

## РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА БИЕНИЙ ВАЛОВ ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ, ВЫЗВАННЫХ НЕТОЧНОСТЬЮ УСТАНОВКИ НА МАШИНЕ

*Розроблено методики розрахунків похибок вимірювання ємнісним датчиком радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин, спричинених неточністю встановлення на машині.*

Как известно [1, 2], во время работы крупных генерирующих электрических машин могут возникать различного рода механические дефекты. Особенно это касается гидрогенератора, конструкция которого имеет многоэлементные вращающиеся узлы большого диаметра, сравнительно небольшой зазор между ротором и статором, и поэтому представляет собой широкое поле для проявления различного характера вибраций в широком диапазоне частот. Вибрация, в свою очередь, вызывает развитие механических дефектов, приводящих к разбалансировке агрегата, нестабильности положения оси валопровода, структурным резонансам и, как следствие, повреждениям подшипников, уплотнений, ослаблению крепления и искажению формы зазора. К механическим дефектам также относятся: перекос и эксцентриситет ротора относительно расточки статора, искажение формы расточки статора, радиальное и осевое биение вала, смещение отдельных частей конструкции и т.д.

Своевременное выявление механических дефектов в работающей машине позволит резко повысить надежность ее работы, снизить расходы и простои, связанные с ремонтом. Задача выбора оптимального комплекса параметров для контроля состояния машины во время работы достаточно сложна, так как, с одной стороны, необходимо выявлять по возможности большее количество вероятных дефектов, а с другой – выбрать наиболее эффективные методы контроля из многих применяющихся и разрабатываемых, руководствуясь здравым смыслом при определении затрат на систему контроля.

Измерители параметров механических дефектов, в которых в качестве воспринимающего элемента применяются датчики различных типов, являются важнейшей частью систем мониторинга и диагностики крупных электрических машин. В системах широко используются датчики для измерения радиальных биений цилиндрических поверхностей вала, так как информация о биениях позволяет определить большое количество дефектов. Согласно данным [1, 6] при измерении параметров биений (амплитуды и начальной фазы гармонических составляющих) можно определить более половины дефектов гидроагрегата.

Перспективными устройствами для измерения радиальных биений вращающихся валов различных машин являются емкостные датчики измерения расстояний до проводящих поверхностей [8,9]. Их основное преимущество перед широко применяемыми в настоящее время для этих целей вихретоковыми датчиками – независимость измерительной характеристики от «металлургических» свойств материала вала, его химического состава и намагниченности. Емкостный датчик такого типа, как правило, состоит из круглого активного и двух кольцевых (охранного и экранирующего) электродов, расположенных вокруг активного в одной плоскости с ним. Принцип работы датчика основан на измерении электрической емкости  $C_x$  между активным электродом и проводящей поверхностью, в данном случае валом. Емкость  $C_x$  функционально зависит от расстояния  $d$  между активным электродом и валом  $C_x = f(d)$ , а емкостное сопротивление  $1/C_x$ , в первом приближении, будет пропорционально расстоянию. Разность между наибольшим и наименьшим расстоянием за один оборот вала определяет величину биения. В работе [4] проведен анализ погрешностей такого датчика с учетом радиуса  $r$  активного электрода и радиуса  $R$  вала, расстояние до которого опре-

деляется. Показано, что для снижения величины погрешности, обусловленной кривизной вала, необходимо уменьшать величину радиуса активного электрода  $r$ .

Однако уменьшение радиуса  $r$  нежелательно в силу ряда причин. Во-первых, с уменьшением радиуса уменьшается площадь активного электрода, что приводит к снижению чувствительности. Во-вторых, как показано в работе [8], при небольших радиусах возникает погрешность, обусловленная микронеровностями контролируемой поверхности. Для устранения указанной погрешности необходимо увеличивать площадь активного электрода. Экспериментально было установлено, что при контроле биений поверхности, обработанной точением, радиус активного электрода вала должен быть не менее 8 мм. И в-третьих, так как с уменьшением радиуса рабочего электрода уменьшается рабочая емкость датчика, то большее влияние начинает приобретать составляющая погрешности, вызванная действием паразитной емкости. Эта емкость, обусловленная неидеальным экранированием датчика и подводящего провода, шунтирует рабочую емкость и искажает обратно пропорциональную зависимость емкости от расстояния.

Поэтому, чтобы уменьшить величину погрешности, обусловленную кривизной контролируемого вала (не уменьшая при этом площадь электрода), было предложено изменить форму активного электрода датчика с круглой на прямоугольную. При этом во время измерения более короткая сторона прямоугольника располагается перпендикулярно продольной оси контролируемого вала [6].

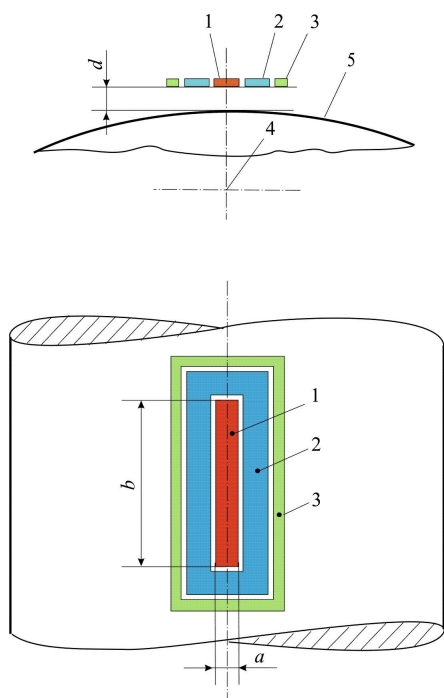


Рис. 1

На рис. 1 показана схема такого емкостного датчика, который состоит из активного электрода прямоугольной формы 1 с размерами  $a$  и  $b$ , охранного электрода 2 и экранного электрода 3. Меньшая сторона  $a$  прямоугольного электрода 1 расположена перпендикулярно продольной оси вала 4. Радиальное биение вала определяется путем измерения расстояния  $d$  между электродом 1 и цилиндрической поверхностью 5.

Исследования, выполненные в работе [5], показали: замена круглого датчика на прямоугольный такой же площади уменьшает погрешность, обусловленную кривизной вала, в 2 раза (при  $a/b=0,5$ ) и в 10 раз (при  $a/b=0,1$ ).

Расчет характеристик датчика в работе [5] произведен при условии, что активный электрод по отношению к контролируемому валу находится в идеальном положении. Однако при установке датчика на машине неизбежно возникают технологические погрешности, такие как эксцентриситет, перекос и непараллельность, которые могут проявляться одновременно в разной степени.

**Целью** настоящей работы является оценка влияния указанных погрешностей на точность измерения величины биений.

**Расчет погрешности от эксцентриситета.** На рис. 2 изображен активный электрод 1 емкостного датчика биений, установленный на электрической машине с некоторым эксцентриситетом  $e$  относительно вала 2. Размеры пластины датчика  $a \times b$ , причем большая сторона  $b$  расположена вдоль продольной оси вала 2 радиусом  $R$ , а меньшая – перпендикулярно. Зазор в датчике равен  $d$ .

Рассчитаем относительное изменение электрической емкости  $C_x$  между поверхностями датчика 1 и вала 2 для положения датчика с эксцентриситетом  $e$  в сравнении с той же емкостью  $C_0$  для идеального положения датчика, то есть по центру вала.

Для расчета введем систему координат  $XYZ$  таким образом, чтобы плоскость  $XOY$  совпадала с плоскостью активного электрода датчика 1, а ось  $OZ$  была перпендику-

лярна продольной оси вала 2 и пересекала ее. Выберем на плоскости электрода элементарную площадь 3 с бесконечно малыми размерами  $\Delta x$  и  $\Delta y$  и координатами  $x_i$  и  $y_i$ . Емкость между площадью 3 и поверхностью вала 2 определится как  $\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{|z_i|}$ .

Учитывая соотношения в прямоугольных треугольниках  $ABC$  и  $ABO_R$ , определим, что

$|z_i| = d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}$ . Тогда

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (1)$$

При неограниченном увеличении количества элементарных площадей существует предел в виде двойного интеграла от функции

$$f(x, y) = \frac{1}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}$$

по области  $D$ , которая в данном случае является прямоугольником. Тогда общая емкость между пластиной 1 и валом 2 будет равна

$$C_X = \sum_{i=1}^{i=\infty} \Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_D \frac{dx dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (2)$$

Вычисление двойного интеграла (2) сведем к вычислению двукратного интеграла, при этом сначала произведем интегрирование по  $y$ , рассматривая  $x$  как постоянную, а затем полученный результат интегрируем по  $x$ :

$$C_X = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{\phi_1}^{\phi_2} dx \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (3)$$

Найдем пределы внутреннего и внешнего интегралов. Так как уравнения сторон  $a$  имеет вид  $y = b/2$  и  $y = -b/2$ , а уравнения сторон  $b$  –  $x = e - a/2$  и  $x = e + a/2$ , то пределы внутреннего интеграла можно записать в виде  $\phi_1 = e - a/2; \phi_2 = e + a/2$ , внешнего –  $\phi_1 = -b/2; \phi_2 = b/2$ . Формула (3) примет вид

$$C_X = \sum_{i=1}^{i=\infty} \Delta C_i = \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{e-a/2}^{e+a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = b \varepsilon_0 \varepsilon \int_{e-a/2}^{e+a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (4)$$

Емкость  $C_0$  (без эксцентриситета, т.е.  $e = 0$ ) согласно [5] будет равна

$$C_0 = 2b \varepsilon_0 \varepsilon \int_0^{a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (5)$$

Погрешность  $\delta$ , вносимая эксцентриситетом, будет равна относительному изменению емкости от  $C_0$  до  $C_X$  и составит  $\delta = 100 \cdot \frac{C_X - C_0}{C_0}$ .

На рис. 3  $a$  показана зависимость  $\delta = f(e)$  для ряда датчиков с прямоугольным плоским электродом и одинаковой площадью, но с разными величинами сторон  $a$  и  $b$  (1 –  $a \times b = 3,2 \times 62,8 \text{ мм}^2$ ; 2 –  $6,4 \times 31,4 \text{ мм}^2$ ; 3 –  $9,6 \times 20,9 \text{ мм}^2$ ; 4 –  $12,8 \times 15,7 \text{ мм}^2$ ). Площади электродов равны между собой и равны площади круглого электрода радиусом  $r = 8 \text{ мм}$ .

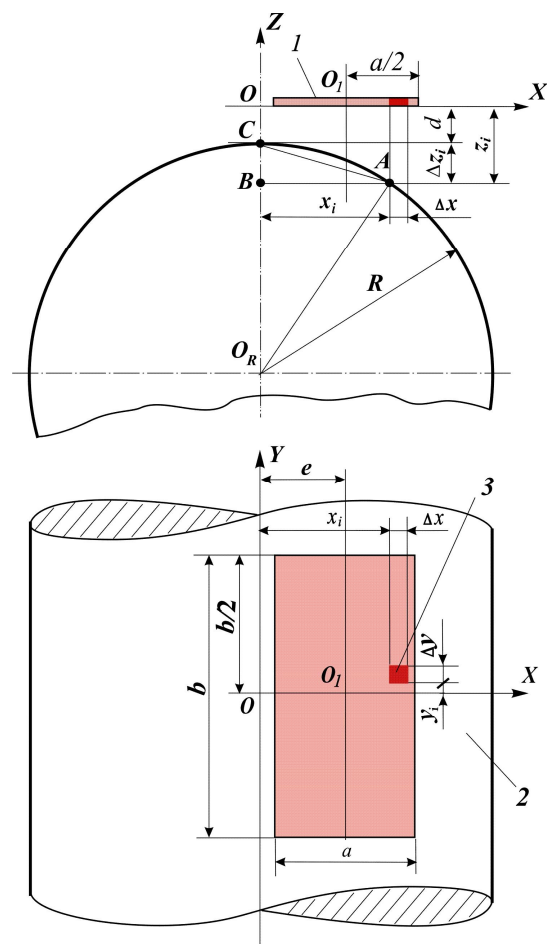


Рис. 2

Расчет выполнен при значениях  $d = 1$  мм и  $R = 0,35$  м. Как видно из рис. 3 а и расчетных формул, погрешность от эксцентриситета практически не зависит от соотношения сторон прямоугольного активного электрода и при  $e < 2,5$  мм не превышает 0,85 %.

На рис. 3 б показана зависимость  $\delta = f(e)$  для плоского датчика с прямоугольным электродом размером  $6,4 \times 31,4$  мм<sup>2</sup> при ряде значений радиуса  $R$  контролируемого вала.

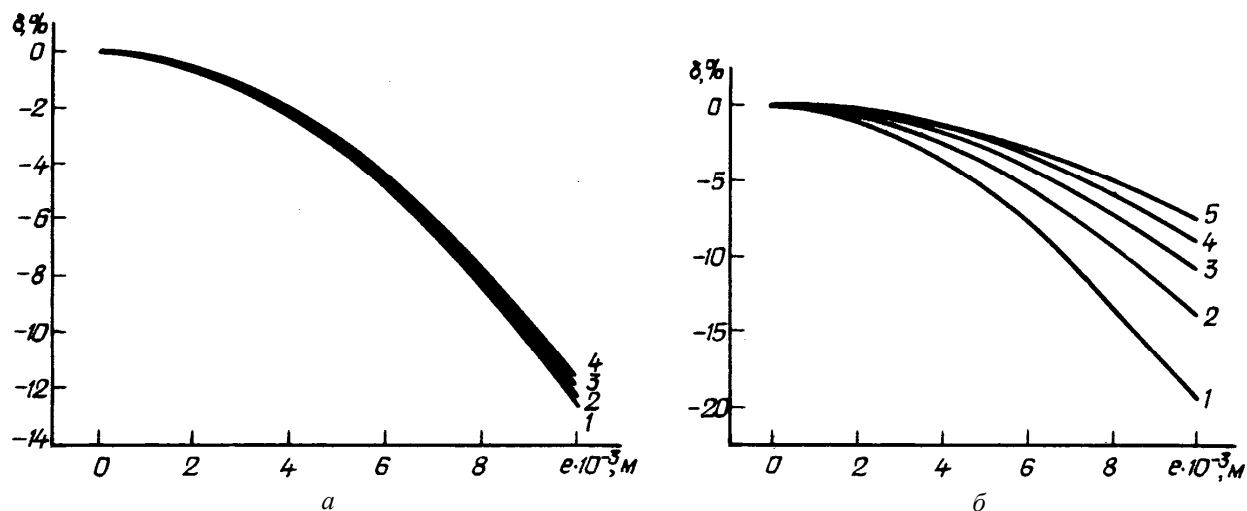


Рис. 3

Как следует из рис. 3 б, погрешность, вносимая эксцентриситетом, больше сказывается при меньших значениях  $R$ . Ее величина при величине эксцентриситета  $e < 2,5$  мм (для  $0,2$  м  $< R < 0,6$  м) находится в пределах  $1,5\% > \delta > 0,5\%$ .

**Расчет погрешности от перекоса.** Составим расчетную схему для определения влияния перекоса емкостного датчика с плоским прямоугольным электродом (рис. 4). Пусть электрод датчика 1, в результате неточной установки на машине, получился наклоненным на некоторый угол  $\alpha$  к продольной оси вала 2. Естественно, емкость  $C_x$  между электродом 1 и валом 2 будет отличаться от такой же емкости  $C_0$  в идеальном положении, т.е. без перекоса. Рассчитаем относительное изменение этой емкости.

Введем систему координат  $XYZ$  таким образом, чтобы плоскость  $XOY$  проходила через короткую сторону  $a$  параллельно оси вала 2. Начало координат (точку  $O$ ) поместим в середине стороны  $a$ .

Проекцией круглой плоской пластины с размерами  $a$  и  $b$  на плоскость  $XOY$  является прямоугольник с размерами  $a$  и  $b \cos \alpha$ . Выберем на плоскости  $XOY$  в области, ограниченной этим прямоугольником (область  $D$ ), элементарную площадь 3 с бесконечно малыми размерами  $\Delta x$  и  $\Delta y$  и координатами  $x_i$  и  $y_i$ . Проекция площади 3 на плоскость электрода 1 также будет являться элементарной площадью, а емкость между ней и валом 2 будет равна

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{|z_i|}.$$

Используя рис. 4, найдем, что  $|z_i| = z_{i1} + |d| + |z_{i2}|$ . Рассматривая прямоугольный треугольник  $EFO$ , находим, что  $z_{i1} = y_i \operatorname{tg} \alpha$ . Далее, из соотношений в прямоугольных треугольниках  $O_R AB$  и  $ABC$  определим, что  $z_{i2} = d + \sqrt{R^2 - x_i^2}$ , где  $d$  – измеряемое расстояние;  $R$  – радиус вала;  $x_i, y_i$  – координаты элементарной площади 3 на плоскости  $XOY$  в области  $D$ . Тогда

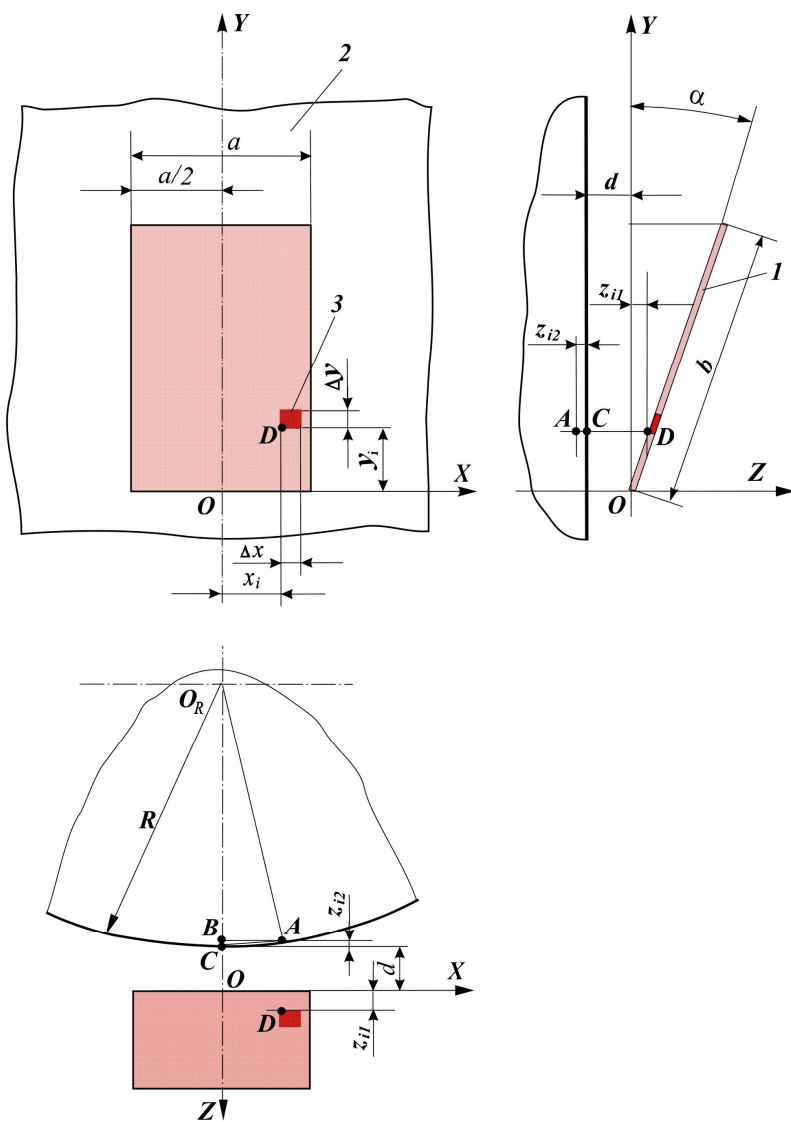


Рис. 4

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{y_i \operatorname{tg} \alpha + d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (6)$$

Общая емкость между пластиной 1 и валом 2 будет равна

$$C_x = \sum_{i=1}^{i=\infty} \Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_D \frac{dx dy}{y_i \operatorname{tg} \alpha + d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (7)$$

Вычисление двойного интеграла (7) сведем к вычислению двукратного интеграла, при этом вначале произведем интегрирование по  $y$ , рассматривая  $x$  как постоянную, а затем полученный результат интегрируем по  $x$ :

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dx \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{dy}{y \operatorname{tg} \alpha + d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (8)$$

Найдем пределы внутреннего интеграла  $\phi_1 = 0; \phi_2 = b \cos \alpha$ . Пределы внешнего интеграла с переменной  $x$  найдем как абсциссы самой левой и самой правой точек области  $D$ :  $\varphi_1 = -a/2$ ;  $\varphi_2 = +a/2$ . Формула (8) примет вид

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{-a/2}^{+a/2} dx \int_0^{b \cos \alpha} \frac{dy}{y \operatorname{tg} \alpha + d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (9)$$

Вычисляя внутренний интеграл, получаем

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\operatorname{tg} \alpha} \int_{-a/2}^{+a/2} \ln \left[ \frac{b \sin \alpha}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} - 1 \right] dx. \quad (10)$$

Погрешность  $\delta$ , вносимая эксцентриситетом, будет равна относительному изменению емкости и составит  $\delta = 100 \cdot \frac{C_x - C_0}{C_0}$ , где  $C_0$  – емкость плоского датчика с прямоугольной пластиной без перекоса, т.е. при  $\alpha = 0$ . Она определяется по формуле (5).

На рис. 5 а показана зависимость  $\delta = f(\alpha)$  для прямоугольного активного электрода с рядом размеров (при  $d = 1$  мм и  $R = 0,35$  м), а на рис. 5 б – эта же зависимость для ряда значений радиуса  $R$  вала (при  $d = 1$  мм и  $a \times b = 6,4$  мм  $\times$  31,4 мм).

Как следует из рис. 5 а и расчетных формул, для того чтобы погрешность измерения, вносимая перекосом, не превышала 1 %, перекося плоскости активного электрода относительно оси контролируемого вала не должен превышать одной угловой минуты. Необходимо учитывать, что узкие датчики ( $a/b = 0,02 \dots 0,25$ ) более чувствительны к перекоосу.

Из рис. 5 б видно, что погрешность от перекоса практически не зависит от радиуса  $R$  вала.

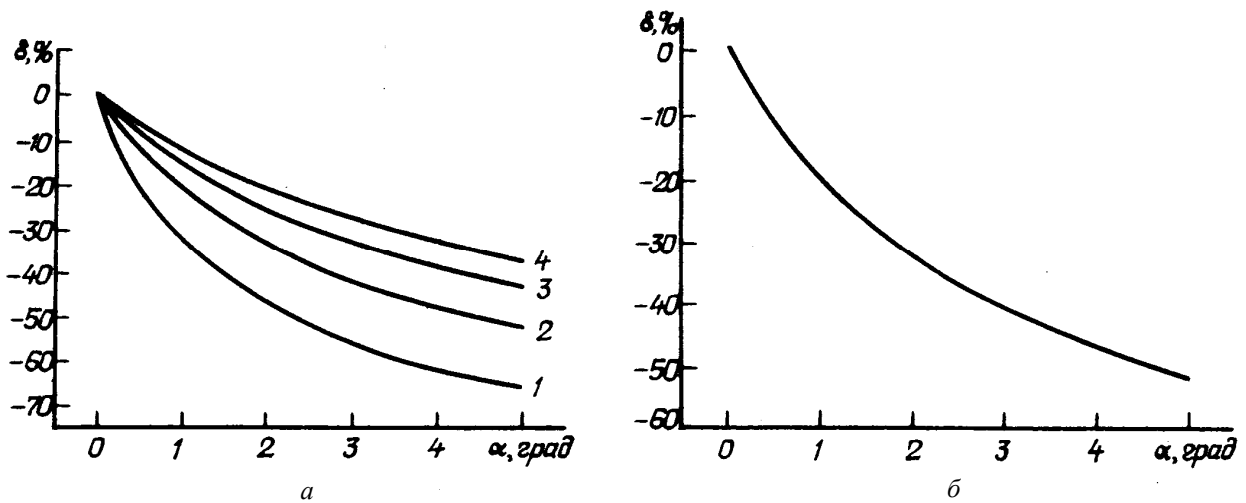


Рис. 5

**Расчет погрешности от непараллельности.** На рис. 6 изображен активный электрод 1 емкостного датчика биений, установленный на электрической машине таким образом, что большая сторона прямоугольного активного электрода  $b$  оказалась непараллельной продольной оси вала 2. Отклонение от непараллельности составляет некоторый угол  $\beta$ . Зазор в датчике равен  $d$ .

Рассчитаем относительное изменение электрической емкости  $C_x$  между поверхностями датчика 1 и вала 2 для положения датчика с непараллельностью, определяемой углом  $\beta$ , в сравнении с той же емкостью  $C_0$  для идеального положения датчика (на рис. 6 показано пунктиром).

Для расчета введем систему координат  $XYZ$  таким образом, чтобы плоскость  $XOY$  совпадала с плоскостью активного электрода датчика 1, а ось  $OZ$  проходила через центр электрода 1 и при этом была перпендикулярна продольной оси вала 2 и пересекала ее.

С учетом симметрии емкость  $C_x$  между всей поверхностью электрода 1 и поверхностью вала 2 будет равна удвоенной емкости прямоугольного участка  $ABFG$ . В свою очередь, емкость участка  $ABFG$  состоит из суммы емкостей  $(C_{1X}, C_{2X}, C_{3X})$  трех участков:  $ABC$  – область  $D_1$ ,  $CBEG$  – область  $D_2$ ,  $GEF$  – область  $D_3$ . То есть можно записать, что  $C_x = 2(C_{1X} + C_{2X} + C_{3X})$ .

Выберем на плоскости участка  $ABFG$  элементарную площадку 3 с бесконечно малыми размерами  $\Delta x$  и  $\Delta y$  и координатами  $x_i$  и  $y_i$ . Емкость между площадкой 3 и поверхностью вала 2 определится как

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{|z_i|}.$$

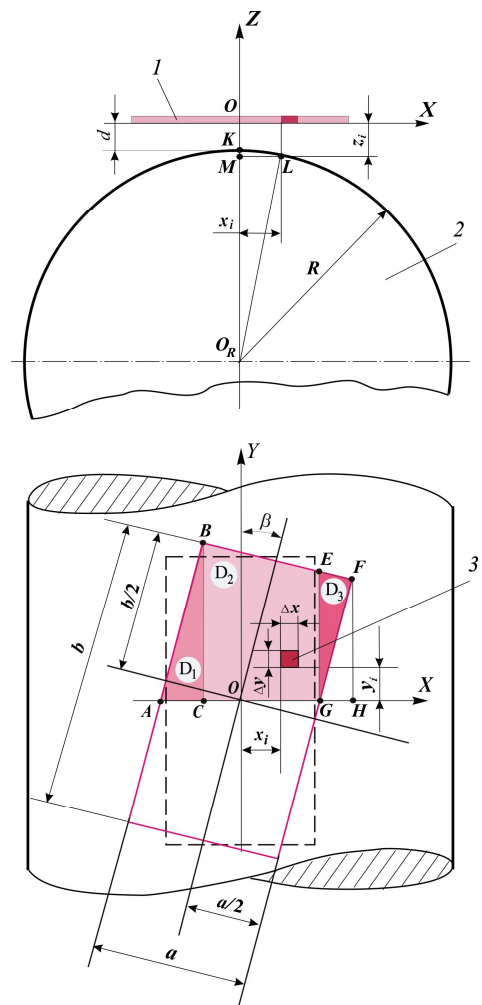


Рис. 6

Учитывая соотношения в прямоугольных треугольниках  $KML$  и  $MLO_R$ , определим, что  $|z_i| = d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}$ . Тогда

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \Delta y}{d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (11)$$

Суммируя емкости элементарных площадей по каждой области  $(D_1, D_2, D_3)$ , вычислим емкости  $C_{1X}, C_{2X}, C_{3X}$  как произведение двойных интегралов от функции  $f(x, y) = \frac{1}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}$  и постоянных  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$ :

$$C_{1X} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_1} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}, \quad C_{2X} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_2} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}},$$

$$C_{3X} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_3} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (12)$$

Вычисление двойных интегралов сведем к вычислению двукратных интегралов, при этом вначале произведем интегрирование по  $y$ , рассматривая  $x$  как постоянную, а затем полученный результат интегрируем по  $x$ :

$$C_{iX} = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{2i}} dx \int_{\varphi_{1i}}^{\varphi_{2i}} \frac{dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}, \quad (13)$$

где  $i=1, 2, 3$ .

Сначала определим пределы внутренних  $(\varphi_{1i}, \varphi_{2i})$  и внешних  $(\varphi_{1i}, \varphi_{2i})$  интегралов для каждой области  $(D_1, D_2, D_3)$ . Для определения пределов выразим координаты точек  $A, C, G, H$  и уравнения прямых  $AB, BF, GF$  через угол  $\beta$  и стороны электрода 1  $a$  и  $b$ .

**Область  $D_1$**

$$\varphi_{11} = 0; \varphi_{21} = \frac{1}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x + \frac{a}{2} \right); \quad \varphi_{11} = -\frac{a}{2 \cos \beta}; \varphi_{21} = -\frac{a}{2} \cos \beta + \frac{b}{2} \sin \beta;$$

$$C_{1X} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_1} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{-\frac{a}{2 \cos \beta}}^{\frac{-\frac{a}{2} \cos \beta + \frac{b}{2} \sin \beta}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x + \frac{a}{2} \right)} dx \int_0^{\frac{1}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x + \frac{a}{2} \right)} \frac{dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} =$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon \int_{-\frac{a}{2 \cos \beta}}^{\frac{-\frac{a}{2} \cos \beta + \frac{b}{2} \sin \beta}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x + \frac{a}{2} \right)} \frac{2x \cdot \cos \beta + a}{2 \sin \beta \left( d + R - \sqrt{R^2 - x^2} \right)} dx. \quad (14)$$

**Область  $D_2$**

$$\varphi_{12} = 0; \varphi_{22} = -tg \beta \cdot x + \frac{b}{2 \cos \beta}; \quad \varphi_{12} = -\frac{a}{2} \cos \beta + \frac{b}{2} \sin \beta; \varphi_{22} = \frac{a}{2 \cos \beta};$$

$$C_{2X} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_2} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{-\frac{a}{2 \cos \beta} + \frac{b}{2} \sin \beta}^{\frac{a}{2 \cos \beta}} dx \int_0^{-tg \beta \cdot x + \frac{b}{2 \cos \beta}} \frac{dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} =$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon \int_{-\frac{a}{2 \cos \beta} + \frac{b}{2} \sin \beta}^{\frac{a}{2 \cos \beta}} \frac{-2x \cdot \sin \beta + b}{2 \cos \beta \left( d + R - \sqrt{R^2 - x^2} \right)} dx. \quad (15)$$

**Область  $D_3$**

$$\phi_{13} = \frac{1}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x - \frac{a}{2} \right); \phi_{23} = -tg \beta \cdot x + \frac{b}{2 \cos \beta}; \varphi_{13} = \frac{a}{2 \cos \beta}; \varphi_{23} = \frac{a}{2} \cos \beta + \frac{b}{2} \sin \beta;$$

$$C_{3x} = \varepsilon_0 \varepsilon \iint_{D_3} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \varepsilon_0 \varepsilon \int_{\frac{a}{2 \cos \beta}}^{\frac{b}{2} \sin \beta + \frac{a}{2} \cos \beta} dx \int_{\frac{1}{\sin \beta} \left( \cos \beta \cdot x - \frac{a}{2} \right)}^{-tg \beta \cdot x + \frac{b}{2 \cos \beta}} \frac{dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} =$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon \int_{\frac{a}{2 \cos \beta}}^{\frac{b}{2} \sin \beta + \frac{a}{2} \cos \beta} \frac{-2x + b \sin \beta + a \cos \beta}{\sin 2\beta (d + R - \sqrt{R^2 - x^2})} dx. \quad (16)$$

Погрешность  $\delta$ , вносимая непараллельностью, будет равна относительному изменению емкости и составит  $\delta = 100 \cdot \frac{C_x - C_0}{C_0}$ , где  $C_0$  – емкость плоского датчика с прямоугольной пластиной без перекоса, т.е. при  $\alpha = 0$ . Она определяется по формуле (5).

На рис. 7 а показана зависимость погрешности от непараллельности  $\delta = f(\beta)$  для ряда датчиков с различными размерами электрода и равной площадью, на рис. 7 б – та же погрешность для датчика с размерами  $a \times b = 6,4 \text{ мм} \times 31,4 \text{ мм}$  для ряда значений радиуса  $R$  вала. Из рис. 7 видно, что непараллельность установки датчика не вызывает погрешность измерения.

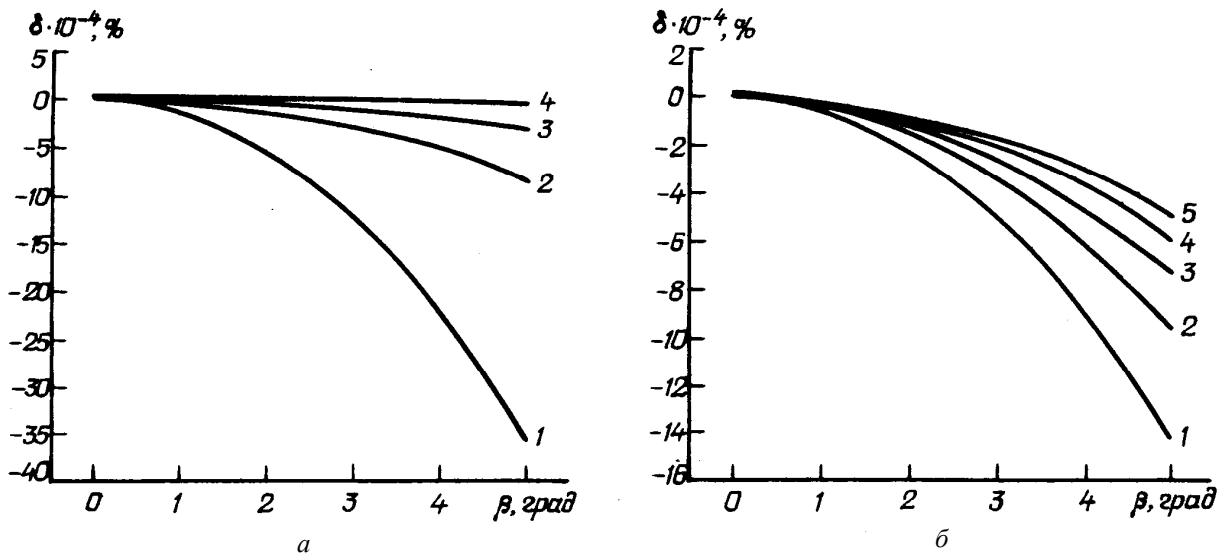


Рис. 7

**Выводы.** 1. При установке датчика необходимо сводить к минимуму перекося активного электрода.

2. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и исследовании емкостных датчиков биений валов мощных турбо- и гидрогенераторов для систем контроля и диагностики, а также быть полезными в следующих случаях: при выборе места установки датчика на машине; разработке конструкции установочного узла; выборе контрольно-измерительных приборов, используемых при установке; разработке технологии регулирования измерителя биений.

*Разработаны методики расчетов погрешностей измерения емкостным датчиком радиальных биений цилиндрических поверхностей валов мощных электрических машин, вызванных неточностью установки на машине.*



*Design procedure for calculation measurement errors of capacitive sensor that intend for measuring of shaft radial runout are proposed. Measurement errors are due to the installation inaccuracy of capacitive sensor on machine.*

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 1998. – 144 с.
2. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
3. *Левицький А.С.* Визначення оптимальних параметрів ємнісного датчика для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних гідроенергетиків // Гідроенергетика України. – 2010. – № 2. – С. 4–8.
4. *Левицький А.С., Новик А.И.* Оценка погрешности измерения емкостными датчиками биений валов электрических машин // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 66–70.
5. *Левицький А.С., Новик А.И.* Исследование емкостного датчика биений валов мощных электрических машин // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5.
6. *Белоглазов А.В., Глазырин Г.В.* Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2008. – № 3(53). – С. 79–84.
7. Заявка 2010 01680, МПК G01B 7/14, G01B 7/22 Ємнісний сенсор для вимірювання радіального биття циліндричних поверхонь валів потужних електричних машин / А.С. Левицький, А.І. Новік; Заявлено 17.02.2010.
8. *Lin Jackson, Bissonnette Marc R.* A New Capacitive Proximity Probe Immune To Electrical Runout // Canadian Machine Vibration Association, 1997 Annual Meeting – Toronto, Canada – 3-5 November 1997. – P. 1–5.
9. [www.vibrosystem.com/pdf/PCS\\_CMVA.PDF](http://www.vibrosystem.com/pdf/PCS_CMVA.PDF).
10. PCS-102 Sonde de proximité capacitive.
11. [http://www.vibrosystem.com/pdf/VW\\_F.PDF](http://www.vibrosystem.com/pdf/VW_F.PDF).

Надійшла 31.05.2010