

УДК 681.786

Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов

Зайцев Е.А.¹, Левицкий А.С.¹, Сидорчук В.Е.²

¹Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина

²Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, г. Киев 02156, Украина

Поступила 27.02.2017

Принята к печати 18.05.2017

Повышение надежности работы гидрогенераторов неразрывно связано со своевременным выявлением дефектов во время их работы. Для решения этой задачи перспективным является анализ контрольно-диагностических параметров. Целью работы являлась разработка компьютеризированной информационно-измерительной системы для измерения воздушного зазора в гидрогенераторе, в которой применены два емкостных сенсора с параллельными компланарными электродами. Рассмотрен способ определения параметров формы огибающей полюсов ротора гидрогенератора относительно центра оси вращения с использованием результатов измерения воздушного зазора системой.

На основе практических исследований системы показано, что ее применение позволяет по величине информативной емкости получить высокую точность и разрешающую способность измерений зазора с возможностью линеаризации функции преобразования сенсора программным путем. Для определения отклонения формы огибающей полюсов ротора от идеального цилиндра предложено форму огибающей описывать с помощью ряда Фурье, а вычисление коэффициентов ряда производить как коэффициентов регрессии с помощью метода наименьших квадратов.

Применение данного метода при обработке измерительной информации компьютеризированной информационно-измерительной системой в совокупности с разработанным первичным преобразователем с компланарными параллельными электродами позволяет достичь высокой точности и разрешения измерений по величине информативной емкости.

Ключевые слова: гидрогенератор, воздушный зазор, емкостной сенсор, функция преобразования, регрессионный анализ.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

Адрес для переписки:

Сидорчук В.Е.
Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, г. Киев 02156, Украина
sudorchuk@ipnet.ua

Address for correspondence:

Sydorchuk V.E.
Kyiv National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, Kyiv 02156, Ukraine
sudorchuk@ipnet.ua

Для цитирования:

Зайцев Е.А., Левицкий А.С., Сидорчук В.Е.
Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 122–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

For citation:

Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Sydorchuk V.E.
[Air gap control system for hydrogenerators].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 122–130 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

Air gap control system for hydrogenerators

Zaitsev I.O.¹, Levytskyi A.S.¹, Sydorчук V.E.²

¹The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

²Kyiv National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, Kyiv 02156, Ukraine

Received 27.02.2017

Accepted for publication 18.05.2017

Abstract

In this paper, we report of the solving the actual problem of control the air gap in the hydrogenerators. The aim of the study was development of a computerized information-measuring system for measuring the air gap in the hydrogenator, which used two capacitive sensors with parallel coplanar electrodes, and the method of determining the shape of the envelope parameters hydrogenerator rotor poles relative to the center axis of rotation, using the measurement results of the air gap.

In practical studies of the sensor circuit it has been shown that its use allows for the informative value of the sensor capacitance conversion function to obtain a high accuracy and resolution measurement with digital linearization of converting function of the sensor with use program utility. To determine the form deviations of the envelope line of the rotor pole from the ideal cylinder, which is one of the main structural defects of the technological errors as results the distortion of the shape of the air gap in the hydrogenator, when the machine was manufacture and assembly. It is proposed to describe the shape of the envelope to use a Fourier transform. Calculation of the coefficients of the Fourier series is performed using the method of least squares as the regression coefficients.

Application of this method in processing the measuring data in a computerized information-measuring system the developed with the primary converter with coplanar parallel electrodes allowed attaining the high measurement accuracy and resolution informative in magnitude of the capacity.

Keywords: hydro generators, air gap, capacitive sensor, transfer function, regression analysis.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

Адрес для переписки:

Сидорчук В.Е.
Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, г. Киев 02156, Украина
sudorchuk@ipnet.ua

Address for correspondence:

Sydorchuk V.E.
Kyiv National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, Kyiv 02156, Ukraine
sudorchuk@ipnet.ua

Для цитирования:

Зайцев Е.А., Левицкий А.С., Сидорчук В.Е.
Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 2. – С. 122–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

For citation:

Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Sydorчук V.E.
[Air gap control system for hydrogenerators].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 2, pp. 122–130 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-122-130

Введение

Одним из самых экологически чистых источников электрической энергии современного электроэнергетического комплекса являются гидрогенераторы (ГГ). Обеспечение повышения надежности работы ГГ неразрывно связано с решением задач своевременного выявления дефектов во время их работы. Для решения этих и подобных задач перспективным является анализ контрольно-диагностических параметров, отклонение которых от нормы сопровождается изменением физических процессов в узлах ГГ, характеризует его техническое состояние [1, 2] и оказывает влияние на основные энергетические показатели [3]. При этом нужно учитывать, что задача выбора оптимального комплекса параметров для диагностики состояния машины во время работы достаточно сложная. С одной стороны, необходимо выявить как можно большее количество возможных дефектов, а с другой стороны – выбрать наиболее эффективные методы контроля из числа используемых, руководствуясь экономически целесообразными затратами. Однако методы и средства обнаружения дефектов, применяемые в настоящее время, особенно в процессе работы ГГ, еще далеки от совершенства, в них недостаточно используются современные технические возможности. Благодаря этому в последние годы активизировались исследования и разработки по совершенствованию существующих и созданию новых методов и средств обнаружения дефектов гидрогенераторов для построения на их основе комплексных систем контроля и технической диагностики.

Как известно [4–6], параметры вибрационных процессов, происходящих в узлах ГГ, характеризуют большинство механических дефектов. Поэтому измерение и анализ вибросигналов узлов мощных ГГ занимает особое место в современных системах контроля и диагностики. В работах [4, 7] приводится определение степени достоверности обнаружения механических дефектов таких ГГ при помощи измерения и анализа параметров вибрации, вероятность их локализации и прогнозирования развития во времени. Достоверность технической диагностики, основанной только на контроле параметров вибросигналов узлов ГГ, практически никогда не равна 100 % и колеблется в пределах (в зависимости от типа дефекта) от 20 до 80 %. Такая достоверность не позволяет выявлять все возможные дефекты, возникающие в узлах машины. Степень досто-

верности диагностики в большинстве случаев зависит от погрешностей, возникающих в процессе измерения и обработки вибрационных сигналов, а также неправильной интерпретации результатов анализа параметров вибрации. Погрешности в большинстве случаев вызваны: недостаточной температурной стабильностью вибропреобразователей; высокими уровнями шума; погрешностями преобразовательных звеньев, используемых в аналоговых измерительных каналах; погрешностями аналого-цифрового преобразования; погрешностями, связанными с определением составляющих вибрации при спектральном анализе. Результаты интерпретации результатов обработки вибросигналов напрямую зависят от субъективных знаний экспертов об объективных физических процессах, сопровождающих и порождающих вибрационные процессы в узлах ГГ без учета особенностей вибрации машины в высокочастотной и низкочастотной областях, а также при недостаточном учете в системах технической диагностики специфики стохастических составляющих вибросигналов, полученных от узлов электромеханического оборудования ГГ. Поэтому для повышения степени достоверности в современные системы вибрационного контроля включают специализированные сенсоры, с помощью которых получают дополнительную информацию о параметрах различных механических дефектов. Так, одной из первых систем вибрационного контроля состояния ГГ с дополнительными датчиками является система *VIMOS (Vibration Monitoring System)*, разработанная в 1990-х годах в шведском отделении компании *ABB (ASEA-Brown Boveri Ltd.)* для ГЭС Швеции. Система наряду с датчиками вибраций содержит бесконтактные сенсоры перемещения направляющих подшипников по осям *X* и *Y*, сенсоры перемещения подпятников, а также сенсоры контроля воздушного зазора (ВЗ) между статором и ротором [4, 6, 8]. Большинство мониторинговых систем осуществляют измерение воздушного зазора только на определенных типах гидрогенераторов, что в свою очередь связано с конструктивными особенностями как гидрогенераторов, так и специализированных датчиков. Так, датчик *LS120* компании *MIKROTREND D.O.O.* предназначен для измерения воздушного зазора в диапазоне от 2 до 33 мм; компания *Iris Power* предлагает датчики для трех различных диапазонов: от 5 до 12 мм (*CGP-02*), от 12 до 22 мм (*CGP-03*) и от 22 до 47 мм (*CGP-04*). Компания *Bently Nevada*

предлагает измерительную систему 4000 *Series Air Gap Sensor System* с датчиком измеряющим воздушный зазор до 20 мм. Недостатком указанных выше систем и специализированных датчиков является их использование только на определенных типах гидрогенераторов, а настройка системы контроля и реализация датчиков под определенный тип гидрогенератора требует значительных финансовых затрат (стоимость упомянутых систем при использовании на нестандартном гидрогенераторе составляет от 200 тыс. долларов).

Поэтому на сегодняшний день актуальной задачей является развитие эффективных методов измерения параметров механических дефектов в ГГ: воздушного зазора (ВЗ), осевого и радиального биений вала, смещения смежных секторов составного статора и др. Такой же актуальной задачей является создание ряда новых аппаратно-программных решений для обеспечения помехоустойчивости первичных преобразователей (сенсоров), вторичных преобразователей, линий передачи информации и линий питания систем измерения контрольно-диагностических параметров мощных ГГ.

В данной работе рассматривается измерительная система ВЗ в ГГ, в которой применены два емкостных сенсора оригинальной конструкции (с параллельными компланарными электродами), а также способ определения параметров формы огибающей полюсов ротора ГГ относительно центра оси вращения с использованием результатов измерения зазора.

Принципы построения и работы системы контроля

Воздушный зазор между ротором и статором является одним из важнейших параметров мощного ГГ, в котором механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию [9]. Размер ВЗ в значительной мере определяет характеристики машины и ее поведение в процессе эксплуатации. В реальном случае величина ВЗ не является равномерной по ряду технологических и эксплуатационных причин [7, 10]. Неравномерность ВЗ, вызванная отклонением формы расточки сердечника статора и формы огибающей полюсов ротора, может быть следствием нарушения технологии сборки и изготовления узлов ГГ. Также неравномерность ВЗ вызывают электромагнитные силы взаимного притяжения статора и ротора, перераспределение внутренних

напряжений, неравномерный нагрев пакетов статора и полюсов ротора, недостатки конструкции элементов крепления.

Для решения задачи контроля воздушного зазора в ГГ, его неравномерности, анализа причин, вызвавших появления неравномерности, перспективным является применение современных систем технической диагностики на основе компьютеризированных информационно-измерительных систем (ИИС) со специализированным программно-математическим обеспечением. Применение ИИС при контроле позволяет создавать и использовать диагностическую базу данных на основе истории измерений воздушного зазора ГГ, что позволяет одновременно оценивать и прогнозировать изменение величины воздушного зазора ГГ в динамическом режиме.

Для получения первичной измерительной информации перспективным является использование специализированных датчиков, адаптированных к условиям эксплуатации и конструктивным особенностям зоны контроля воздушного зазора в гидрогенераторах [11, 12]. В настоящее время одним из наиболее распространенных методов измерения воздушного зазора мощных гидрогенераторов является емкостной [7, 9, 13, 14]. На рисунке 1 приведена схема установки датчика на статоре гидрогенератора.

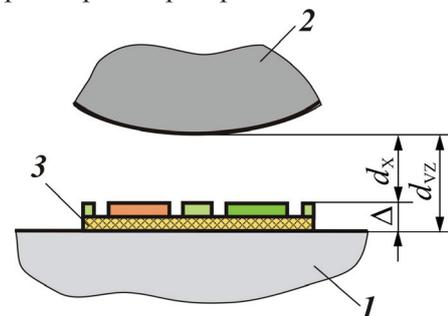


Рисунок 1 – Схема установки датчика на статоре гидрогенератора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – датчик воздушного зазора

Figure 1 – The installation sensor in the hydrogenerator: 1 – stator core; 2 – rotor; 3 – air gap sensor

В этом случае расстояние d_x между поверхностью электродов сенсора 3 и поверхностью каждого из полюсов ротора 2 зависит от электрической емкости C_x датчиков, установленных на расточке сердечника статора 1, т.е.:

$$d_x = f(C). \quad (1)$$

При этом величина ВЗ d_{vz} , т.е. расстояние между условной огибающей вершин полюсов ро-

тора и поверхностью расточки сердечника статора гидрогенератора, определится как:

$$d_{vz} = d_x + \Delta,$$

где Δ – толщина диэлектрической пластины, на которой сформированы электроды емкостного датчика.

При использовании такого метода емкостные датчики (рисунок 2), как правило, расположены на расточке сердечника по группам в плоскостях, перпендикулярных [15] к оси вращения ротора. Как минимум устанавливается два сенсора в одной плоскости, расположенных под углом 90° друг к другу, при этом средства обработки отнесены на безопасное расстояние, которое обеспечивает низкий уровень внешних воздействий (электромагнитные поля, температура и др.) на них (рисунок 2). На рисунке 2 приведен пример установки датчиков ВЗ на капсульном ГГ.

Блок-схема системы контроля ВЗ показана на рисунке 3. Конструктивно система контроля ВЗ ГГ состоит из двух основных частей – емкостных датчиков с цифровым выходом (ДЦВ_{1,2}), используемых в качестве первичных преобразователей, и системы вторичного преобразования полученных от ДЦВ данных. Для преобразования величины ВЗ в цифровой код был разработан и изготовлен экспериментальный образец ДЦВ, который конструктивно состоит из емкостного сенсора с двумя рабочими компланарными параллельными электродами [12] и ПЕК на основе микросхемы 24-разрядного сигма-дельта преобразователя AD7745 с встроенным сенсором температуры. Использование 24-разрядного сигма-дельта преобразователя позволяет достичь разрешения по диапазону измерения информативной емкости 4 фФ.

Результаты проведенных ранее исследований [1, 16] показали, что применение предложенной схемы позволяет достичь точности 7 фФ или

0,12 мм с возможностью линейризации программным путем [1] зависимости (1). При этом на первичный блок обработки информации возложены функции преобразования значения емкости как функции от значения ВЗ между общей плоскостью электродов датчика и поверхностью ротора ГГ в цифровой код с последующей передачей цифрового кода в модуль конфигурации, сбора, обработки и анализа данных.

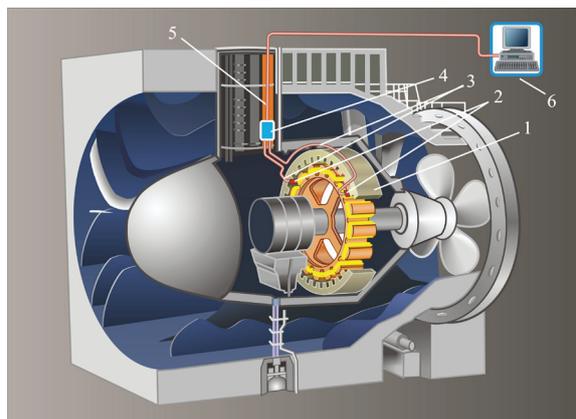


Рисунок 2 – Пример установки системы контроля воздушного зазора с двумя емкостными сенсорами: 1 – сердечник статора гидрогенератора; 2 – емкостный сенсор зазора; 3 – соединительный кабель между сенсором и вторичным преобразователем; 4 – вторичный измерительный преобразователь; 5 – соединительный кабель между вторичным преобразователем и компьютером информационно-измерительной системы (информационный кабель); 6 – компьютер информационно-измерительной системы

Figure 2 – Example of installation control system with two capacitive sensors: 1 – stator of the hydrogenerator; 2 – capacitive air gap sensor; 3 – connecting cable between the sensor and the secondary converter; 4 – secondary converter; 5 – connecting cable between the secondary converter and the computer information-measuring system (information cable); 6 – PC of information-measuring system.

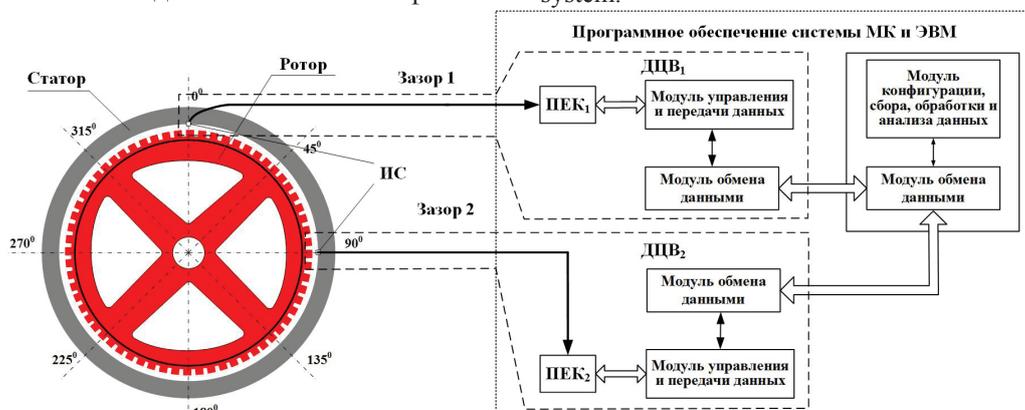


Рисунок 3 – Структурная схема системы контроля ВЗ: ПЕК₁, ПЕК₂ – преобразователи емкость-код; ИС – измерительный сенсор; ДЦВ₁, ДЦВ₂ – емкостный датчик воздушного зазора с цифровым выходом; МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер

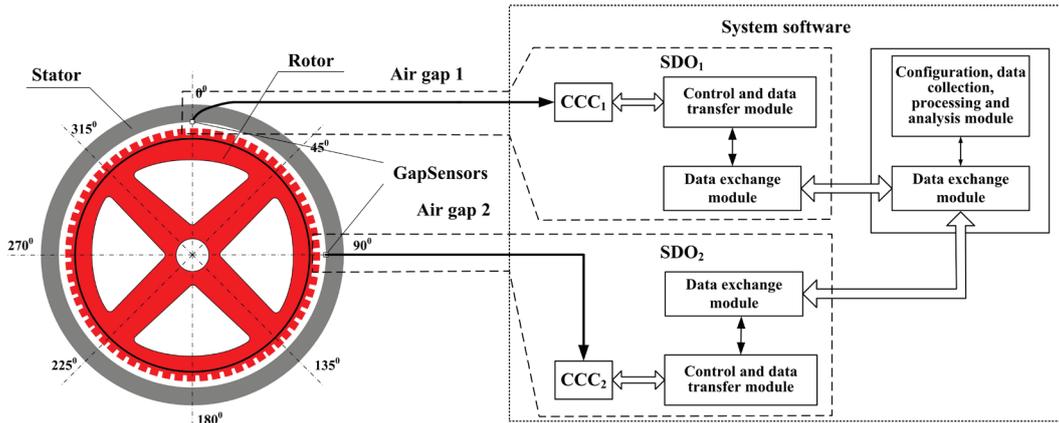


Figure 3 – The block-scheme of control system the air gap in the hydrogenerators: CCC₁, CCC₂ – capacitive - digital code converters; SDO₁, SDO₂ – capacitive air gap sensor with digital code

Определение параметров формы огибающей полюсов ротора гидрогенератора по результатам измерения воздушного зазора

Одним из основных конструктивных дефектов, который приводит к искажению формы ВЗ в ГГ, есть отклонения формы огибающей полюсов ротора от идеального цилиндра через технологические погрешности изготовления и сборки, приводящие к неодинаковости ВЗ под разными полюсами. Во время работы машины из-за эксцентриситета эти зазоры могут дополнительно изменяться, и центр обода ротора смещается относительно оси вращения [6, 7, 17–20].

Во время проведения контроля ВЗ первичная измерительная информация с датчиков (см. рисунки 2, 3) поступает дискретно с детерминированным периодом опроса $T_{DP} = f(\omega_p, l_p)$, (ω_p – скорость вращения ротора; l_p – расстояние между центрами полюсов ротора) во времени измерения t . При этом информативные отсчеты имеют привязку к номеру полюса n ротора, а также к координатам (x_{st}, y_{st}) точки крепления сенсора на статоре.

Полученные первичные данные о неравномерности воздушного зазора и объект исследования (ВЗ между ротором и статором) имеют привязку к пространственным и временным координатам и в обобщенном виде описываются выражением:

$$d_{VZ}(t) = f(x_{rt}, y_{rt}, t, \mathbf{d}), \quad (2)$$

где x_{rt}, y_{rt} – векторы значений координат полюсов ротора, для которых происходит определение контролируемого параметра; \mathbf{d} – вектор значений ВЗ, определенных в момент времени $t_n \in t$ в точке со значением координаты ротора x_{rt}, y_{rt} .

В полярной системе координат выражение (1) примет вид:

$$d_{VZ}(t) = f(\varphi_{rt}, t, \mathbf{d}), \quad (3)$$

где φ_{rt} – вектор значений угловых координат взаимосвязанный со значениями \mathbf{d} .

Полученные данные таким образом могут быть использованы при определении искажения формы огибающей полюсов ротора. В общем случае форма ротора может быть описана с помощью ряда Фурье:

$$d_{VZn} = d_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (e_k \cos i\varphi_n + r_k \sin i\varphi_n), \quad (4)$$

где d_{VZn} – измеренное значение ВЗ в точке с угловой координатой φ_n ; d_0 – средняя величина воздушного зазора в точке крепления датчика определенная за один оборот ротора; e_k, r_k – коэффициенты, определяющие искажения формы ротора.

Для оценки параметров, характеризующих форму ротора, можно предположить, что выражение (4) отражает корреляционную связь между $d_{VZn}, \cos i\varphi_n, \sin i\varphi_n$. С другой стороны, аналогичные зависимости содержит выражение (3), описывающее полученный массив измерительных данных. С учетом выражений (3) и (4) входящие в них параметры, можно рассматривать как коэффициенты регрессии и использовать для их вычисления применить метод наименьших квадратов [21]. При симметричном расположении точек, в которых измеряются ВЗ, и отсутствии пропущенных, нулевых или заведомо ложных данных в (3). Для вычисления по формуле (4) с учетом (3) будем иметь:

$$d_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_{VZn}, \quad e_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_{VZn} \cos k\varphi_n,$$

$$r_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N d_{vzn} \sin k\varphi_n,$$

где N – количество точек с угловой координатой φ_n , для которых измерено значение d_{vzn} .

В этом случае отклонением формы ротора является эксцентриситетом ротора (смещение обода ротора относительно оси вращения) и эллиптичностью обода ротора. В связи с этим можно ограничиться вычислением первых двух коэффициентов e_1 , e_2 , r_1 и r_2 . При этом в формуле (4) сохраняются только первые три члена:

$$d_{vzn} = d_0 + \varepsilon_{1p} \cos(\varphi_n + \alpha_1) + \varepsilon_{2p} \cos(2\varphi_n + \alpha_2),$$

где $\varepsilon_{1p} = \sqrt{e_1^2 + r_1^2}$ – эксцентриситет обода ротора; $\alpha_1 = \tan^{-1} r_1 / e_1$ – угол, характеризующий направление эксцентриситета; $\varepsilon_{2p} = \sqrt{e_2^2 + r_2^2}$ – эллиптичность обода ротора; $\alpha_2 = \tan^{-1} r_2 / e_2$ – угол, характеризующий направление осей эллипса.

Заключение

Разработана система, дающая возможность с высокой точностью и разрешающей способностью измерять воздушный зазор между статором и ротором в гидрогенераторах, а также оценить искажение огибающей полюсов ротора. Для измерения воздушного зазора предложено использование пары емкостных сенсоров с компланарными параллельными электродами, разработанных авторами с учетом конструктивных особенностей капсульного гидрогенератора СГК538/160–70М. В результате повышается достоверность контроля состояния машины, надежность и безопасность ее работы.

Предложен способ расчета параметров формы огибающей полюсов ротора гидрогенератора с использованием данных о величинах воздушных зазоров между ротором и статором, полученных при применении системы емкостных сенсоров, размещенных на расточке сердечника статора.

Список использованных источников

1. Зайцев, Е.О. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М / А.С. Левицький, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромпляс // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2016. – Вип. 43. – С. 134–137.

2. Бабак, С.В. Статистическая диагностика электротехнического оборудования : монография / С.В. Бабак, М.В. Мыслович, Р.М. Сысак. – К. : ИЭД НАН Украины, 2015. – 456 с.

3. Энергетика: история, настоящее и будущее. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики / Е.Т. Базев, Б.Д. Билека, Е.П. Васильев [и др.]. – К. : Лира, 2011. – 400 с.

4. Алексеев, Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б.А. Алексеев. – 2-е изд., стер. – М. : ЭНАС, 2002. – 144 с.

5. Алексеев, Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б.А. Алексеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2001. – 152 с.

6. Eriksson, K. VIMOS condition monitoring for hydro power machines / K. Eriksson, S. Eriksson // *ABB Review*. – 1992. – No. 1. – P. 15–20.

7. Левицький, А.С. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / А.С. Левицький, Г.М. Федоренко, О.П. Грубой. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.

8. Using the VM600 system to measure air gaps on hydro turbine. – Pipersville, PA, USA : ZeefaxInc, 2012. – 43 p.

9. Griscenko, M. Eccentricity of Slow-Speed Salient-Pole Generator: Analysis based on Air Gap Spectrum / M. Griscenko, R. Elmanis-Helmanis // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2015. – Vol. 52, iss.1. – P. 26–37.

10. Rasmussen, J. Condition Monitoring for Hydro Machinery / J. Rasmussen, B. Howard // *Orbit*. – 2004. – P. 49–57.

11. Патент РФ № 2318182, МПК G01B 7/14. Устройство измерения воздушного зазора / О.Б. Скворцов, И.И. Радчик, В.М. Тараканов, Е.С. Трунин, С.И. Смирнов; Заявитель и патентообладатель ООО «ДИАМЕХ-2000» (Россия). – № 2006128904/28; заявл. 09.08.2006; опубл. 27.02.2008, Бюл. № 6.

12. Патент Украины № а201603404, МКИ G01B7/14. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах / А.С. Левицький, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромпляс; Заявник Інститут електродинаміки НАН України. – № а201603404; заявл. 01.04.2016.

13. Bissonnette, Marc R. Case Studies of Problems Diagnosed Using On-Line Machine Monitoring on Hydro-Generating Machines / Marc R. Bissonnette, Amy Stevenson // *Proc. of the Hydro Vision 2006*, 31 July. – 3 August 2006, USA, Portland. – P. 1–11.

14. Pollock, G.B. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring / G.B. Pollock, I.F. Lyles // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 1992. – Vol. 7, no. 4. – P. 680–668.

15. Вовк, И.Г. Геометрическое моделирование движения систем в задачах прикладной геоинформатики / И.Г. Вовк // *Вестник СГУГиТ (Сибирского*

государственного университета геосистем и технологий). – 2015. – № 2 (30). – С. 72–77.

16. Левицкий, А.С. Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі / А.С. Левицкий, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромпльяс // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2016. – Вип. 44. – С. 50–55.

17. Поташиник, С.И. Проблемы повышения надежности мощных гидрогенераторов при нестабильности воздушного зазора / С.И. Поташиник, Г.М. Федоренко, Ю.Н. Васьковский [и др.] // Гидроэнергетика Украины. – 2006. – № 3. – С. 6–10.

18. Aliabad, A.D. A Simple Analytic Method to Model and Detect Non-Uniform Air-Gaps in Synchronous Generators / A.D. Aliabad, M. Mirsalim, M.F. Aghdaei // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. – Vol. 6, no. 1. – Mar, 2010. – P. 29–35.

19. Mikalauskas, R. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems / R. Mikalauskas, V. Volkovas // Ultragarasas. – 2003. – No. 1 (46). – P. 7–11.

20. Griscenko, M. Eccentricity of slow-speed salient-pole generator: analysis based on air gap spectrum / M. Griscenko, R. Elmanis-Helmanis // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2015. – No. 1. – P. 26–37.

21. Зайцев, Е.А. Использование спектрального анализа методом Берга при построении программно-математического обеспечения оптических систем вибродиагностики / Е.А. Зайцев, В.Е. Сидорчук, А.Н. Шпилька // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 186–194.

Reference

1. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. [Determination of the response characteristic of the capacitive sensor of the air gap in the hydrogenerator SGK 538/160-70M]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Nacional'noji akademiji nauk Ukrajinii*, 2016, no. 43, pp. 134–137 (in Ukrainian).

2. Babak S.V., Myslovich M.V., Sysak R.M. *Statisticheskaya diagnostika elektrotekhnicheskogo oborudovaniya* [The statistical diagnostics of the electrotechnical equipment], IED NANU Publ., 2015, 456 p.

3. Bazeev E.T., Bileka B.D., Vasil'ev E.P., Varlamov G.B., Vol'chin I.A. *Energetika: istoriya, nastoyashchee i budushchee. Razvitie teploenergetiki i gidroenergetiki* [Energetic: history, present and future. The development of thermal power and hydropower]. Kiev, Lira Publ., 2011, pp. 393–398.

4. Alekseev B.A. [Determining the status (diagnostics) of large hydro generators]. ENAS, 2002, 144 p.

5. Alekseev B.A. [Determining the status (diagnostics) of large turbo generators]. ENAS, 2001, 152 p.

6. Eriksson K., Eriksson S. VIMOS condition monitoring for hydro power machines. *ABB Review*, 1992, no. 1, pp. 15–20.

7. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gruboj O.P. [Monitoring of the status of powerful hydro and turbo generators using capacitive meter for the parameters of mechanical defects]. IED NANU Publ., 2011, 242 p.

8. Using the VM600 system to measure air gaps on hydro turbine. Pipersville, PA, USA, ZeefaxInc, 2012, 43 p.

9. Griscenko M., Elmanis-Helmanis R. Eccentricity of Slow-Speed Salient-Pole Generator: Analysis based on Air Gap Spectrum. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2015, vol. 52, iss.1, pp. 26–37.

10. Rasmussen J., Howard B. Condition Monitoring for Hydro Machinery. *Orbit*, 2004, pp. 49–57.

11. Skvorcov O.B., Radchik I.I., Tarakanov V.M., Trunin E.S., Smirnov S.I. *Ustrojstvo izmereniya vozdušnogo zazora* [The device for measuring the air gap]. Patent RF no. 2318182, 2006.

12. Levytskyi, A.S., Zaitsev, I.O., Kromplyas, B.A. *Jemnisnyj sensor dlja vymirjuvannja povitranogo zazoru v generatorakh* [Capacitive sensor for measuring air gap between stator and rotor generators]. Patent UA no. a2016 03404, 2016.

13. Bissonnette R. Marc. Case Studies of Problems Diagnosed Using On-Line Machine Monitoring on Hydro-Generating Machines. *Proc. of the Hydro Vision 2006*, 2006, USA, Portland., pp.1–11.

14. Pollock G.B. Vertical hydraulic generators experience with dynamic air gap monitoring. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1992, vol. 7, no. 4, pp. 680–668.

15. Vovk I.G. [Geometric modeling of motion of systems in problems of applied geoinformatics]. *Bulletin SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies) [Bulletin SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)]*, 2015, no. 2 (30), pp. 72–77 (in Russian).

16. Zaitsev I.O., Levytskyi A.S., Kromplyas B.A. [The errors of the capacitive sensor gap in the hydrogenerator]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Nacional'noji akademiji nauk Ukrajinii*, 2016, no. 44, pp. 50–55 (in Ukrainian).

17. Potashnik S.I., Fedorenko G.M., Vas'kovskij Yu.N. [Problems of improving the reliability of powerful hydro-generators with the instability of the air gap]. *Gidroenergetika Ukrainy [Hydropower of Ukraine]*, 2006, no. 3, pp. 6–10 (in Russian).

18. Aliabad A.D., Mirsalim M., Aghdaei M.F. A Simple Analytic Method to Model and Detect Non-Uniform Air-Gaps in Synchronous Generators. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 29–35.

19. Mikalauskas R. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems. *Ultragarasas*, 2003, no. 1 (46), pp. 7–11.

20. Griscenko M., Elmanis-Helmanis R. Eccentricity of slow-speed salient-pole generator: analysis based on air gap spectrum. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2015, no. 1, pp. 26–37.

21. Zaitsev I.O., Sidorchuk V.E., Shpil'ka, A.N. [Application of the spectrum analysis with using Berg met-

hod to developed special software tools for non-contact vibration diagnostics system]. *Devices and Methods of*

Measurements, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 186–194 (in Russian). **doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194