

**А.С.Левицкий**, канд.техн.наук, **А.И.Новик**, докт.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев)

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТНЫМИ ДАТЧИКАМИ БИЕНИЙ ВАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Проведена оценка погрешности, сопровождающей измерение биения цилиндрической поверхности валов мощных электрических машин. Получены аналитические формулы и графики для расчета погрешности при измерении биения с помощью емкостного датчика с плоским круглым электродом.*

*Проведено оцінку похибки, що виникає при вимірюванні биття циліндричної поверхні валів потужних електричних машин. Отримано аналітичні формули та графіки для розрахунку похибки при вимірюванні биття за допомогою ємнісного датчика із плоским круглим електродом.*

Для нормальной работы мощных электрических машин, в том числе и гидрогенераторов, необходимо контролировать радиальные биения цилиндрических поверхностей вала ротора, обусловленные технологическими погрешностями, возникающими как в процессе изготовления и сборки, так и в процессе эксплуатации, например, при износе подшипников [1]. Широко используемые для измерения биений в автоматическом режиме бесконтактные вихретоковые датчики наряду с преимуществами (простотой, малой стоимостью и небольшими габаритами) имеют существенные недостатки [3, 10]. Главный недостаток заключается в том, что характеристика вихретокового датчика зависит от так называемых «металлургических» свойств материала вала, которые определяются химическим составом и характером термической обработки, особенно поверхностных слоев [10]. Поэтому датчик должен тарироваться соответственно каждому конкретному материалу вала, и в паспорте на каждый датчик должна указываться марка стали, по которой произведено тарирование. Кроме того, показания вихретокового датчика будут искажаться при появлении намагниченности вала, что характерно для электрических машин большой мощности [10].

Все это заставило искать другие методы измерений, при использовании которых отсутствуют вышеперечисленные влияния. В частности, таким является емкостный метод. Канадская фирма VibroSystM для измерений биений валов крупных электромашин разработала специальный емкостный датчик типа PCS-102 [6,8], который входит в состав системы измерения вибрации VibraWatch.

На измерительную характеристику емкостных датчиков не влияют «металлургические» свойства вала или его намагниченность. К тому же, опыты, проведенные сотрудниками фирмы VibroSystM, показали, что при определенных размерах рабочего электрода датчика PCS-102 на точность измерения мало влияют (в отличие от вихретоковых датчиков) микронеровности и царапины контролируемой поверхности. Так, при диаметре рабочего электрода 15–16 мм погрешность измерения биения (двойная амплитуда) как для полированной, так и для неполированной поверхности была примерно одинаковой и составила около 0,003 мм. Погрешность определялась как разница между показаниями образцового контактного датчика микроперемещений и бесконтактного емкостного датчика типа PCS-102. В работе [10] эта погрешность названа «электрическим биением». Для емкостного датчика с плоским круглым рабочим электродом основным фактором, определяющим погрешность, является кривизна поверхности вала, с уменьшением радиуса которой она будет увеличиваться.

Данная работа посвящена расчету составляющей погрешности емкостного датчика биений, обусловленной кривизной контролируемой поверхности.

На рис. 1 показана конструктивная схема датчика, состоящего из круглого плоского рабочего электрода 1, помещенного в изолирующий корпус 2. Вокруг рабочего электрода 1 находится охранный электрод 3, окруженный, в свою очередь, заземленным электродом 4. Торцы электродов 1, 3 и 4 расположены в одной плоскости. Охранный электрод 3, имеющий такой же потенциал, как и рабочий электрод 1, но гальванически не связанный с ним, предназначен для формирования в рабочем зазоре датчика однородного электрического поля с прямыми, параллельными между собой силовыми линиями. Кроме того, охранный электрод служит для устранения паразитной емкости между рабочим

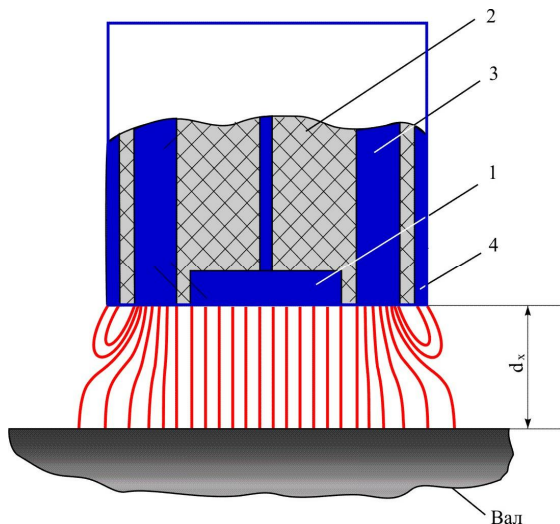


Рис. 1

ность и диапазон измерения датчика зависят от площади рабочего электрода.

Рассчитаем электрическую емкость между рабочим электродом и цилиндрической поверхностью вала. Расчетная схема представлена на рис. 2. Датчик представляет собой конденсатор, у которого одним из электродов является круглая плоская пластина 1 с радиусом  $r$ , а вторым – цилиндрическая поверхность заземленного вала 2. Изменяя расстояние  $d$  между электродом и валом и фиксируя изменения величины  $d$  за один оборот вала, определяют величину биения как разность между наибольшим и наименьшим расстояниями [3].

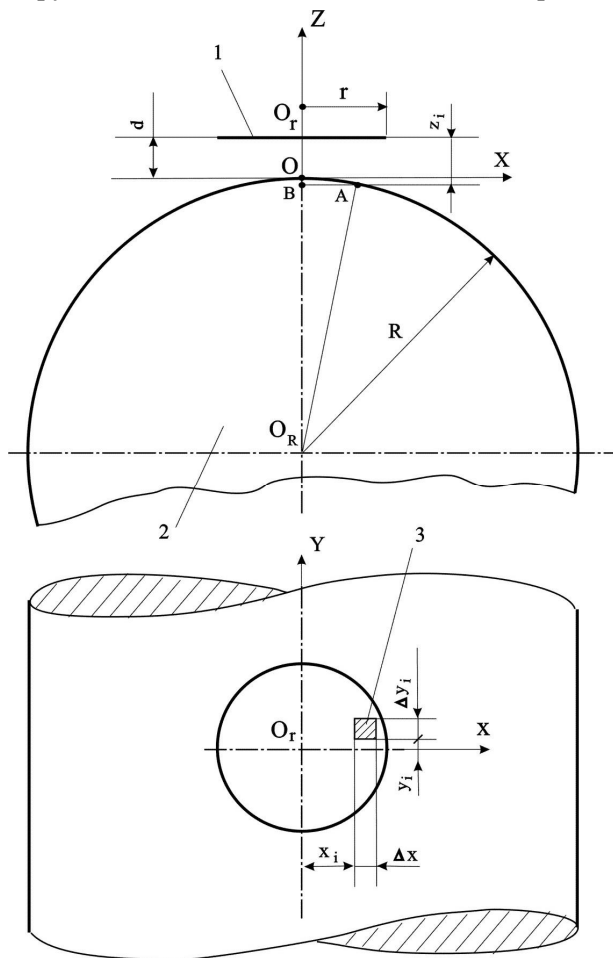


Рис. 2

электродом и землей вне зоны измерения зазора. Экранирующий электрод 4 защищает рабочий и охранный электроды от наводок. Принцип действия датчика основан на измерении электрической емкости между рабочим электродом и валом (рис. 1). Емкость  $C_x$  датчика однозначно зависит от расстояния  $d$ :

$$C_x = f(d) \quad (1)$$

и в первом приближении обратно пропорциональна этому расстоянию.

Электронный вторичный преобразователь может быть построен так, что его выходное напряжение (или ток) будет пропорционально емкостному сопротивлению датчика, т.е. не емкости  $C_x$ , а её обратной величине  $1/C_x$  [2]. При этом сигнал  $U_x$  на выходе преобразователя при отсутствии кривизны вала будет прямо пропорционален величине  $d$ . Чувствительность, точность и диапазон измерения датчика зависят от площади рабочего электрода.

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

Используя известную формулу для расчета электрической емкости плоского конденсатора [2], определим емкость между элементарной площадкой размером  $\Delta x \times \Delta y$  и электродом 1 с учетом того, что расстояние между ними равно  $z_i$  (рис. 2)

$$\Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon \Delta x \Delta y / z_i. \quad (2)$$

Учитывая отношения сторон в прямоугольных треугольниках  $OAB$  и  $BAO_R$ , определим, что

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

Тогда

$$\Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{d + R - \sqrt{R^2 - x_i^2}}. \quad (3)$$

Заменив приращения дифференциалами и учитывая симметрию, определим значение емкости

$$C_x = 4\varepsilon_0 \varepsilon \cdot \int_0^r \int_0^{\sqrt{r^2 - x^2}} \frac{dx \cdot dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = \\ = 4\varepsilon_0 \varepsilon \cdot \int_0^r \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} dx. \quad (4)$$

Для вычисления емкости по формуле (4) найдем неопределенный интеграл, используя программы MATHEMATICA 5.2 и MAPLE 9.5,

$$\int \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} dx = -(d + r) \operatorname{Arctg} \left( \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right) +$$

$$+(d + R) \cdot \sqrt{\frac{d^2 + r^2 + 2dR}{d(d + 2R)}} \cdot \operatorname{Arctg} \left[ x \sqrt{\frac{d^2 + r^2 + 2dR}{d(r^2 - x^2)(d + 2R)}} \right] -$$

$$- \left( -dR^2(d + 2R) \cdot \operatorname{EllipticE} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \frac{ix}{r}, \frac{r^2}{R^2} \right] \right) -$$

$$- (d^2 + r^2 + 2dR) \cdot \left( d(d + 2R) \cdot \operatorname{EllipticF} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \frac{ix}{r}, \frac{r^2}{R^2} \right] \right) -$$

$$- (d + R)^2 \operatorname{EllipticPi} \left[ -\frac{r^2}{d^2 + 2dR}, i \operatorname{ArcSinh} \frac{ix}{r}, \frac{r^2}{R^2} \right] \Big) / [dR(d + 2R)]. \quad (5)$$

Далее, вычислим (4) как разницу пределов выражения (5) при  $x \rightarrow (r - 0)$  и  $x \rightarrow +0$ . Учитывая при этом, что

$$\lim [x \rightarrow (r - 0)] \left\{ \operatorname{Arctg} \left[ \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right] \right\} = \operatorname{Arctg} [+\infty] = \frac{\pi}{2},$$

$$\lim [x \rightarrow (r - 0)] \left\{ \operatorname{Arctg} \left[ \frac{x \sqrt{d^2 + r^2 + 2dR}}{\sqrt{d(r^2 - x^2)(d + 2R)}} \right] \right\} = \operatorname{Arctg} [+\infty] = \frac{\pi}{2},$$

$$\lim [x \rightarrow +0] \left\{ \operatorname{Arctg} \left[ \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right] \right\} = \operatorname{Arctg} [0] = 0,$$

$$\lim [x \rightarrow +0] \left\{ \operatorname{Arctg} \left[ \frac{x \sqrt{d^2 + r^2 + 2dR}}{\sqrt{d(r^2 - x^2)(d + 2R)}} \right] \right\} = \operatorname{Arctg} [0] = 0,$$

получим

$$C_x = 4\varepsilon_0 \varepsilon \cdot \int_0^r \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} dx = 4\varepsilon_0 \varepsilon \left\{ \frac{\pi}{2} (d + R) \left( \sqrt{\frac{d^2 + r^2 + 2dR}{d(d + 2R)}} - 1 \right) - \right.$$

$$- \left( -dR^2(d + 2R) \operatorname{EllipticE} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \left( i, r^2/R^2 \right) \right] - \right.$$

$$- (d^2 + r^2 + 2dR) \left( d(d + 2R) \cdot \operatorname{EllipticF} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \left( i, r^2/R^2 \right) \right] - \right.$$

$$\left. \left. - (d + R)^2 \cdot \operatorname{EllipticPi} \left[ -\frac{r^2}{d^2 + 2dR}, i \operatorname{ArcSinh} \left( i, r^2/R^2 \right) \right] \right) \right\} / (dR(d + 2R)) +$$

$$+ \left( -dR^2(d + 2R) \cdot \operatorname{EllipticE} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \left( 0, r^2/R^2 \right) \right] - \right.$$

$$\left. - (d^2 + r^2 + 2dR) \left( d(d + 2R) \cdot \operatorname{EllipticF} \left[ i \operatorname{ArcSinh} \left( 0, r^2/R^2 \right) \right] - \right. \right.$$

$$-(d+R)^2 \cdot \text{EllipticPi} \left[ -\frac{r^2}{d^2+2dR}, i \text{ArcSinh}(0, r^2/R^2) \right] \Big/ (dR(d+2R)) \Big\}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\text{ArcSinh}$  – аресинус (обратный гиперболический синус) соответствующего аргумента;  $\text{EllipticF}$  – эллиптический интеграл первого рода;  $\text{EllipticE}$  – эллиптический интеграл второго рода;  $\text{EllipticPi}$  – эллиптический интеграл третьего рода;  $r$  – радиус круглого активного электрода емкостного датчика;  $R$  – радиус вала.

На рис. 3 показан график зависимости электрической емкости  $C_x$  от расстояния  $d$  между плоскостью емкостного датчика радиусом  $r=8$  мм и цилиндрической поверхностью вала радиусом  $R=350$  мм.

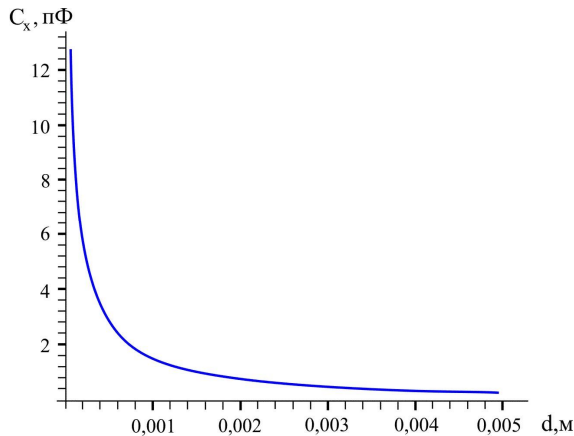


Рис. 3

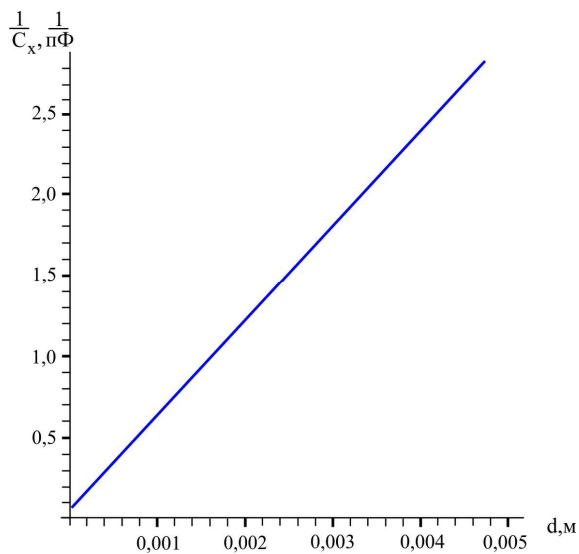


Рис. 4

Как было сказано выше, для получения прямого отсчета величины расстояния вторичный преобразователь строится так, что его выходное напряжение прямо пропорционально емкостному сопротивлению датчика, то есть обратной величине емкости  $1/C_x$ .

Рис. 4 отображает зависимость  $1/C_x = f(d)$ , полученную с использованием формулы (6). Как видно, эта зависимость достаточно близка к линейной. На практике емкостный измеритель расстояния до заземленной поверхности настраивается по идеальной плоскости, имеющей размеры больше диаметра наружного экранирующего электрода. Определим, какая погрешность будет возникать при этом. Для этого сравним результаты определения расстояния до поверхности вала по формуле (6) с результатами, полученными с использованием формулы плоскопараллельного конденсатора [2]

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \pi r^2 / d. \quad (7)$$

Естественно, подразумевается, что измерения производятся одним и тем же датчиком с круглым рабочим электродом радиусом  $r$ .

Относительная разница  $\delta_d$  в определении расстояния в процентах составит

$$\delta_d = \frac{1/C_x - 1/C_0}{1/C_0} \cdot 100\% = \left( \frac{C_0}{C_x} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (8)$$

График зависимости  $\delta_d = f(d)$  (при  $r=8$  мм,  $R=350$  мм) показан на рис. 5. Видно, что при малых значениях  $d$  (меньше 1 мм) погрешность, обусловленная кривизной контролируемой цилиндрической поверхности, резко возрастает.

Полученные результаты нуждаются в некоторых комментариях.

1. Поскольку рассматриваемой задачей является измерение не собственно зазора между валом и датчиком, а биения, т.е. разности максимального и минимального расстояний от поверхности вала до плоскости датчика, конечным результатом измерения является разность двух значений зазора  $d$ . При этом в связи с тем, что рассмотренная в статье погрешность является систематической и всегда имеет один и тот же знак, при вычитании происходит некоторая компенсация, и результирующая погрешность оказывается меньше, чем погрешность одиночного измерения зазора  $d$ .

2. По той же причине, что указана в п. 1, начальное положение датчика (расстояние его от поверхности вала) может быть выбрано достаточно произвольно, лишь бы при максимально возможной амплитуде биений не произошло соприкосновение вала с датчиком. Очевидно (рис. 5), что чем больше выбрано начальное значение зазора  $d_{\text{нач}}$ , тем меньшей будет рассмотренная погрешность.

3. Выбирая начальное значение зазора, необходимо также иметь в виду, что с увеличением этого параметра уменьшается рабочая емкость датчика. При этом большее влияние начинает приобретать другая составляющая погрешности, вызванная действием паразитной емкости. Эта емкость, обусловленная неидеальным экранированием датчика и подводящего провода, шунтирует рабочую емкость датчика и искажает обратно пропорциональную зависимость (7). Анализ данной составляющей погрешности сделан в [4]. Кроме того, при большом удалении датчика от поверхности вала начинают сказываться краевые эффекты, что также приводит к увеличению погрешности.

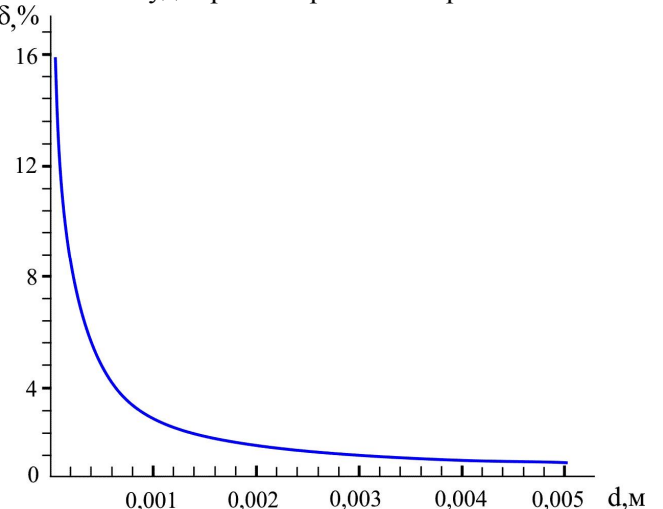


Рис. 5

Таким образом, к выбору начального зазора датчика необходимо подходить внимательно, находя в каждом конкретном случае компромисс между отмеченными противоречивыми факторами.

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 1998. – 144 с.
2. Гриневич Ф.Б., Новик А.И. Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. – Киев: Наук. думка, 1987. – 112 с.
3. Левицький А.С. Прилади та методи контролю радіальних биттів циліндричних поверхонь валів потужних гідроенергетиків // Гідроенергетика України. – 2009. – №1. – С. 14–20.
4. Новік А.І., Левицький А.С., Воциньський К.В. Джерела похибок ємнісного вимірювача зазору в гідроенергетиках // Гідроенергетика України. – 2009. – № 3. – С. 58–60.
5. Capacitive Sensor Products. <http://www.lionprecision.com./capacitive-sensors/cap-products.html>.
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. – Pp. 1–5. [www.vibrosystem.com/pdf/PCS\\_CMVA.PDF](http://www.vibrosystem.com/pdf/PCS_CMVA.PDF).
7. PISeca™ Single-Electrode Capacitive Sensor for Sub-Nanometer Precision Measurement. <http://www.pi.ws>.
8. PCS-102 Sonde de proximité capacitive. [http://www.vibrosystem.com/pdf/VW\\_F.PDF](http://www.vibrosystem.com/pdf/VW_F.PDF).
9. Sensor for Displacement, Distance and Position. <http://www.micro-epsilon.com/products/displacement-position-sensors>.
10. Yuqing Lai. Current Displacement Sensor with LTCC Technology /Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Lydwigs Universität Freiburg im Breisgau. – 2005. – 110 p.

Надійшла 05.02.10