

УМЕНЬШЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА БИЕНИЙ ВАЛА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ АКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДА

А.С.Левицкий¹, канд.техн.наук, **А.И.Новик²**, докт.техн.наук
^{1,2} – Институт электродинамики НАН Украины,
Пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Предложен емкостный датчик радиальных биений вала крупных электрических машин, у которого активный электрод выполнен в виде неравностороннего прямоугольника. При измерении более короткая сторона прямоугольника располагается перпендикулярно продольной оси вала. Проведен расчет функции преобразования датчика. Выполнен анализ погрешности, обусловленной кривизной контролируемой цилиндрической поверхности. Показано, что погрешность зависит только от размера стороны активного электрода, перпендикулярной продольной оси вала. Проведено сравнение погрешности с погрешностью емкостного датчика биений с активным электродом круглой формы и имеющего такую же площадь. Показано, что погрешность датчика с прямоугольным электродом в несколько раз меньше. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: гидрогенераторы, валы, радиальное биение, емкостные датчики, погрешность измерения.

Важной частью систем мониторинга и диагностики электрических машин являются измерители параметров дефектов, в которых в качестве воспринимающих элементов используются датчики различных типов.

Одним из механических процессов, измерение параметров которого в процессе работы машины позволяет определить значительное количество дефектов, является биение вала машины. По данным [1,2] измерение амплитуды и начальной фазы гармонических составляющих биений позволяет определить до 50–60% дефектов гидроагрегата.

Перспективными устройствами для измерения радиальных биений вращающихся валов различных машин являются емкостные датчики расстояний до проводящих поверхностей [3,4,6]. Их основное преимущество перед широко применяемыми в настоящее время для этих целей вихретоковыми датчиками – независимость измерительной характеристики от «металлургических» свойств материала вала и его химического состава. 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 между активным электродом и проводящей поверхностью, в данном случае валом. Емкость C_{1x} функционально зависит от расстояния d между активным электродом и валом $C_{1x} = f(d)$, причем емкостное сопротивление в первом приближении пропорционально этому расстоянию. Разность между наибольшим и наименьшим расстоянием за один оборот вала определяет величину биения.

В принципе, форма плоского активного электрода датчика может быть любой. По технологическим соображениям (для облегчения изготовления) электрод делают обычно круглым, радиусом r . При этом получается электрический конденсатор, у которого одна обкладка (электрод) плоская круглая, вторая представляет собой цилиндрическую поверхность вала. Очевидно, что применение к такой конструкции формулы плоско-параллельного конденсатора дает не совсем верный результат при определении емкости (либо ее обратной величины, пропорциональной емкостному сопротивлению). В [4] проведен анализ погрешности, возникающей за счет отклонения поверхности вала от плоскости, т.е. из-за кривизны поверхности одного из электродов. Понятно, что кривизна эта будет сказываться тем меньше, чем больше радиус R контролируемого вала по отношению к радиусу r активного электрода датчика (при бесконечно большом R получаем плоско-параллельный конденсатор). Поскольку радиус вала R задан конструкцией объекта контроля и не может быть произвольно изменен, то простейшей рекомендацией для снижения погрешности является уменьшение радиуса r электрода. Однако уменьшение площади электрода и, соответственно, рабочей емкости датчика ухудшает чувствительность устройства, приводит к возрастанию влияния микронеровностей поверхности вала, а также к увеличению влия-

ния составляющей погрешности, вызванной действием паразитной емкости. Данная емкость обусловлена неидеальным экранированием датчика и его подводящего провода, она шунтирует рабочую емкость и искажает обратно пропорциональную зависимость измеренной емкости от расстояния между электродами. Анализ этой составляющей погрешности выполнен в [5].

Очевидно, что для уменьшения влияния кривизны поверхности вала не обязательно уменьшать все размеры активного электрода. Для этого достаточно уменьшить лишь его поперечный размер (в направлении, перпендикулярном оси вала). Если при этом пропорционально увеличить продольный размер, то, не изменяя площадь активного электрода и связанных с ней упомянутых факторов, можно снизить погрешность от кривизны вала. Следовательно, используя вместо круглого электрода равный ему по площади вытянутый вдоль оси вала электрод другой формы (например, прямоугольный), можно при прочих равных условиях улучшить метрологические характеристики емкостного датчика биений вала.

В настоящей статье выполнен анализ погрешности датчика биений с прямоугольным активным электродом при различном соотношении сторон и сделано сравнение с погрешностями емкостного датчика, имеющего круглый электрод такой же площади.

Схема для расчета параметров емкостного датчика расстояния с прямоугольным активным электродом показана на рис. 1. Определим электрическую емкость между рабочим электродом 1 и

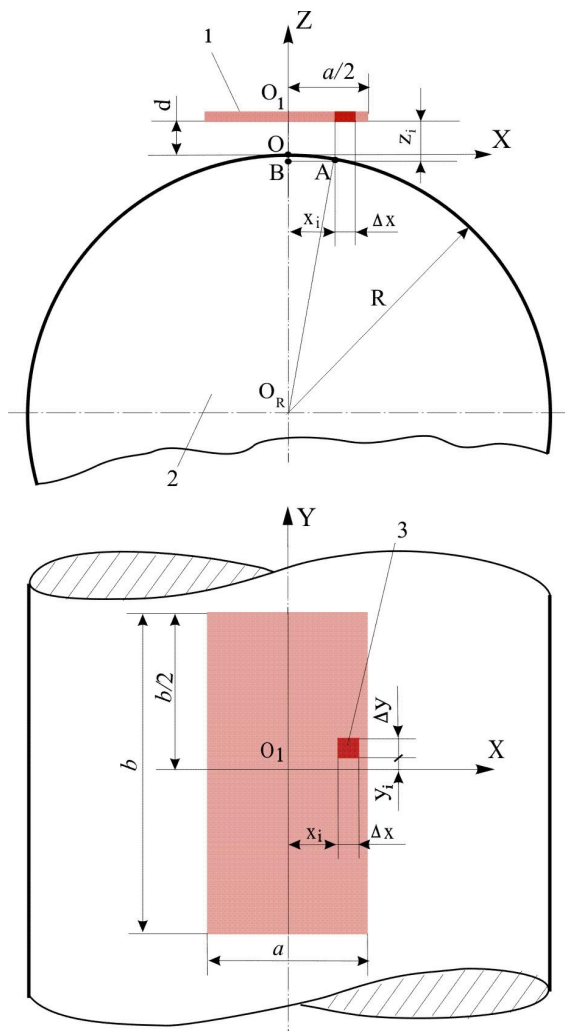


Рис. 1

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. 1).

Введем систему координат XYZ с центром O , расположенным на поверхности вала. На пластине-электроре 1 выберем элементарную площадку 3 с бесконечно малыми размерами Δx и Δy .

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

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

где: $\varepsilon_0 = 8,8542 \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость (как правило, это воздух).

Учитывая соотношения сторон в прямоугольных треугольниках OAB и BAO_R , определим, что

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

Тогда

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

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

$$C_{1X} = 4\varepsilon\varepsilon_0 \int_0^{b/2} \int_0^{a/2} \frac{dx dy}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} = 2\varepsilon\varepsilon_0 b \int_0^{a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} =$$

$$= \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 b}{\sqrt{d^2 + 2dR}} \left\{ (d + R) \operatorname{Arctg} \left(\frac{a}{2\sqrt{d^2 + 2dR}} \right) - \sqrt{d^2 + 2dR} \cdot \operatorname{Arctg} \left(\frac{a}{\sqrt{4R^2 - a^2}} \right) + (d + R) \cdot \operatorname{Arctg} \left[\frac{a(d + R)}{\sqrt{d^2 + 2dR} \cdot \sqrt{4R^2 - a^2}} \right] \right\}. \quad (4)$$

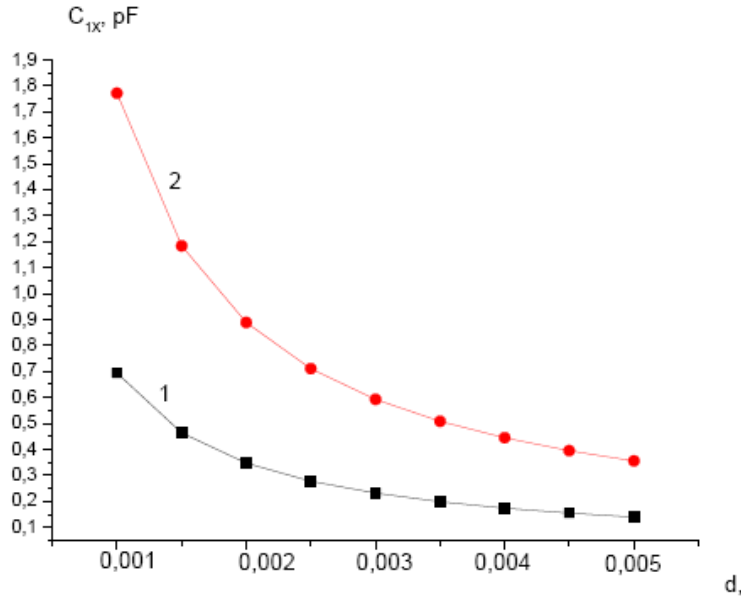


Рис. 2

да датчика. Емкость при этом определя-ется известной формулой

$$C_{10} = \varepsilon_0 \varepsilon ab / d. \quad (5)$$

Относительная разница δ_1 в определении расстояния d с использованием формул (4) и (5) в процентах составит

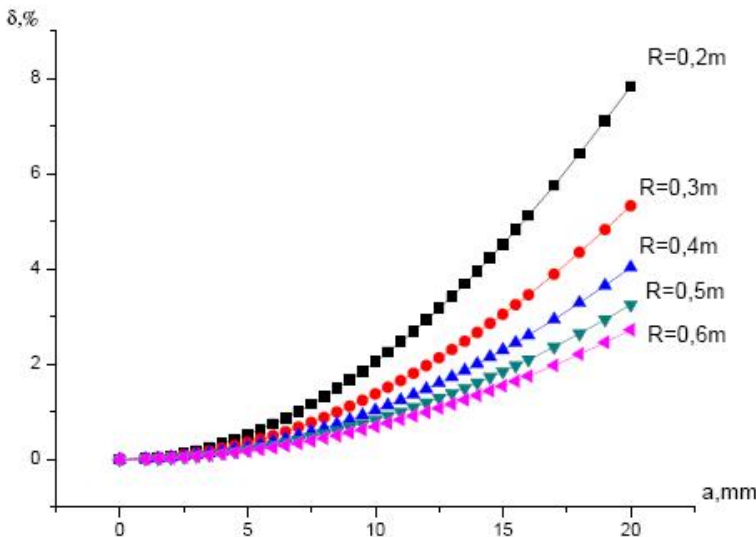


Рис. 3

активным электродом в виде круга радиусом r , то есть $a \times b = \pi r^2$. Введем коэффициент $B = a / 2r$, отражающий относительное уменьшение поперечной стороны a в сравнении с диаметром круглого электрода. Тогда размеры прямоугольного электрода можно записать в виде $a = 2rB$, $b = \pi r / 2B$. С учетом этого формула (6) преобразуется к виду

$$\delta_1 = \frac{a - 2d \int_0^{a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}}{2d \int_0^{a/2} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Если диапазон измеряемых расстояний будет равен $\Delta d = d_{MAX} - d_{MIN}$, то максимальное значение погрешности δ_{MAX} будет тогда, когда $d = d_{MIN}$. Выбрав $d_{MIN} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, построим график зависимости $\delta = f(a)$ (рис. 3) для ряда дискретных значений R .

Оценку погрешности датчика с активным прямоугольным электродом, имеющим размеры $a \times b$, нагляднее всего произвести в сравнении с погрешностью равного ему по площади датчика, с

Для примера на рис. 2 показаны графики зависимости электрической емкости C_{1X} от расстояния d до поверхности вала радиусом $R=0,35$ м для датчиков с размерами активного электрода $4 \cdot 10^{-3}$ м \times $19,6 \cdot 10^{-3}$ м (график 1) и $6,4 \cdot 10^{-3}$ м \times $31,4 \cdot 10^{-3}$ м (график 2).

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 $1/C_{1X}$. В идеальном случае поверхность, до которой измеряется расстояние, плоская и имеет размеры, значительно превышающие размеры наружного экранирующего электро-

$$\delta_1 = \left(Br - d \int_0^{Br} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} \right) \left(d \int_0^{Br} \frac{dx}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} \right)^{-1} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Выражение для обусловленной кривизной вала погрешности δ_2 датчика с круглым электродом радиусом r позаимствуем из работы [4]:

$$\delta_2 = (C_{20} - C_{2X}) C_{2X}^{-1} \cdot 100\% = \left(\pi r^2 - 4d \int_0^r \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} dx \right) \left(4d \int_0^r \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{d + R - \sqrt{R^2 - x^2}} dx \right)^{-1} \cdot 100\% . \quad (8)$$

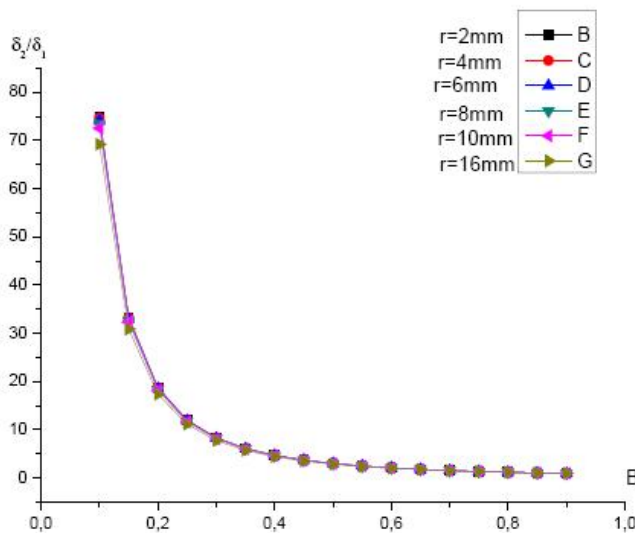


Рис. 4

Используя выражения (7) и (8), определим соотношение между погрешностями δ_2 и δ_1 . График функции $\delta_2/\delta_1 = f(B, r)$ при $d_{MIN} = 1 \cdot 10^{-3}$ м показан на рис. 4, из которого видно, что отношение величин погрешностей δ_2/δ_1 зависит только от относительного сужения B и не зависит от радиуса r . При изменении B от 0,2 до 0,6 отношение δ_2/δ_1 изменяется от 18 до 2.

Следует учитывать, что слишком суживать активный электрод нельзя, так как при сохранении равной чувствительности, а значит, и равной площади, увеличиваются габариты и повышается влияние технологических погрешностей установки датчика, таких как перекося и эксцентриситет. Наиболее рационально использовать электроды емкостного датчика с относительным сужением $B = 0,3-0,5$.

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. — М.: Научно-учебный центр ЭНАС, 2001. — 152 с.

Alekseev B.A. Definition of condition (diagnostics) of power hydrogenerators. — Moskva: Nauchno-uchebnyj tsentr ENAS, 2001. — 152 p. (Rus.)

2. Белоглазов А.В., Глазырин Г.В. Разработка средств мониторинга биений вала гидроагрегата / Сборник научных трудов НГТУ. — Новосибирск: НГТУ, 2008. — №3(53). — С. 79–84.

Beloglazov A.V., Glazyrin G.V. Creation of apparatus for monitoring of run-out shaft in hydroaggregate / Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. — 2008. — №3(53). — P. 79–84. (Rus.)

3. Левицкий А.С. Прилади та методи контролю радіальних біттів циліндричних поверхонь валів потужних гідроенергетик // Гідроенергетика України. — 2009. — №1. — С. 14–20

Levytskyi A.S. Apparatus and methods for control of radial run-out of cylindrical surface shafts of power hydrogenerators // Hidroenergetika Ukrainy. — 2009. — №1. — P. 14–20. (Ukr.)

4. Левицкий А.С., Новик А.И. Оценка погрешности измерения емкостными датчиками биений валов электрических машин // Техн. электродинамика. — 2010. — №4. — С. 66–70.

Levytskii A.S., Novik A.I. Estimation of error measurement by capacitive sensors of run-out shafts of electrical machines // Tekhnichna elektrodynamika. — 2010. — №4. — P. 66–70. (Rus.)

5. Новик А.И., Левицкий А.С., Вошинский К.В. Джерела похибок ємнісного вимірювача зазору в гідроенергетиках // Гідроенергетика України. — 2009. — № 3. — С. 58–60.

Novik A.I., Levytskyi A.S., Voshchynskyi K.V. Sources of errors of capacitive measuring instrument of gap in hydrogenerators // Hidroenergetika Ukrainy. — 2009. — №3. — P. 58–60. (Ukr.)

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. www.vibrosystem.com/pdf/PCS_CMVA.PDF.

УДК 681.586.772

А.С.Левицький¹, канд.техн.наук, **А.І.Новік²**, докт.техн.наук
^{1,2} – Інститут електродинаміки НАН України,
Пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Зменшення систематичної похибки ємнісного датчика биття вала за рахунок зміни форми активного електрода

Запропоновано ємнісний сенсор радіального биття вала потужних електричних машин, який має активний електрод у вигляді прямокутника з нерівними сторонами. Під час вимірювання сторона прямокутника, яка має меншу довжину, розміщується перпендикулярно поздовжній осі вала. Проведено розрахунок функції перетворення сенсора. Зроблено аналіз похибки, яка зумовлена кривизною контрольованої циліндричної поверхні. Показано, що похибка залежить тільки від розміру сторони активного електрода, перпендикулярної поздовжній осі вала. Проведено порівняння похибки з похибкою ємнісного сенсора биття, який має активний електрод круглої форми і таку ж саму площу. Показано, що похибка сенсора з прямокутним електродом в декілька разів менша. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: гідрогенератори, вали, радіальне биття, ємнісні давачі, похибка вимірювання.

A.S.Levytskyi¹, A.I.Novik²
^{1,2} – Institute of Electrodynamics National Academy Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Systematic error reduction of capacitive sensor of shaft beats due to deformation of active electrode

Capacitive sensor of radial shaft beats of huge electric machines which has an active scalene rectangle electrode has been suggested. While measuring a shorter side of rectangle arranges perpendicular to longitudinal axis of shaft. The calculation of sensor transfer function has been carried out. Analysis of the error caused by curvature of target cylindrical surface has been performed. Also, it has been shown that the error depends only on the side dimension of active electrode which is perpendicular to longitudinal axis of shaft. Comparison of the error with the capacitive sensor error of shaft beats with an active rounded electrode having the same area has been made. Also, it has been shown that the error of sensor with rectangular electrode is several times smaller. References 6, figures 4.

Key words: hydrogenerators, shafts, radial run-out, capacitive sensors, error measurement

Надійшла 07.06.2010
Received 07.06.2010