

НЕКОТОРЫЕ ДЕФЕКТЫ КАПСУЛЬНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Запропоновано методики розрахунку параметрів ексцентриситету та перекосу ротора, еліпсності розточення статора в капсульних гідрогенераторах за вимірними величинами повітряного зазора між ротором та статором.

Контроль состояния гидрогенераторов (ГГ) во время работы и при периодических обследованиях входит в состав профилактических мероприятий по поддержанию работоспособности машины. Выявление возникающих в работе дефектов, их обнаружение на ранней стадии развития, а также своевременное применение правильных решений по ликвидации дефектов до возникновения аварийной ситуации обеспечивают высокий коэффициент готовности, сокращение времени простоя, снижение затрат на ремонты, продление срока службы оборудования [3, 6, 7].

Контроль ГГ имеет свою специфику, вызванную рядом существенных особенностей как в конструкции, так и в режимах эксплуатации этих крупных вертикальных и горизонтальных (капсульных) синхронных машин. Соответственно отличаются и многие приемы контроля состояния, аппаратура и системы контроля гидрогенераторов от принятых на тепловых электростанциях. Разработка новых систем контроля и диагностики, разнообразие методов и средств, предназначенных для этих целей, требуют анализа и сравнения их эффективности, облегчения выбора наиболее целесообразного комплекса контрольно-диагностических мероприятий при эксплуатации машин [1].

Поэтому контролю и диагностике основного оборудования энергосистем, в том числе оценке работоспособности ГГ, в последние годы уделяется особенно большое внимание [1].

Воздушный зазор между ротором и статором является одним из важнейших параметров гидрогенератора. Величина воздушного зазора в значительной мере определяет характеристики генератора и его поведение в процессе эксплуатации. К определению параметра воздушного зазора между статором и ротором гидрогенератора относят: максимальный и минимальный воздушные зазоры (между зубцом статора и средней линией по длине полюса), средний и расчетный воздушные зазоры. Величины воздушных зазоров у гидрогенераторов вертикального исполнения – 20...30 мм, а у капсульных – 5...8 мм. Эта величина определяет индуктивные параметры и перегруженность синхронных генераторов, мощность системы возбуждения, а также величины потерь, выделяемых в роторе. Величина воздушного зазора также существенно влияет и на ряд других характеристик генераторов: на величину торцевых магнитных потоков и вызываемых ими потерь в крайних пакетах сердечников и нажимных плитах статора, на вибрационное состояние машины при эксплуатации. Таким образом, и тепловое состояние гидрогенератора в целом, и уровень местных нагревов в значительной мере определяются величиной воздушного зазора. Кроме того, области допустимых режимов работы генераторов (по условиям стойкости при недовозбуждении) определяются также величиной воздушного зазора [1,7].

При эксплуатации гидрогенераторов со временем возникает неравномерность воздушного зазора между ротором и статором. Наличие неравномерности становится причиной повышения вибрации узлов гидрогенераторов, изменения и колебания его индуктивных сопротивлений, появления дополнительных потерь и нагревов [1, 7].

Искажения формы ротора и статора, которые приводят к изменениям равномерности воздушного зазора, являются очень серьезными дефектами. Они могут привести к авариям с задеванием ротора за статор, разрушением обмоток, стали статора и полюсов [1, 3, 7].

В работе [6] выделены три основных конструкционных дефекта, которые приводят к искажению формы воздушного зазора между статором и ротором в гидрогенераторах.

1. *Нецилиндрическая форма конструкции ротора.* Из-за технологических погрешностей при изготовлении и сборке ротора отдельные его полюса могут отличаться по высоте, что ведет к отличию величины зазора под разными полюсами. Явнополюсность конструкции ротора также обуславливает неравномерность зазора.

2. *Нецилиндрическая форма поверхности статора.* Обеспечение цилиндрической формы поверхности расточки при сборке статора и ее поддержка в случае длительной эксплуатации гидрогенератора являются сложной технической задачей из-за значительных размеров гидрогенераторов. Кроме этого, на статор действуют интенсивные вибро-механические нагрузки, что ведет к ослаблению механической устойчивости его конструкции. В капсульных гидрогенераторах статор деформируется из-за разности температур внутри капсулы и снаружи.

3. *Эксцентриситет ротора.* Под эксцентриситетом ротора понимается сдвиг оси вращения ротора относительно геометрической оси статора. Различают: а) радиальный эксцентриситет, при котором оси ротора и статора остаются параллельными, но имеют радиальный сдвиг; б) угловой эксцентриситет, при котором оси ротора и статора наклонены одна к другой на некоторый угол, причем в центре машины оси не имеют радиального сдвига; в) смешанный эксцентриситет гидрогенераторов, при котором существуют как радиальный, так и угловой эксцентриситеты.

Настоящая работа посвящена разработке методик определения некоторых дефектов системы ротор-статор в капсульном гидрогенераторе типа СГК 538/160 – 70М с использованием измеренных величин воздушного зазора.

Современные системы автоматического измерения величины зазора между ротором и статором, использующие различные методы измерений, могут иметь датчики, расположенные: А) только на статоре; Б) только на роторе; В) как на статоре, так и на роторе.

Примером системы В может служить высокоточная оптоэлектронная система, разработанная в канадской энергокомпании British Columbia Hydro и впервые примененная на гидрогенераторах ГЭС Guri (Венесуэла) [1].

По типу Б организованы волоконно-оптическая отражающая система с прерыванием луча [14] и лазерная триангуляционная система измерения формы статора [2].

Датчики только на статоре (тип А), по имеющимся у авторов данным, имеют два типа систем: а) ультразвуковая, описанная в патентах [15, 16]; б) емкостная, теории и практике которой посвящены много работ, и основными являются работы [1, 9–14].

Наиболее распространенной и широко применяемой является система с емкостными датчиками. Одна из самых известных фирм VibrosystM (Канада) поставляет систему типа AGMS (Air Gap Monitoring System) с такими датчиками для контроля воздушного зазора во время работы машины и при испытаниях. Эксплуатируются сотни систем контроля состояния гидроагрегата, поставляемых этой компанией, в том числе в энергокомпаниях Electricite de France (Франция), Hydro-Quebec и Ontario Hydro (Канада), в крупных энергокомпаниях США, у основных фирм-производителей агрегатов [1, 9–11].

Достаточная информативность контроля с помощью этой системы, особенно для контроля формы расточки статора, достигается благодаря большому числу датчиков. Так, при использовании системы AGMS для определения состояния воздушного зазора гидрогенератора с ротором диаметром до 7,5 м рекомендуется применять четыре датчика: от 7,5 до 12 м – восемь датчиков; свыше 12 м – двенадцать или шестнадцать датчиков [10, 13]. Кроме этого, учитывается длина статора. При длине статора до 1,8 м датчики устанавливаются в одной плоскости с одной стороны статора, при большей длине – с двух сторон, в двух параллельных плоскостях, перпендикулярных оси ротора [10].

Коллективом авторов, представляющих Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, ОАО «Укрэнерго» и Государственное предприятие «Электротяжмаш», предложен новый емкостный способ измерения зазора, с использованием которого увеличивается чувствительность и повышается точность измерения [8].

На рис. 1 представлена схема капсульного гидрогенератора типа СГК 538/160-70М, у которого для контроля зазора может быть установлено восемь датчиков 1 емкостного типа

(по четыре с каждой стороны) в плоскостях, перпендикулярных оси ротора. Определим, как с помощью такой системы датчиков можно рассчитать параметры появившихся в силу каких-то причин (например, при износе подшипников) радиального эксцентриситета, эллипсоидности расточки статора и углового эксцентриситета (перекоса ротора).

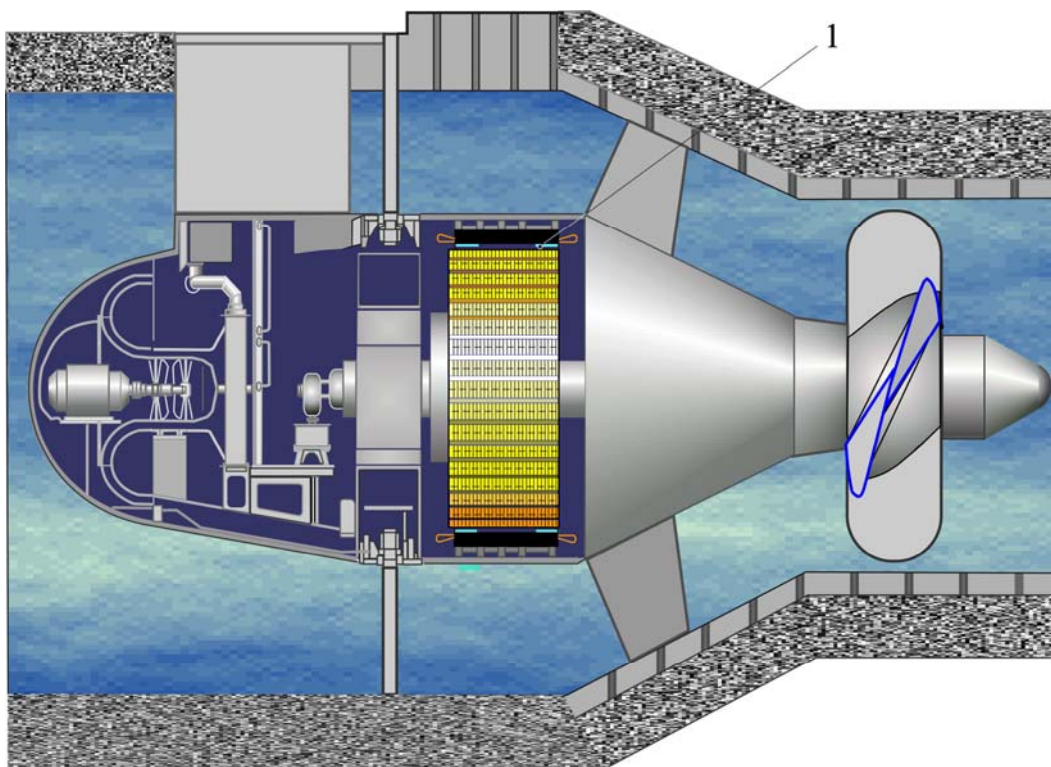


Рис. 1

Для составления моделей и расчета параметров дефектов примем следующие допущения и условия:

1. Все дефекты, кроме рассматриваемого, отсутствуют.
2. Все полюса ротора идентичны и равномерно расположены по окружности.
3. Огибающая полюсов ротора является идеальной окружностью, а ее центр совпадает с центром вращения ротора.
4. Расточка статора до появления эллипсности является идеальной окружностью, а после – правильным эллипсом.
5. Измерение величины зазора производится всеми датчиками одновременно в момент прохождения под датчиком средней линии соответствующего полюса ротора.

Радиальный эксцентриситет. На рис. 2 показана схема размещения взаимного ротора и статора гидрогенератора, в котором имеется радиальный сдвиг оси ротора, т.е. радиальный эксцентриситет. Он может возникнуть при сборке или в процессе эксплуатации, например, когда изнашиваются подшипники.

В начальный момент, до появления эксцентриситета, центры ротора и статора совпадали с центром вращения и находились в точке O . Огибающая полюсов ротора в этом случае на рис. 2 изображена пунктиром, а окружность расточки – сплошной линией. Пусть в силу каких-то причин центр ротора сдвинулся в точку O' на величину e (появился эксцентриситет) в направлении, обозначенном углом φ . Огибающая полюсов ротора займет положение $1'$. Рассчитаем величину эксцентриситета e и его направление по изменениям показаний четырех датчиков зазора, расположенных на статоре в точках A_1, A_2, A_3 и A_4 с угловым расстоянием в 90° друг от друга. В начальном положении (до появления деформации) зазоры

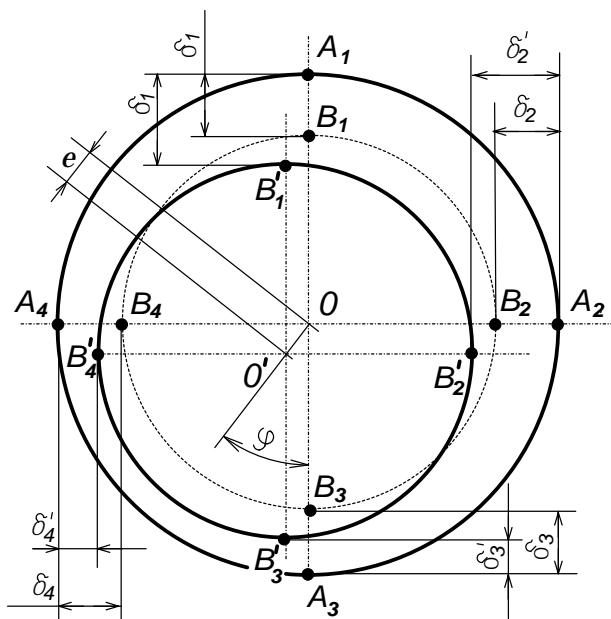


Рис. 2

в генераторе измеряются между этими точками и точками B_1, B_2, B_3 и B_4 полюсов ротора. После появления эксцентриситета – между точками A_1, A_2, A_3, A_4 и точками B'_1, B'_2, B'_3 и B'_4 . До появления эксцентриситета величины зазоров в этих точках были соответственно $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ и δ_4 , а после – $\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3$ и δ'_4 .

Из рис. 2 следует, что

$$\begin{aligned} \delta'_1 &= \delta_1 + e \cos \varphi; & \delta'_2 &= \delta_2 + e \sin \varphi; \\ \delta'_3 &= \delta_3 - e \cos \varphi; & \delta'_4 &= \delta_4 - e \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

Откуда параметры радиального эксцентриситета определяются как

$$\varphi = \arctg \left[\frac{(\delta'_2 - \delta_2)}{(\delta'_1 - \delta_1)} \right]; \quad (2)$$

$$e = \left(\delta'_2 - \delta_2 \right) / \cos \left\{ \arctg \left[\frac{(\delta'_2 - \delta_2)}{(\delta'_1 - \delta_1)} \right] \right\}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) видно, что для определения параметров эксцентриситета достаточно данных о величине начального и измененного зазора, полученных от двух соседних датчиков (т.е. на расстоянии 90°). Избыточное количество датчиков может быть использовано для проверки расчетов, а также для более сложного расчета – определения эллипсности статора.

Эллипсность расточки статора. На рис. 3 представлена схема гидрогенератора, у которого имеется искажение формы расточки статора в виде эллипсности.

Огибающая полюсов ротора изображена окружностью 1. Штриховая окружность 2

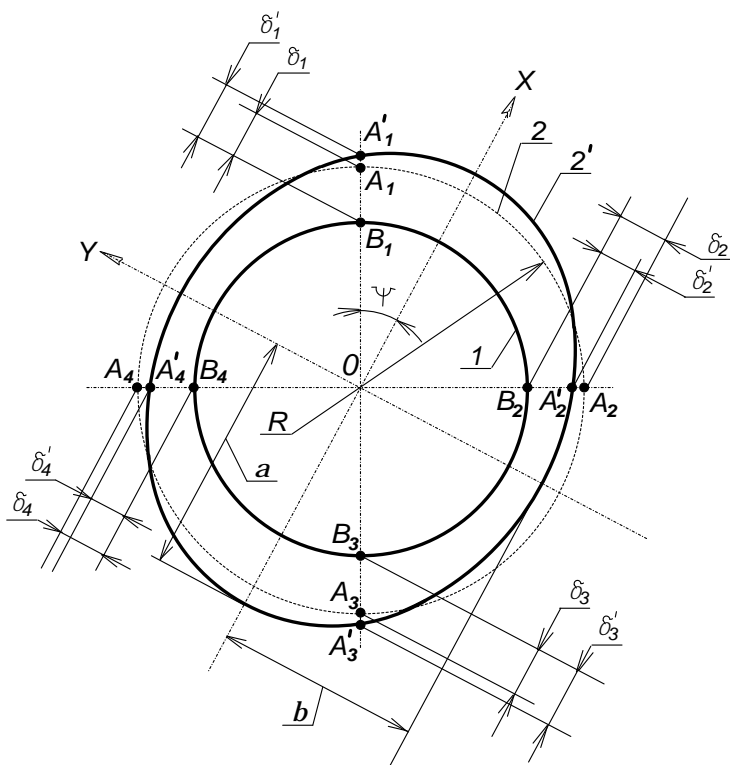


Рис. 3

радиусом R – это форма расточки статора до деформации, а кривая $2'$ – после. Как в предыдущем расчете, датчики зазора расположены на зубцах статора в точках A_1, A_2, A_3 и A_4 на расстоянии в 90° друг от друга. В начальном положении (до появления деформации) зазоры в генераторе измеряются между этими точками и точками B_1, B_2, B_3 и B_4 полюсов ротора. После появления эллипсности датчики переместятся в точки A'_1, A'_2, A'_3 и A'_4 . Измеренные до и после деформации расточки зазоры будут равны $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ и $\delta'_1, \delta'_2, \delta'_3, \delta'_4$ соответственно. Используя данные о величине зазоров, рассчитаем геометрические параметры эллипса расточки, считая его правильным,

т.е. описываемым каноническим уравнением кривой второго порядка. Пусть большая полуось эллипса имеет величину a , а малая – b . При этом величина угла между большой полуосью и вертикальной осью симметрии составит ψ . Введем новую систему координат XOY , у которой ось OX совпадает с большой полуосью эллипса. Точки A_1', A_2', A_3' и A_4' принадлежат эллипсу и, следовательно, их координаты удовлетворяют его каноническому уравнению

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1. \quad (4)$$

Координаты $x_i, y_i (i=1...4)$ точек A_i' с учетом $\delta_i, \delta_i', \psi$ и R будут равны:

$$\begin{aligned} \text{точка } A_1' & - \left[R + (\delta_1' - \delta_1) \right] \cos \psi; & \left[R + (\delta_1' - \delta_1) \right] \sin \psi; \\ \text{точка } A_2' & - \left[R - (\delta_2 - \delta_2') \right] \sin \psi; & - \left[R - (\delta_2 - \delta_2') \right] \cos \psi; \\ \text{точка } A_3' & - - \left[R + (\delta_3' - \delta_3) \right] \cos \psi; & - \left[R + (\delta_3' - \delta_3) \right] \sin \psi; \\ \text{точка } A_4' & - - \left[R - (\delta_4 - \delta_4') \right] \sin \psi; & \left[R - (\delta_4 - \delta_4') \right] \cos \psi. \end{aligned}$$

Так как координаты каждой точки удовлетворяют уравнению (4), то можно составить следующие четыре уравнения:

$$\frac{\left[R + (\delta_1' - \delta_1) \right]^2 \cos^2 \psi}{a^2} + \frac{\left[R + (\delta_1' - \delta_1) \right]^2 \sin^2 \psi}{b^2} = 1; \quad (5)$$

$$\frac{\left[R - (\delta_2' - \delta_2) \right]^2 \sin^2 \psi}{a^2} + \frac{\left\{ - \left[R + (\delta_2' - \delta_2) \right]^2 \cos^2 \psi \right\}}{b^2} = 1; \quad (6)$$

$$\frac{\left\{ - \left[R + (\delta_3' - \delta_3) \right]^2 \cos^2 \psi \right\}}{a^2} + \frac{\left\{ \left[R + (\delta_3' - \delta_3) \right]^2 \sin^2 \psi \right\}}{b^2} = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\left\{ - \left[R - (\delta_4 - \delta_4') \right]^2 \sin^2 \psi \right\}}{a^2} + \frac{\left[R + (\delta_4 - \delta_4') \right]^2 \cos^2 \psi}{b^2} = 1. \quad (8)$$

Кроме этого, можно составить дополнительное уравнение, учитывающее длину расточки статора до появления эллипсности и после. Расточка статора до деформации представляет собой окружность, длина которой определяется выражением

$$L_1 = 2\pi R, \quad (9)$$

где R – радиус расточки.

Длина эллипса определяется формулой [6]

$$L_2 = 4aE(e). \quad (10)$$

При этом a – длина большой полуоси эллипса; $E(e) = E(e\pi/2)$ – полный эллиптический интеграл второго рода; $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ – эксцентриситет эллипса.

Ввиду того, что длина расточки не должна изменяться, т.е. $L_1 = L_2$, можно записать новое уравнение:

$$\pi R = 2aE(e). \quad (11)$$

Используя уравнения (5)...(8), (11), можно рассчитать геометрические параметры полученного в результате деформации эллипса. Погрешность расчета не будет превышать аб-

солютной погрешности метода измерения величины зазора. Расчет удобно выполнить численными методами с использованием компьютерной техники.

Перекося ротора (угловой эксцентриситет). Пусть в начальный момент, до появления дефекта, оси ротора и статора совпадают (прямая O_1O_2 , рис. 4). Расточка статора 1 изображена сплошной линией, а ротор (оггибающий цилиндр полюсов) – пунктиром. При возникновении углового эксцентриситета ротора ось O_1O_2 повернется вокруг какой-то точки O в направлении, указанном стрелкой, на угол γ и займет положение $O'_1O'_2$. Рассчитаем параметры дефекта – координаты точки O (l_1, l_2) и направление γ по изменениям показаний

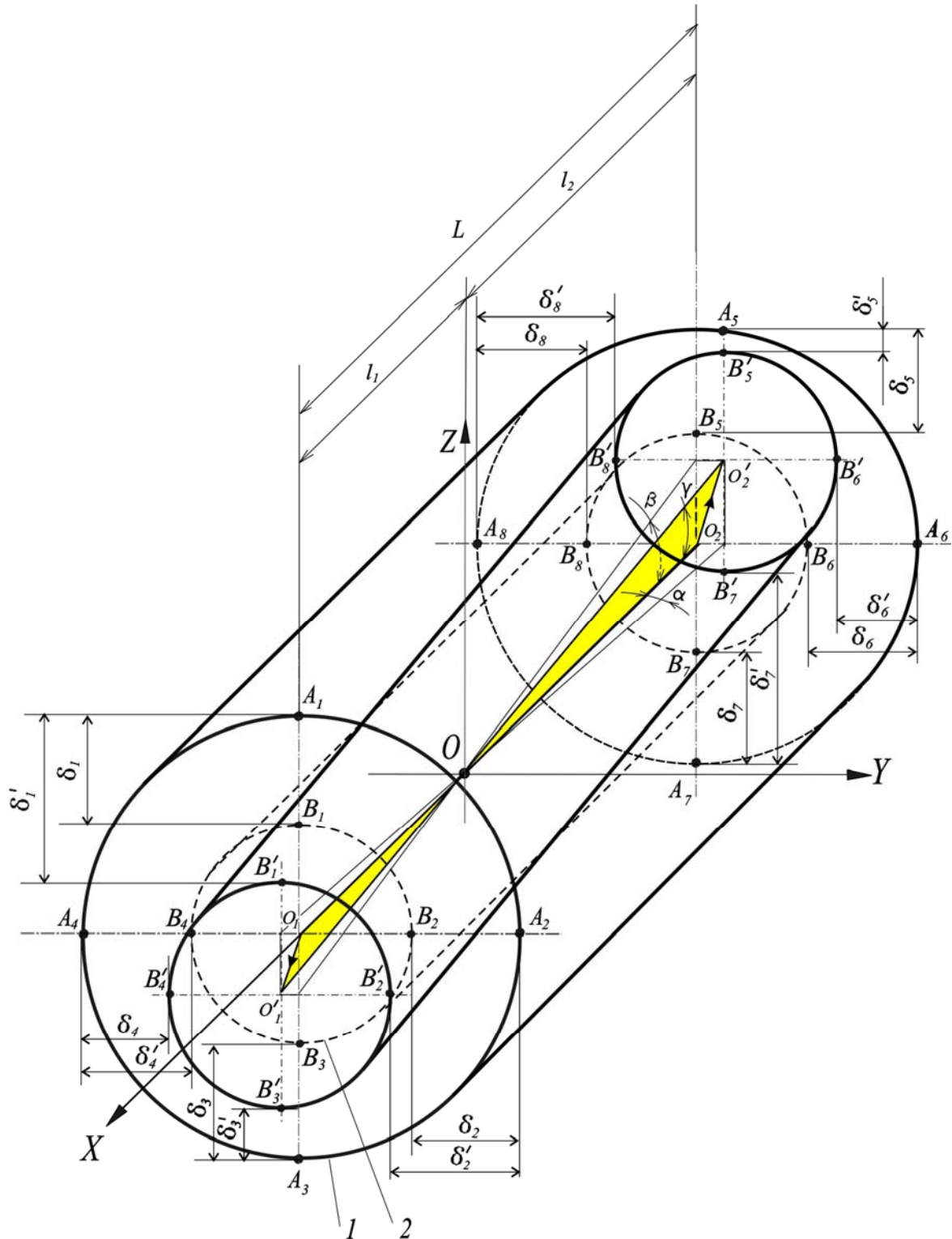


Рис. 4

восемью датчиков зазора, расположенных на статоре в двух плоскостях по четыре датчика по обеим сторонам статора. С одной стороны, датчики (их центры) находятся в одной плоскости в точках $A_1...A_4$ с угловым расстоянием в 90° друг от друга, а с другой – в точках $A_5...A_8$ также в одной плоскости и с таким же угловым расстоянием. Обе плоскости перпендикулярны оси O_1O_2 . Расстояние между плоскостями равно L . С помощью датчиков измеряют зазоры в гидрогенераторе – расстояния между точками $A_1...A_8$ статора и соответствующими им точками $B_1...B_8$, расположенными на полюсах ротора на таком же расстоянии в 90° друг от друга. После появления эксцентриситета расстояние измеряется между точками $A_1...A_8$ и сместившимися точками на роторе $B_1'...B_8'$. До появления эксцентриситета величины зазоров в этих точках были равны $\delta_1... \delta_8$, а после – $\delta_1'... \delta_8'$. Для примера на рис. 5 показан характер изменения зазора для датчика, расположенного в точке A_1 .

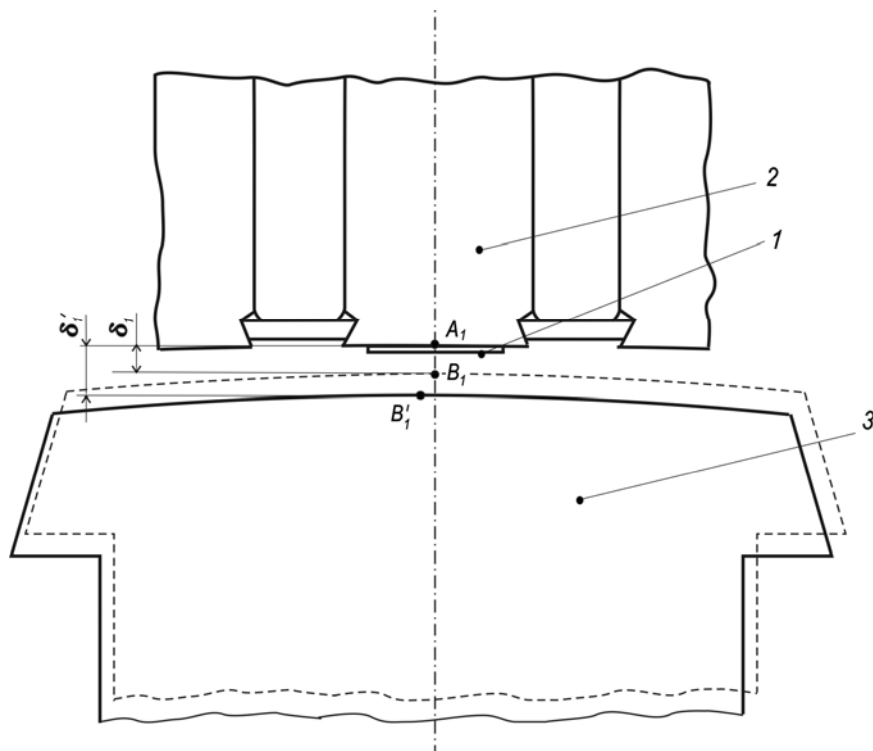


Рис. 5

Введем систему координат XYZ с началом в точке O – центре поворота оси ротора при появлении углового эксцентриситета. Проекцией прямой $O_1'O_2'$ на плоскость XOY будет прямая C_1C_2 , а на плоскость XOZ – прямая D_1D_2 . Угол между C_1C_2 и осью O_1O_2 обозначим α , а между D_1D_2 и O_1O_2 – β . Определим через l_1, l_2, α и β смещения центров O_1' и O_2' :

$$\begin{aligned} O_1'D_1 = C_1O_1 = l_1 \operatorname{tg} \alpha; & \quad O_1'C_1 = D_1O_1 = l_1 \operatorname{tg} \beta; \\ O_2'D_2 = C_2O_2 = l_2 \operatorname{tg} \alpha; & \quad O_2'C_2 = D_2O_2 = l_2 \operatorname{tg} \beta. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая геометрические соотношения на рис. 4, составим систему уравнений, связывающих измеренные величины зазоров δ_i, δ_i' , расстояние L , искомые параметры эксцентриситета $l_1, l_2, \operatorname{tg} \alpha$ и $\operatorname{tg} \beta$. Как видно из системы уравнений (12), для определения параметров эксцентриситета достаточно данных о величине начального и измененного зазоров, полученных от четырех датчиков: двух соседних датчиков (т.е. находящихся на расстоянии 90° друг от друга) на каждой стороне статора. Избыточное количество датчиков может быть использовано для проверки расчетов, а также при определении формы расточки статора, когда с увеличением количества датчиков повышается достоверность информации.

Если использовать данные о величинах зазоров, полученных от датчиков, расположенных в точках A_1, A_2, A_5 и A_6 , решение системы (12) будет иметь вид

$$l_1 = L \frac{\delta_2' - \delta_2}{\delta_2' - \delta_2 + \delta_6 - \delta_6'}; \quad l_2 = L \frac{\delta_6 - \delta_6'}{\delta_2' - \delta_2 + \delta_6 - \delta_6'};$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\delta'_2 - \delta_2 + \delta_6 - \delta'_6}{L}\right); \quad \beta = \arctg\left[\frac{(\delta'_1 - \delta_1)(\delta'_2 - \delta_2 + \delta_6 - \delta'_6)}{L(\delta'_2 - \delta_2)}\right]. \quad (13)$$

Полученные результаты могут быть использованы в системах контроля и диагностики гидрогенераторов.

Предложены методики расчета параметров эксцентриситета и перекоса ротора, эллипсности расточки статора ротора в капсульных гидрогенераторах по измеренным величинам воздушного зазора между ротором и статором.

Design procedure for calculation parameters of rotor eccentricity and rotor misalignment, ellipsoid of stator boring in capsule hydrogenerators according to measured amounts of air gap between rotor and stator are proposed.

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: Науч.-учебн. центр ЭНАС, 1998. – 133 с.
2. Ахметвалеева Л.В., Голенцев-Кутузов А.В., Немтарев А.В. Разработка дистанционной микропроцессорной системы измерения формы статора гидрогенератора // Проблемы энергетики. – 2005. – №11–12. – С. 30–35.
3. Кузьмин В.В., Вакуленко А.Н. Режимы эксплуатации и наиболее часто встречающиеся повреждения гидрогенераторов ГЭС Днепровского каскада. Влияние параметров воздушного зазора между ротором и статором гидрогенератора на надежность его работы // Гидроэнергетика Украины. – 2005. – Вып. 32. – С. 22–29.
4. Левицкий А.С., Федоренко Г.М. Визначення параметрів дефектів повітряного зазору в гідрогенераторах за даними датчиків, розміщених на статорі // Гідроенергетика України. – 2008. – № 1. – С. 30–33.
5. Левицкий А.С., Федоренко Г.М., Архіпова Л.В. Визначення параметрів перекосу ротора в потужних гідроенергетиках // Гідроенергетика України. – 2008. – № 3. – С. 31–34.
6. Поташиник С.И., Грубой А.П., Черемисов И.Я. и др. Модернизация гидрогенераторов ГЭС Днепровского каскада (опыт и перспективы) // Гидроэнергетика Украины. – 2005. – Вып. 32. – С. 13–22.
7. Поташиник С.И., Федоренко Г.М., Васильковский Ю.Н. и др. Проблемы повышения надежности мощных гидрогенераторов при нестабильности воздушного зазора // Гидроэнергетика Украины. – 2006. – № 6. – С. 6–10.
8. Заявка 2007 12431, МПК G01B 7/14, G01R 27/26. Спосіб вимірювання повітряного зазору між ротором і статором в гідрогенераторі та пристрій для його реалізації / С.І. Поташиник, К.В. Вошинський, О.П. Грубой, А.С. Левицкий, Є.Ю. Небольбов, А.І. Новік, Г.М. Федоренко, А.К. Шофул; Заявлено 09.11.2007.
9. Air Gap Monitoring System (AGMS). <http://www.wibrosystem.com>.
10. Air Gap Sensor AGS. – <http://www.mikrotrend.com/AGS.htm>.
11. Bissonnette M., Lin J. 10 Case Studies of On-Line Monitoring & Diagnostics on Hydroelectric Machinery. – <http://www.wibrosystem.com/pdf/10-CASES.PDF>.
12. Casselman D., Easman K., Bissonnette M. Generator On-Line Monitoring at R.H. Saunders GS Interpretation and Application. – http://www.marubun.co.jp/measurement/electric/qgc.18e0000368jf-att/WP01_OLM_RH_Saunders.pdf.
13. Rasmussen J., Howard B. Condition Monitoring for Hydro Machinery // Orbit. – 2004. – P.49–57.
14. Talas P., Toom P. Dynamic measurement and analysis of air gap variations in large hydroelectric generators // IEEE Transactions on power Apparatus and Systems. – September 1983. – Vol. PAS–102. – No.9. – P.3098–3106.
15. Пат. 4704906 США, МКИ G 01 S15/14, G 01 S15/88, G 01 S15/00, G 01 N29/00. Dinamic air gap measuring device for use with rotating electrical machinery. Заявл. 04.10.86; Опубл. 11.10.87.
16. European Patent EP 0242107, МКИ G 01 S15/18, G 01 S15/14, G 01 S15/00, G 01 S15/88, H 02 K15/00, H 02 K15/16. Dinamic air gap measuring device for use with rotating electrical machinery. Заявл. 04.07.87; Опубл. 10.11.87.

Надійшла 1.06.2009