остроту эта проблема приобретает в связи с усложнением конструкции вакуумных делителей, вызванным необходимостью повышения рабочих напряжений до 100–120 кВ и более, а также необходимостью обеспечения коэффициента деления не менее 1000:1. В связи с этим прежде чем перейти к рассмотрению вопросов термостабильности делителей, целесообразно кратко остановиться на принципиальных особенностях вакуумных делителей на примере двухкаскадной конструкции.

Эффективным приемом, позволяющим преодолеть ограничения по амплитуде и полосе пропускания частот без увеличения выходной емкости, явилось использование двухкаскадного принципа построения делителя по схеме, показанной на рис. 1,а. Компоновка основных элементов такого делителя представлена на рис. 1,б.

Проходная емкость высоковольтного плеча первого каскада C_1 образована между высокопотенциальным 1 и низкопотенциальным 2 электродами, а выходная емкость этого каскада C_2 образована промежуточным цилиндром 3, однопотенциальным с электродом 2, и внутренней поверхностью цоколя 4 высоковольтного вакуумного блока делителя. Все рабочие элементы высоковольтного блока, включая электрод 5, экранирующий низкопотенциальные элементы делителя от воздействия мощных электромагнитных полей, заклю-

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Создание высококачественных вакуумных конденсаторов» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 гг.)». Гос. контракт № П 489 от 13 мая 2010 г.).

чены в вакуумно-плотную металлодиэлектрическую оболочку, состоящую из стеклянной 6 и керамической 7 частей. Низковольтный блок размещен в корпусе 8, однопотенциальным с цоколем 4. Второй каскад делителя состоит из емкости C_3 , образованной между внутренней поверхностью промежуточного цилиндра 3 и цилиндрическим наконечником 9 опорного цилиндра 10, и емкости C_4 , образованной системой чередующихся плоских электродов 11 и 12. Одна группа плоских электродов 11 закреплена на основании 13, однопотенциальном с заземляемым корпусом 8, другая группа 12 диэлектрически изолирована от электродов 11 и имеет возможность перемещаться с помощью специального механизма (не показанного на рис. 1) в аксиальном направлении делителя вместе с опорным цилиндром, на котором она закреплена, относительно электродов 11. Система электродов 12 имеет низковольтный вывод 14, подведенный к коаксиальному разъему 15. Высокое напряжение, подлежащее измерению, подается на высоковольтный вывод делителя 16.

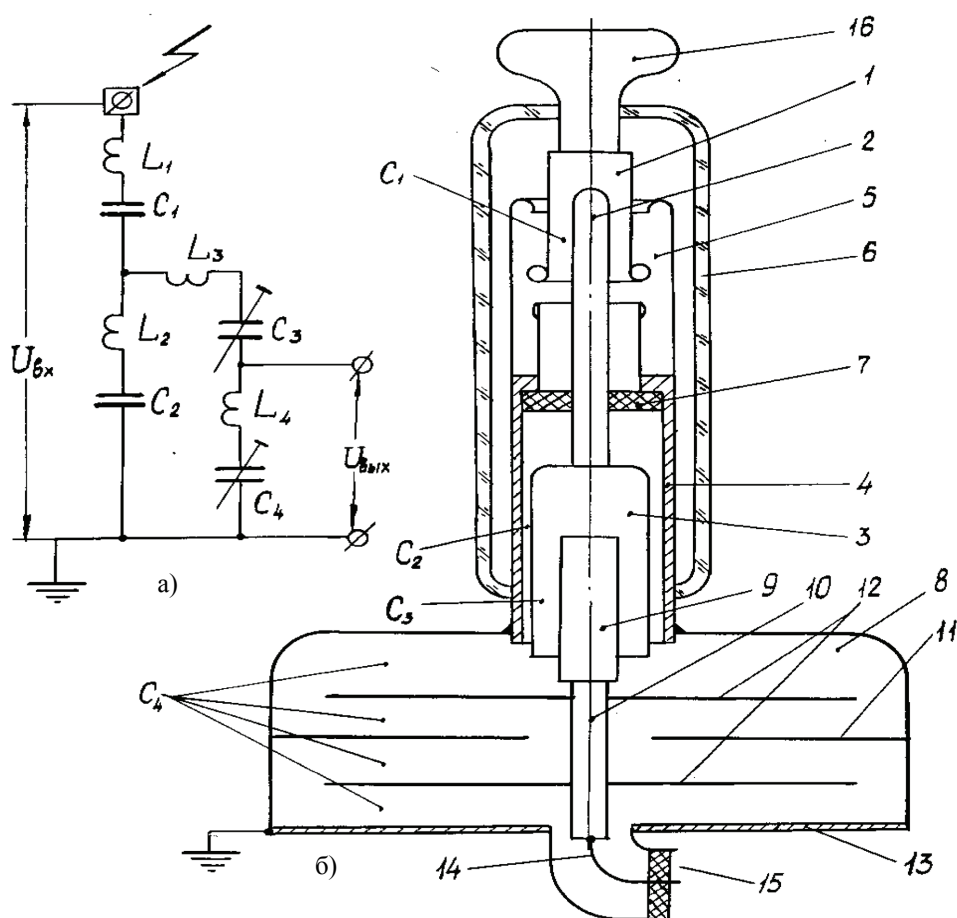


Рис. 1. Упрощенная схема (а) и компоновка основных элементов (б) двухкаскадного емкостного делителя импульсных напряжений

Внешний экранирующий электрод 5 служит для защиты низкопотенциального электрода 2 от влияния внешних электромагнитных полей. Для предохранения от перенапряжений в конструкции делителя предусмотрен защитный

электрод, торцевой частью обращенный напротив кромки высокопотенциального электрода 1.

Коэффициент деления емкостных делителей определяется соотношением емкостей высоковольтных и низковольтных плеч в первом и втором каскадах деления. В рассматриваемом случае номинальный коэффициент деления будет представляться как

$$K_o = K_1 \cdot K_2 = [1 + (C_2/C_1)] \cdot [1 + (C_4/C_3)], \quad (1)$$

здесь K_1 и K_2 – соответственно номинальные коэффициенты деления первого и второго каскадов; C_1 и C_3 – емкости высоковольтных плеч первого и второго каскадов; C_2 и C_4 – емкости низковольтных плеч первого и второго каскадов.

Температурная стабильность делителей в рабочем диапазоне температур характеризуется коэффициентом температурного изменения коэффициента деления (ТКК_д) и в дифференциальной форме выражается как

$$\alpha_K = \frac{1}{K_o} \cdot \frac{dK_o}{dT}.$$

Дифференцируя выражение (1) по температуре, получим

$$\frac{dK_o}{dT} = \left\{ \left(1 + \frac{C_4}{C_3} \right) \left[\frac{1}{C_1} \frac{\partial C_2}{\partial T} - \frac{C_2}{C_1^2} \frac{\partial C_1}{\partial T} \right] + \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \left[\frac{1}{C_3} \frac{\partial C_4}{\partial T} - \frac{C_4}{C_3^2} \frac{\partial C_3}{\partial T} \right] \right\}. \quad (2)$$

После преобразования выражения (2) с учетом того, что фрагменты типа $\frac{1}{C_i} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial T}$ являются температурными коэффициентами соответствующих емкостей α_{C_i} (ТКЕ), будем иметь коэффициент температурного изменения коэффициента деления в виде

$$\alpha_K = \frac{C_2}{C_1 + C_2} (\alpha_{C_2} - \alpha_{C_1}) + \frac{C_4}{C_3 + C_4} (\alpha_{C_4} - \alpha_{C_3}), \quad (3)$$

где α_{C_1} и α_{C_3} – соответственно температурные коэффициенты емкостей высоковольтных плеч первого и второго каскадов; α_{C_2} и α_{C_4} – соответственно температурные коэффициенты емкостей низковольтных плеч первого и второго каскадов.

1. Расчет ТКЕ высоковольтного плеча первого каскада

Как отмечено выше, емкость высоковольтного плеча первого каскада C_1 образована коаксиально расположенными высокопотенциальным 1 и низкопотенциальным 2 электродами (рис. 2).

При этом величина C_1 будет складываться из двух частей: из емкости C'_1 , образуемой противоположно располагаемыми концентрическими поверхностями цилиндрических электродов 1 и 2 на протяжении длины l_1 , и емкости

C_1'' , образуемой полусферическими поверхностями верхней части низкопотенциального электрода и колоколообразной верхней частью высокопотенциального электрода.

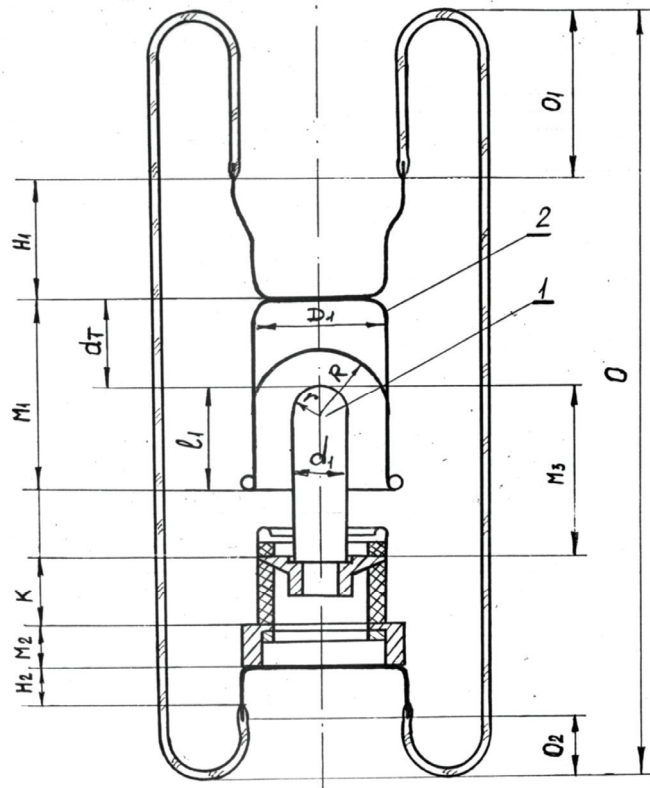


Рис. 2. К расчету ТКЕ высоковольтного плеча первого каскада

Для расчета этих емкостей с приемлемой точностью можно воспользоваться формулами, приведенными в работе [1]:

$$C_1' \cong \frac{2\pi \cdot \epsilon_o \cdot l_1}{\ln(R/r)}, \quad C_1'' \cong \frac{2\pi \cdot \epsilon_o \cdot r \cdot R}{R - r}, \quad (4)$$

где R и r – соответственно внутренний радиус высокопотенциального (наружного) электрода и наружный радиус низкопотенциального (внутреннего) электрода; одновременно R является внутренним радиусом полусферы донной части высокопотенциального электрода, а r является радиусом полусферической вершины низкопотенциального электрода; l_1 – длина перекрытия цилиндрических поверхностей электродов 1 и 2; ϵ_o – диэлектрическая постоянная вакуума; $\epsilon_o = (1/36\pi) \cdot 10^{-9}$ [Ф/м].

Дифференцируя (4) по температуре, получим с учетом того, что ϵ_o для вакуумного конденсатора не зависит от температуры:

$$\frac{dC_1'}{dT} = 2\pi\epsilon_o \left\{ \frac{1}{\ln(R/r)} \cdot \frac{dl_1}{dT} - \frac{l_1}{\ln^2(R/r)} \cdot \frac{d[\ln(R/r)]}{dT} \right\};$$

$$\frac{dC_1''}{dT} = 2\pi\epsilon_o \left[\frac{R^2}{(R-r)^2} \cdot \frac{dr}{dT} - \frac{r^2}{(R-r)^2} \cdot \frac{dR}{dT} \right]. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что дифференциал от логарифмической функции равен нулю, так как электроды 1 и 2 изготовлены из одного материала и зависимость изменений R и r от температуры носит линейный характер, и поделив левые и правые части выражений (5) соответственно на левые и правые части выражений (4), получим

$$\frac{1}{C_1'} \cdot \frac{dC_1'}{dT} = \frac{1}{l_1} \cdot \frac{dl_1}{dT} \quad \text{и} \quad \frac{1}{C_1''} \cdot \frac{dC_1''}{dT} = \frac{1}{R-r} \left(\frac{R}{r} \cdot \frac{dr}{dT} - \frac{r}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \right). \quad (6)$$

Переходя от дифференциалов функций к их приращениям, будем иметь

$$\alpha_{C_1'} = \alpha_{l_1} \quad \text{и} \quad \alpha_{C_1''} = (R \cdot \alpha_r - r \cdot \alpha_R) \cdot \frac{1}{R-r},$$

или с учетом того, что $\alpha_r = \alpha_R = \alpha_m$ (где α_m – КТР меди), получим

$$\alpha_{C_1} = \alpha_{C_1'} + \alpha_{C_1''} = \alpha_{l_1} + \alpha_m. \quad (7)$$

Расчет величины α_{l_1} осуществляется из анализа двух размерных цепей (внешней и внутренней), оказывающих влияние на изменение длины перекрытия электродов l_1 (рис. 2).

Группируя элементы размерных цепей по материалам с одинаковыми КТР, будем иметь

$$\alpha_{l_1} = \frac{\alpha_{g_1} (O_1 + O_2 - O) + \alpha_n (H_1 + H_2) - \alpha_m (M_1 + M_2 + M_3) - \alpha_{g_2} K}{O_1 + O_2 - O + \sum_{i=1}^2 H_i + \sum_{j=1}^3 M_j + K}, \quad (8)$$

где α_{g_1} и O_i – КТР диэлектрика (типа g_1) и длины диэлектрических элементов вакуумно-плотной оболочки; α_n , H_i – КТР никель-кобальтового сплава и длины элементов из этого сплава; α_m , M_i – КТР меди и длины элементов внутренней арматуры из меди; α_{g_2} , K – КТР диэлектрика (типа g_2) и длина этого изолятора.

2. Расчет ТКЕ низковольтного плеча первого каскада

Низковольтная емкость первого каскада образована наружной цилиндрической поверхностью промежуточного электрода 1 (являющегося продолжением низкопотенциального электрода высоковольтного плеча, показанного на рис. 2) и цилиндрической частью фланца 2 (рис. 3), к которой добавляется емкость установочного диэлектрика 3.

Формулу для расчета этой емкости можно представить в виде двух составляющих: $C_2 = C_2' + C_2''$, причем

$$C_2' = \frac{2\pi \cdot \epsilon_o \cdot l_2}{\ln(D_2/d_2)}, \quad \text{и} \quad C_2'' = \frac{\pi \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_3 \cdot (D_3^2 - d_3^2)}{4K}, \quad (9)$$

где D_2 – внутренний диаметр цилиндрической части фланца; d_2 – наружный диаметр промежуточного электрода 1; l_2 – длина перекрытия цилиндрических поверхностей с диаметрами D_2 и d_2 ; D_3 и d_3 – соответственно наружный и внутренний диаметры установочного диэлектрика 3; K – высота диэлектрика; ϵ_3 – диэлектрическая проницаемость установочного диэлектрика.

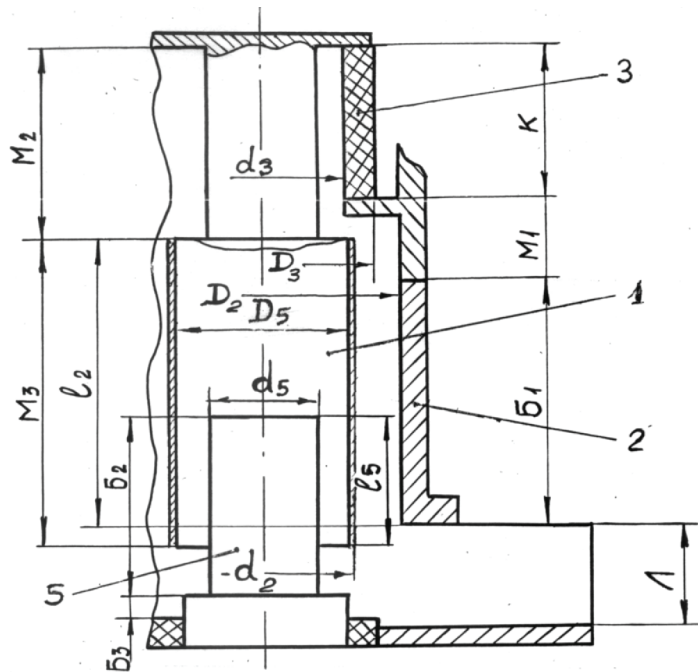


Рис. 3. К расчету ТКЕ низковольтного плеча первого каскада и высоковольтного плеча второго каскада

Дифференцируя составляющие формулы C_2 по температуре, получим следующие выражения дифференциалов составляющих частей низковольтной емкости:

$$\frac{dC_2'}{dT} = 2\pi\epsilon_o \left\{ \frac{1}{\ln(D_2/d_2)} \cdot \frac{dl_2}{dT} - \frac{l_2}{\ln^2(D_2/d_2)} \cdot \frac{d[\ln(D_2/d_2)]}{dT} \right\}$$

И

$$\frac{dC_2''}{dT} = \frac{\pi \epsilon_o}{4} \left[\frac{(D_3^2 - d_3^2)}{K} \cdot \frac{d\epsilon_3}{dT} - \frac{\epsilon_3 (D_3^2 - d_3^2)}{K^2} \cdot \frac{dK}{dT} + \frac{\epsilon_3}{K} \cdot \frac{d(D_3^2 - d_3^2)}{dT} \right]. \quad (10)$$

Учитывая равенство нулю дифференциала логарифмической функции и поделив левые и правые части выражений (10) на соответствующие части выражений для C'_2 и C''_2 , будем иметь

$$\frac{1}{C_2'} \frac{dC_2'}{dT} = \frac{1}{l_2} \frac{dl_2}{dT} \quad \text{и} \quad \frac{1}{C_2''} \frac{dC_2''}{dT} = \frac{1}{\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{dT} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} + \frac{1}{D_3^2 - d_3^2} \frac{d(D_3^2 - d_3^2)}{dT}. \quad (11)$$

Переходя от дифференциалов функций к их приращениям, получим

$$\alpha_{C_2'} = \alpha_{l_2} \text{ и } \alpha_{C_2''} = \alpha_{\varepsilon_3} - \alpha_{\text{л}} + \frac{2}{D_3^2 - d_3^2} (D_3^2 \cdot \alpha_{D_3} - d_3^2 \cdot \alpha_{d_3}).$$

Так как $\alpha_K = \alpha_{D_3} = \alpha_{d_3} = \alpha_g$ (как КТР установочного диэлектрика), то

$$\alpha_{C_2''} = \alpha_{\varepsilon_3} - \alpha_g + 2\alpha_g = \alpha_{\varepsilon_3} + \alpha_g,$$

где α_{ε_3} – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости установочного диэлектрика; α_g – коэффициент линейного расширения установочного диэлектрика.

Таким образом,

$$\alpha_{C_2} = \alpha_{l_2} + \alpha_{\varepsilon_3} + \alpha_g. \quad (12)$$

Аналогично определению α_{l_1} , в расчете величины α_{l_2} (изменение длины перекрытия электрода 1 относительно цилиндрической части фланца 2 – рис. 3) следует исходить из анализа размерных цепей, который позволяет записать

$$\alpha_{l_2} = \frac{1}{B_1 + M_1 - M_2 + K} [\alpha_{\text{б}} \cdot B_1 + \alpha_{\text{м}} (M_1 - M_2) + \alpha_g \cdot K], \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{б}}, \alpha_{\text{м}}, \alpha_g$ – соответственно КТР бронзы, меди и установочного диэлектрика.

3. Расчет ТКЕ высоковольтного плеча второго каскада

Высоковольтная емкость второго каскада делителя C_3 образована внутренней цилиндрической поверхностью промежуточного электрода 1 (рис. 3) и наружной поверхностью низкопотенциального электрода 5. Ее значение определяется известной формулой для расчета системы цилиндрических электродов:

$$C_3 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_o \cdot l_5}{\ln(D_5/d_5)}, \quad (14)$$

где D_5 – внутренний диаметр промежуточного электрода 1; d_5 – наружный диаметр низкопотенциального электрода 5; l_5 – длина перекрытия электродов.

Выполнив действия, аналогичные вышерассмотренным случаям с емкостями C_1' и C_2'' , получим

$$\alpha_{C_3} = \alpha_{l_5}, \quad (15)$$

здесь из рис. 3

$$\alpha_{l_5} = \frac{\alpha_{\text{б}} (B_2 + B_3 - B_1) + \alpha_{\text{м}} (M_2 + M_3 - M_1) - \alpha_{\text{л}} \cdot L - \alpha_g \cdot K}{B_2 + B_3 - B_1 + M_2 + M_3 - M_1 - L - K}, \quad (16)$$

где $\alpha_{\text{б}}, \alpha_{\text{м}}, \alpha_{\text{л}}, \alpha_g$ – соответственно КТР бронзы, меди, латуни и керамики марки ВК94-1.

4. Расчет ТКЕ низковольтного плеча второго каскада

Проектирование делителей осуществляется таким образом, чтобы первый каскад снижал напряжение в 30–100 раз, а второй – в 100–1000 раз. В связи с этим не имеет смысла вакуумировать низковольтную емкость второго каскада, так как электрической прочности воздушного диэлектрика достаточно для обеспечения рабочего напряжения выходной емкости делителя, составляющего тысячные (и менее) доли от входного напряжения. Низковольтную емкость второго каскада экономичнее изготавливать, в отличие от вышерассмотренных емкостей C_1 , C_2 , C_3 , в виде системы плоских, дисковых электродов.

Взаимное расположение чередующихся электродов разного знака 1 и 2 с заданными междуэлектродными зазорами обеспечивается их закреплением на взаимно транспонированных траверсах 3 и 4 (рис. 4).

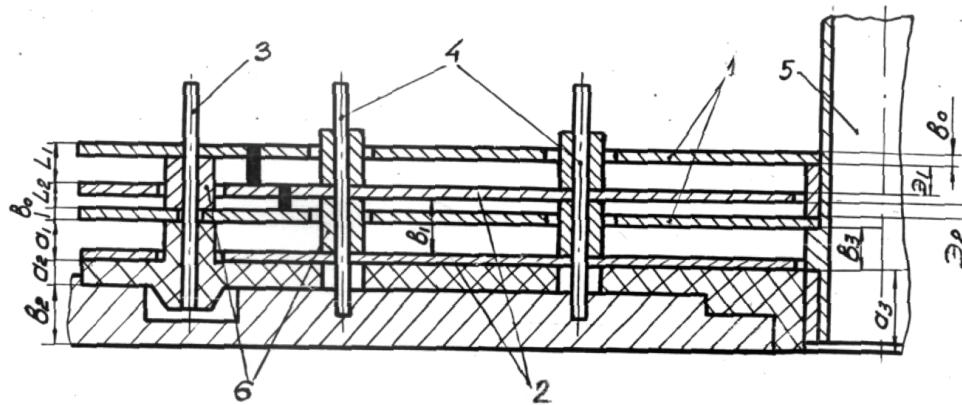


Рис. 4. К расчету ТКЕ низковольтного плеча второго каскада

При этом для обеспечения некоторой подстройки емкости система подвижных электродов 1 закрепляется на внешних траверсах в точках 6 по окружности периферийной части дисков, а центральные зоны дисков закрепляются на опорном цилиндре 5, имеющем возможность ограниченно перемещаться в аксиальном направлении с помощью механизма регулировки (не показан на рис. 4). Благодаря перемещению цилиндра 5, междуэлектродные зазоры $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ изменяются противоположно по отношению друг к другу. Исходное положение дисковых электродов определяется разделительными втулками 6 размером b_1 , выступом опорного цилиндра размером b_3 , выступом основания размером a_1 , обеспечивающими несимметричность зазоров $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ [2, 3].

Емкость подобной системы электродов низковольтного плеча рассчитывается по формуле

$$C_4 = \frac{\pi \epsilon (D_6^2 - d_6^2) (N-1) (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2)}{8 \cdot \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2}, \quad (17)$$

где D_6 – наружный диаметр дисковых электродов; d_6 – внутренний диаметр неподвижных электродов; $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ – междуэлектродные зазоры; N – количество электродов.

Дифференцирование формулы (17) по температуре дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{dC_4}{dT} = \pi \epsilon_o (N-1) (D_6^2 - d_6^2) & \left(-\frac{1}{\mathfrak{E}_1^2} \cdot \frac{d\mathfrak{E}_1}{dT} - \frac{1}{\mathfrak{E}_2^2} \cdot \frac{d\mathfrak{E}_2}{dT} \right) + \\ & + \frac{2(\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2)}{\mathfrak{E}_1 \cdot \mathfrak{E}_2} \left(D_6 \frac{dD_6}{dT} - d_6 \frac{dd_6}{dT} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Выполнив несложные преобразования выражения (18) и поделив его левую и правую части на соответствующие части формулы (17), будем иметь

$$\frac{1}{C_4} \cdot \frac{dC_4}{dT} = \frac{\mathfrak{E}_1 \cdot \mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2} \left(-\frac{1}{\mathfrak{E}_1^2} \cdot \frac{d\mathfrak{E}_1}{dT} - \frac{1}{\mathfrak{E}_2^2} \cdot \frac{d\mathfrak{E}_2}{dT} \right) + \frac{2}{D_6^2 - d_6^2} \left(D_6 \frac{dD_6}{dT} - d_6 \frac{dd_6}{dT} \right).$$

Переходя от дифференциалов функций к их приращениям, получим

$$\alpha_{C_4} = \frac{2}{D_6^2 - d_6^2} (D_6^2 \cdot \alpha_{D_6} - d_6^2 \cdot \alpha_{d_6}) - \frac{\mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2} \cdot \alpha_{\mathfrak{E}_1} - \frac{\mathfrak{E}_1}{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2} \cdot \alpha_{\mathfrak{E}_2}. \quad (19)$$

Как было отмечено выше, система электродов одного знака имеет возможность перемещаться, изменяя зазоры $\mathfrak{E}_1$ и $\mathfrak{E}_2$ и позволяя подстраивать емкость низковольтного плеча второго каскада под требуемое значение коэффициента деления. С целью получения стабильной повторяемости результатов подстройки во время периодической аттестации делителя в качестве материала электродов выбрана бериллиевая бронза БрБ2 (БрБ2,5), обладающая превосходными стабильно-упругими свойствами. Разделительные шайбы и втулки системы электродов также выполнены из бронзы. В связи с тем, что для всех деталей емкостного блока применен материал с одним и тем же КТР (α_6), а также с учетом того, что $\alpha_{D_6} = D_6 \cdot \alpha_6$, $\alpha_{d_6} = d_6 \cdot \alpha_6$, $\alpha_{\mathfrak{E}_1} = \mathfrak{E}_1 \cdot \alpha_6$, $\alpha_{\mathfrak{E}_2} = \mathfrak{E}_2 \cdot \alpha_6$, выражение для α_{C_4} упрощается и принимает вид

$$\alpha_{C_4} = 2\alpha_6 \left(\frac{D_6^3 - d_6^3}{D_6^2 - d_6^2} \right) - \frac{\mathfrak{E}_1 \mathfrak{E}_2}{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2}. \quad (20)$$

Из рис. 4 видно, что величину зазоров $\mathfrak{E}_1$ и $\mathfrak{E}_2$ можно определить по следующим размерным цепочкам. Для каждого из зазоров $\mathfrak{E}_1$ и $\mathfrak{E}_2$ просматриваются по два варианта размерных цепочек, в связи с чем целесообразно рассчитать среднеарифметические значения этих вариантов, что дает следующие выражения для расчета $\mathfrak{E}_1$ и $\mathfrak{E}_2$:

$$\mathfrak{E}_1 = \frac{b_3 - 2b_0 + a_1}{2} \text{ и } \mathfrak{E}_2 = \frac{2b_1 - b_3 - a_1}{2}. \quad (21)$$

Итак, располагая всеми составляющими формулы (3), можно определить изменение коэффициента деления от температуры.

Полученные формулы и методика определения термостабильности коэффициента деления являются типовыми и могут быть использованы для расчета разработанных и подлежащих разработке вакуумных емкостных делителей напряжений.

Для делителя типа ДНЕ1-4 с рабочим напряжением до 100 кВ и коэффициентом деления 10000:1 в результате расчета получен коэффициент температурной нестабильности $\alpha_K = 12,3 \cdot 10^{-6}$, 1/град.

Заключение

Приведенная методика расчета коэффициента температурного изменения, коэффициент деления (ТКК_д) вакуумных делителей дает возможность дополнить несовершенный экспериментальный способ оценки ТКК_д делителей более точными расчетными данными. Вместе с тем анализ полученных аналитических выражений для ТКК_д по разработанной методике позволяет осуществить обоснованный подбор конструкционных материалов арматуры и осуществить некоторые конструктивные усовершенствования узлов делителей с целью минимизации температурной нестабильности.

Список литературы

1. **Иоссель, Ю. Я.** Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергия, 1969. – 240 с.
2. **Смирнов, Э. Н.** Зависимость емкости конденсатора от аксиальной деформации центральной зоны подвижных плоских электродов / Э. Н. Смирнов, А. П. Воронов, В. М. Сидоров // Электронная техника. – 1974. – Вып. 1. – С. 15–20. – (Радиодетали и радиокомпоненты).
3. **Смирнов, Э. Н.** Вакуумный каскадный емкостной делитель напряжения / Э. Н. Смирнов // Электронная техника. – 1981. – Вып. 2 (43). – С. 19–22. – (Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты).

Смирнов Эдуард Николаевич

кандидат технических наук,
ведущий специалист, ВГУП НИИ
«Электромеханических приборов»

E-mail: Yrkov_nk@mail.ru

Smirnov Eduard Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
key specialist, Federal research institute
“Elektromekhanicheskie pribory”

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

E-mail: Yrkov_nk@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondratyevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio devices
engineering and production,
Penza State University

УДК 681.3.011.4.001

Смирнов, Э. Н.

Температурная стабильность высоковольтных вакуумных емкостных делителей / Э. Н. Смирнов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 82–91.