

## НОВЫЙ ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДИАЛЬНЫХ БИЕНИЙ ВАЛОВ МОЩНЫХ ТУРБО- И ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Во время работы крупных генерирующих электрических машин могут возникать различного рода механические дефекты [1,2]. Особенно это касается гидрогенератора, конструкция которого имеет много элементарных вращающихся узлов большого диаметра, сравнительно небольшой зазор между ротором и статором, и поэтому представляет собой широкое поле для проявления различного характера вибраций в широком диапазоне частот. 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. По данным [1,5] при измерении параметров биений (амплитуды и начальной фазы гармонических составляющих) можно определить более половины дефектов гидроагрегата.

Данная работа посвящена обоснованию применения и исследованию измерительной характеристики емкостного датчика радиальных биений цилиндрической поверхности валов, у которого активный электрод выполнен в виде прямоугольника.

Перспективными устройствами для измерения радиальных биений вращающихся валов различных машин являются емкостные датчики измерения расстояний до проводящих поверхностей [3,6]. 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 электрода и двух кольцевых электродов (охранного и экранирующего), 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 активного электрода  $r$  и радиуса вала  $R$ , расстояние до которого определяется. Показано, что для снижения величины погрешности, обусловленной кривизной вала, необходимо уменьшать величину радиуса активного электрода  $r$ . Но уменьшение  $r$  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 [6], при небольших радиусах возникает погрешность, обусловленная микронеровностями контролируемой поверхности. 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. Чтобы уменьшить негативное влияние вышеупомянутых факторов, можно использовать емкостный датчик расстояния, у которого активный электрод имеет форму прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$  ( $b > a$ ), при этом более длинная сторона располагается вдоль продольной оси контролируемого вала.

На рис.1 показана схема такого емкостного датчика. Датчик 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.

Схема для расчета параметров емкостного датчика расстояния с прямоугольным активным электродом показана на рис. 2. Сначала определим электрическую емкость между рабочим электродом 1 и цилиндрической поверхностью вала 2 в зависимости от размеров активного электрода  $a$  и  $b$ , радиуса  $R$  вала и расстояния  $d$  между активным электродом 1 и валом 2 (рис.2).

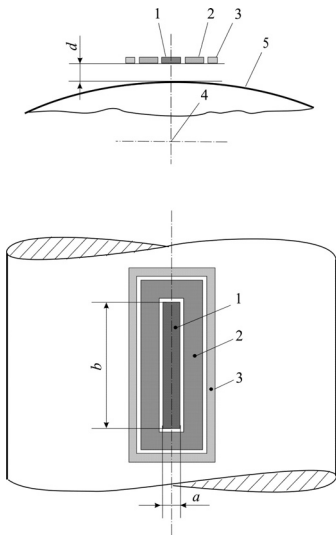


Рис.1. Схема емкостного датчика биений вала с активным электродом прямоугольной формы.

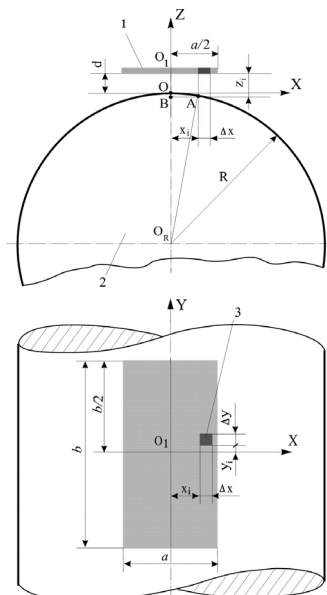


Рис.2. Расчетная схема емкостного датчика

Введем систему координат  $XYZ$  с центром  $O$  м на поверхности вала. На пластине-электроде 1 выберем элементарную площадку 3 с бесконечно малыми размерами  $\Delta x, \Delta y$ .

Используя известную формулу для расчета электрической емкости плоского конденсатора, определим емкость  $\Delta C_i$  между элементарной площадкой размером  $\Delta x \times \Delta y$  и валом 2 с учетом того, что расстояние между ними равно  $z_i$  (рис.2).

$$\Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \Delta x \Delta y \frac{1}{z_i}, \quad (1)$$

где:  $\varepsilon_0 = 8,8542 \text{ F/m}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая соотношения сторон в прямоугольных треугольниках  $OAB$  и  $BAO_R$ , определим, что  $z_i = d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}$ .

$$\text{Тогда } \Delta C_i = \varepsilon_0 \varepsilon \Delta x \cdot \Delta y / (d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}).$$

Заменив приращения дифференциалами и учитывая симметрию, определим общую емкость между активным электродом 1 и валом 2, вычислив двойной интеграл по замкнутой плоской области, ограниченной прямыми  $x_1 = 0, y_1 = 0$  и  $x_2 = a/2, y_2 = b/2$ . Вычисление двойного интеграла сведем к вычислению двукратного интеграла, который является результатом последовательного вычисления двух определенных интегралов с соответствующими пределами интегрирования.

$$\begin{aligned} C_{1X} &= \sum_{i=0}^{\infty} C_i = 4\varepsilon\varepsilon_0 \int_0^{b/2} \int_0^{a/2} \frac{dxdy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \\ &= 2\varepsilon\varepsilon_0 b \int_0^{a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 b}{\sqrt{d^2 + 2dR}} \times \\ &\times \left\{ (d + R) \operatorname{Arctg} \left( \frac{a}{2\sqrt{d^2 + 2dR}} \right) - \sqrt{d^2 + 2dR} \cdot \operatorname{Arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} \right) + \right. \\ &\left. + (d + R) \cdot \operatorname{Arctg} \left[ \frac{a(d + R)}{\sqrt{d^2 + 2dR} \cdot \sqrt{4R^2 - a^2}} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Исследования показали, что замена круглого датчика на прямоугольный такой же площади уменьшает погрешность, обусловленную кривизной вала, от 2 раз (при  $a/b = 0,5$ ) до 10 раз (при  $a/b = 0,1$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

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. – 152с.
3. Левицкий А.С. Прилади та методи контролю радіальних биттів циліндричних поверхонь валів потужних гідроенергетик // Гідроенергетика України. – 2009. - №1. – С.14 – 20.
4. Левицкий А.С, Новик А.И. Оценка погрешности измерения емкостными датчиками биений валов электрических машин // Техн. электродинамика. – 2010. – №3. – С.66 – 70.
5. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата / Белоглазов А.В., Глазырин Г.В. – В кн.: Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: НГТУ, 2008, №3(53), с.79–84.
6. 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. [http://www.vibrosystem.com/pdf/PCS\\_CMVA.PDF](http://www.vibrosystem.com/pdf/PCS_CMVA.PDF).