

УДК: 621.317.335.2; 621.313.322-82

Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора воздушного зазора в гидрогенераторе

А.С. Левицкий, Е.А. Зайцев, В.А. Березниченко, А.Е. Сухорукова

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина

Поступила 22.01.2020

Принята к печати 04.03.2020

Одним из важнейших параметров мощных гидрогенераторов является воздушный зазор между ротором и статором, и его отклонение от заданных норм является дефектом, который может привести к серьёзным авариям. Поэтому величину и форму зазора необходимо контролировать как во время осмотров, так и при эксплуатации машины. Целью данной работы являлась разработка вторичного измерительного преобразователя, обеспечивающего точность и разрешающую способность, для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Рассматриваются особенности измерения воздушного зазора в мощных гидрогенераторах, а также существующие современные методы и средства измерений. Показано, что для измерения зазора в гидрогенераторах одним из наиболее подходящих средств является измеритель, в состав которого входит ёмкостный сенсор, устанавливаемый на расточке сердечника статора. Серийно выпускаемые измерители зазора с ёмкостными сенсорами по своим некоторым характеристикам не всегда подходят для использования в гидрогенераторах.

Предложен вторичный измерительный преобразователь с улучшенными характеристиками для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Преобразователь разработан на основе уравновешенной компенсационно-мостовой измерительной цепи с формированием управляющего воздействия по фазе сигнала неравновесия. Приведена структурная схема преобразователя и описан алгоритм её работы. Рассмотрен процесс формирования в схеме измерительного выходного сигнала, пропорционального рабочей ёмкости сенсора.

Применение ёмкостного сенсора с компланарными параллельными электродами и предложенного вторичного измерительного преобразователя позволит обеспечить высокую точность и разрешающую способность при измерении воздушного зазора.

Ключевые слова: гидрогенератор, воздушный зазор, ёмкостный сенсор, измерительный преобразователь.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Адрес для переписки:

Е.А. Зайцев
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Address for correspondence:

I.O. Zaitsev
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:

А.С. Левицкий, Е.А. Зайцев, В.А. Березниченко, А.Е. Сухорукова.
Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора
воздушного зазора в гидрогенераторе.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 1. – С. 33–41.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

For citation:

A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Berezychenko, O.E. Sukhorukova.
[Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor
in Hydrogenerator].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor in Hydrogenerator

A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Bereznychenko, O.E. Sukhorukova

The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine

Received 22.01.2020

Accepted for publication 04.03.2020

Abstract

One of the most important parameters of powerful hydro generators (HG) is the air gap between the rotor and the stator, and its deviation from the set norms is a defect that can lead to serious accidents. Therefore, the size and shape of the gap must be monitored both during inspections and during operation of the machine. The aim of this paper was to develop a secondary measuring transducer providing accuracy and resolution for a capacitive gap sensor formed by coplanar parallel electrodes.

It is shown that the reliability and safety of operation of powerful HG inextricably depend on the timely detection of their defects, especially during operation. One of the most important parameters of the HG is the air gap between the rotor and the stator, and its deviation from the set norms is a defect that can lead to serious accidents. Therefore, the size and shape of the gap must be monitored both: during inspections and during operation of the machine. The paper discusses the features of measuring the air gap in a powerful HG, as well as existing modern methods and means of measurement.

It is shown that for measuring the gap in capsule HG, one of the most suitable means is a meter, which includes a capacitive sensor mounted on a central bore of the stator core. Commercially available gap meters with capacitive sensors are not suitable for use on HGs. Commercially available meters with capacitive sensors, by their certain characteristics, are not always suitable for use on HGs.

A secondary measuring transducer with improved characteristics is proposed for a capacitive gap sensor formed by coplanar parallel electrodes.

The converter is developed on the basis of a balanced compensation bridge measuring circuit.

The control action in the device is formed by the phase of the unbalancing signal.

The structural diagram of the converter is presented and the algorithm of its operation is described. The process of forming a measuring output signal proportional to the sensor working capacitance in the circuit is considered.

The use of a capacitive sensor with coplanar parallel electrodes and the proposed secondary measuring transducer will ensure high accuracy and resolution when measuring the air gap.

Keywords: hydro generator, air gap, capacitive sensor, measuring transducer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Адрес для переписки:

Е.А. Зайцев
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Address for correspondence:

I.O. Zaitsev
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:

А.С. Левицкий, Е.А. Зайцев, В.А. Березниченко, А.Е. Сухорукова.
Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора
воздушного зазора в гидрогенераторе.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 1. – С. 33–41.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

For citation:

A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Bereznychenko, O.E. Sukhorukova.
[Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor
in Hydrogenerator].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Введение

Одним из самых опасных дефектов крупных гидрогенераторов (ГГ) является нарушение формы и изменение величины воздушного зазора между ротором и статором [1–3]. Такой дефект может привести к серьёзным авариям с задеванием ротора за статор, разрушением обмоток, стали статора и полюсов. Появление дефекта вызывается воздействием различных явлений в машине. Согласно [1, 2] воздушные зазоры между статором и ротором в гидрогенераторах в диаметрально противоположных точках не должны отличаться друг от друга более чем на 20 % от среднего значения, если инструкциями изготовителя не предусмотрены более жёсткие нормы. Для капсульных ГГ, в которых воздушный зазор составляет всего несколько миллиметров, отклонение зазора от нормируемых значений является особенно опасным.

Поэтому для обеспечения нормального функционирования ГГ величину воздушного зазора необходимо контролировать как при периодических осмотрах, так и, что особенно важно, в процессе эксплуатации.

В настоящее время известны измерители воздушного зазора, принцип действия которых основан на различных принципах. Так в работе [4] описаны ультразвуковые измерители, состоящие из двух пар ультразвуковых преобразователей, устанавливаемых в вентиляционных каналах статора ГГ. Однако такие приборы можно применять только на остановленной машине, так как сильные магнитные поля, существующие во время работы машины, окажут разрушающее воздействие на первичные преобразователи. В работе [5] описана система контроля воздушного зазора больших низкоскоростных синхронных ГГ, в которой применены индуктивные сенсоры. Так как эти сенсоры в своем составе содержат намотанные катушки, то их также нельзя использовать на работающем ГГ.

Среди современных измерителей воздушного зазора мощных электрических машин (в том числе и ГГ) наибольшее распространение получили измерители с использованием ёмкостных сенсоров [6–9]. Сенсоры этих систем помещаются в зазор между статором и ротором ГГ и закрепляются на расточке сердечника статора. Достаточная информативность контроля с использованием этих систем, особенно при контроле формы сердечника, достигается за счёт

определённого количества сенсоров. Так с использованием системы *AGMS* [6] для определения состояния воздушного зазора ГГ с ротором до 7,5 м в диаметре рекомендуется использовать четыре сенсора, от 7,5 до 12 м – восемь сенсоров, более 12 м – двенадцать или шестнадцать сенсоров.

Однако конструктивные особенности сенсоров и некоторые технические характеристики ёмкостных измерителей не удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к приборам, предназначенным для использования на ГГ с малым номинальным воздушным зазором (например, капсульных ГГ типа СГК 538/160-70 [2]). Кроме этого, в паспортах измерителей не указывается такой параметр, как быстродействие. А этот параметр, который в большой степени определяет достоверность измерения зазора, зависит от числа оборотов ротора машины, числа полюсов и диаметра расточки сердечника статора.

Результаты исследований ёмкостного измерителя зазора, представленного в работе [2], дают возможность разработать сенсор, который может быть использован в ГГ любого типа с номинальным зазором до 50 мм. Сенсор представляет собой пластину, на которой сформированы рабочий потенциальный электрод и охранный электрод. Охранный электрод расположен вокруг потенциального электрода и имеет такой же потенциал, но гальванически с ним не связан. При контроле измеряют электрическую ёмкость между рабочим потенциальным электродом и заземленным полюсом ротора ГГ. Такая геометрия и потенциалы электродов создают равномерное поле в зазоре измерительного конденсатора, что даёт возможность устранить влияние краевых эффектов на точность измерения. Устройство имеет высокие метрологические характеристики, в том числе и быстродействие, но его недостатком является сложность вторичного измерительного преобразователя.

На рисунке 1 представлена схема установки ёмкостных сенсоров воздушного зазора на расточке сердечника статора ГГ типа СГК 538/160-70М, в котором номинальный воздушный зазор составляет 6 мм [2].

В работе [10] проведены исследования, позволяющие разработать ёмкостный сенсор зазора, выполненный в виде двух параллельных компланарных электродов с некоторым заземлённым промежутком между ними. Электрическая ёмкость между компланарными электродами

изменяется практически линейно с изменением зазора. Используя результаты исследований, соответствующим образом изменяя геометрию электродов, можно создать сенсор также на диапазон измерения до 50 мм.

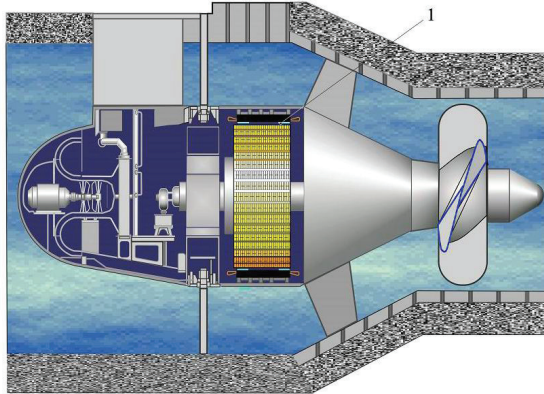


Рисунок 1 – Схема установки ёмкостных сенсоров зазора на сердечнике статора гидрогенератора SGK 538/160-70: 1 – ёмкостные сенсоры

Figure 1 – Installation diagram of capacitive gap sensors on the stator core of the hydrogenerator SGK 538/160-70: 1 – capacitive sensor

Для работы с сенсором данного типа был разработан вторичный преобразователь на основе микросхемы AD7745, преобразующей ёмкость сенсора в 24-разрядный код. Главным преимуществом устройства является то, что вторичный преобразователь конструктивно размещается непосредственно на пластине сенсора, рядом с его электродами, что позволяет сводить к минимуму влияние паразитных наводок. Недостатком устройства является наличие значительной динамической погрешности, обусловленной скоростью вращения ротора машины и размерами полюсов ротора. Поэтому измеритель зазора такого типа в основном может быть использован при осмотрах и ремонтах машины, т. е. при малых скоростях вращения ротора.

Целью данной работы являлась разработка вторичного измерительного преобразователя, обеспечивающего точность и разрешающую способность, для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Ёмкостный сенсор

Конструктивная схема ёмкостного сенсора с компланарными параллельными электродами показана на рисунке 2 [10].

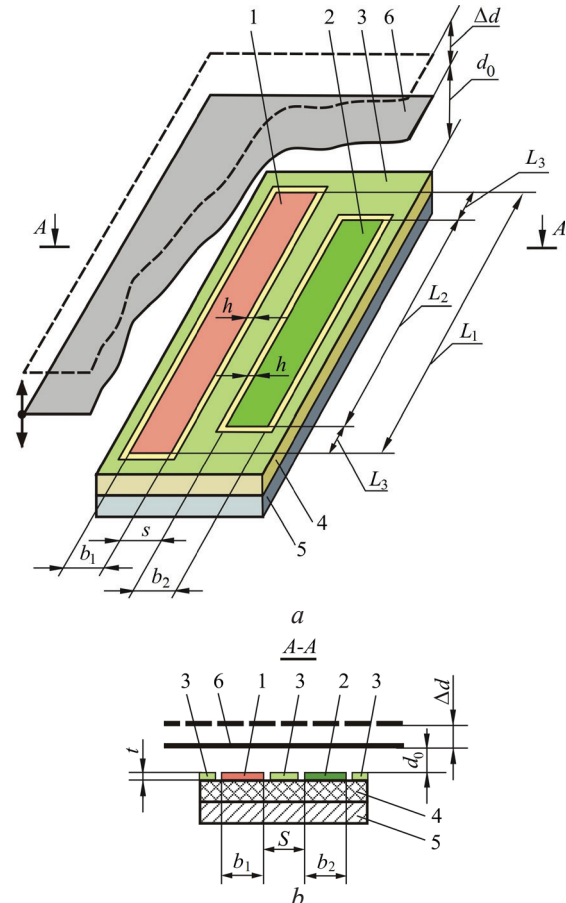


Рисунок 2 – Конструктивная схема ёмкостного сенсора зазора с двумя компланарными параллельными электродами: *a* – общий вид сенсора; *b* – поперечный разрез сенсора; 1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – низкопотенциальный охранный электрод; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – металлическая подложка; 6 – заземлённый полюс ротора; L_1 – длина электрода 1; L_2 – длина электрода 2; $L_3 = 0,5(L_1 - L_2)$; b_1 – ширина электрода 1; b_2 – ширина электрода 2; s – расстояние между электродами 1 и 2; d_0 – начальное расстояние (начальный зазор) между общей плоскостью электродов 1, 2, 3 и полюсом ротора 6; Δd – изменение зазора d_0 ; h – изоляционные промежутки между электродами 1, 2, 3; t – толщина тонкоплёночных металлических электродов 1, 2, 3

Figure 2 – Capacitive gap sensor design with two coplanar parallel electrodes: *a* – sensor general view; *b* – sensor cross section; 1 – high potential electrode; 2 – low potential electrode; 3 – low potential guard electrode; 4 – dielectric substrate; 5 – metal plate; 6 – grounded rotor pole; L_1 – length of electrode 1; L_2 – length of electrode 2; $L_3 = 0.5(L_1 - L_2)$; b_1 – the width of the electrode 1; b_2 – the width of the electrode 2; s – the distance between the electrodes 1 and 2; d_0 – the initial distance (initial gap) between the common plane of the electrodes 1, 2, 3 and the pole of the rotor 6; Δd – change in clearance; h – insulating gaps between the electrodes 1, 2, 3; t – thickness of thin-film metal electrodes 1, 2, 3

Электрическая ёмкость C_{12} между электродами 1 и 2 изменяется с изменением расстояния $d = d_0 \pm \Delta d$ между общей плоскостью электродов 1, 2, 3 и полюсом ротора 6. Часть ёмкости C_{12} через диэлектрическую подложку 4 составляет ничтожно малую величину, зависящую от материала и толщины сенсора.

Переменная (информативная) часть ёмкости при выполнении условий $L_3 \gg d_0$, $h \rightarrow 0$, $t \rightarrow 0$, $b_1 = b_2 = b$ определяется выражением:

$$C_{12} = L_2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\epsilon_r = 1,00056$).

Вторичный измерительный преобразователь

Измерители, в состав которых входят ёмкостные сенсоры с компланарной системой электродов, в основном применяются для неразрушающего контроля материалов при одностороннем доступе [11–19]. Так, работа [11] посвящена теоретическим основам создания измерителей влажности ортотропных материалов (волокон, лент, бумаги, шпона и др.), [14] – измерителей влажности человеческой кожи, [15] – приборов контроля композитных авиационных материалов, [17] – приборов контроля качества бетонных плит, [16, 19] – приборов для исследования многослойных диэлектриков. К сожалению, результаты этих исследований применить для решения задачи измерения перемещений заземлённой плоской поверхности относительно общей плоскости двух компланарных не представляется возможным.

В данной работе для сенсора с компланарными параллельными электродами предлагается вторичный преобразователь, обеспечивающий высокие метрологические характеристики, в том числе точность, разрешающую способность и быстродействие. В устройстве ёмкость сенсора преобразуется в постоянное напряжение. Основой устройства является уравновешенная компенсационно-мостовая цепь с формированием управляющего воздействия по фазе сигнала

неравновесия [20]. Поскольку ёмкость сенсора относительно мала, при разработке были приняты меры по защите измерителя от паразитных ёмкостей и от помех, в том числе коммутационных.

Упрощённая блок-схема устройства приведена на рисунке 3.

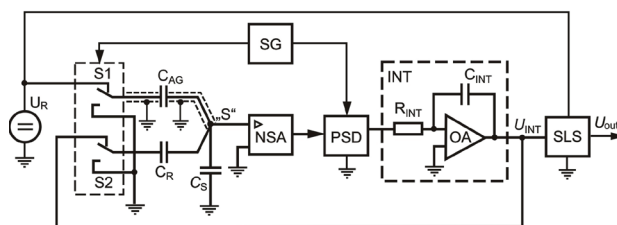


Рисунок 3 – Блок-схема преобразователя электрической ёмкости датчика воздушного зазора в постоянное напряжение: U_R – источник опорного напряжения; $S1, S2$ – коммутаторы; SG – коммутационный генератор; C_{AG} – ёмкостный сенсор воздушного зазора в гидрогенераторе; C_R – образцовый конденсатор; NSA – усилитель сигнала неравновесия; C_S – паразитная шунтирующая ёмкость; PSD – фазочувствительный детектор; INT – интегратор; R_{INT} – резистор интегратора; C_{INT} – конденсатор интегратора; SLS – схема линейного масштабирования

Figure 3 – Block diagram of the converter for the electrical capacitance of the air gap sensor to direct voltage: U_R – reference voltage source; $S1, S2$ – switches; SG – switching generator; C_{AG} – capacitive air gap sensor in hydro generator; C_R – reference capacitor; NSA – nonequilibrium signal amplifier; C_S – parasitic shunt capacitance; PSD – phase sensitive detector; INT – integrator; R_{INT} – integrator resistor; C_{INT} – integrator capacitor; SLS – linear scaling scheme

В предложенном измерителе стабилизированное постоянное напряжение U_R опорного источника U_R с помощью коммутатора $S1$ преобразуется в прямоугольное напряжение (меандр) с частотой f_{SG} (75–80 кГц) коммутационного генератора SG . Напряжение меандра с амплитудой, равной U_R , подаётся на сенсор воздушного зазора C_{AG} , ёмкость которого является одним из плеч схемы сравнения. Другое плечо схемы сравнения – образцовый конденсатор C_R , на который с выхода интегратора INT через другой коммутатор $S2$ подаётся прямоугольное напряжение амплитудой U_{INT} . Ток, протекающий через ёмкость сенсора C_{AG} , в точке «s» на входе усилителя сигнала неравновесия NSA суммируется с током, протекающим через ёмкость образцового конденсатора C_R . К этой же точке «s» подключена шунтирующая ёмкость C_S , которая является паразитной

ёмкостью между центральной жилой подводящего экранированного провода сенсора C_{AG} и землёю. Входное сопротивление NSA приближается по характеру к ёмкостному, поэтому делитель из элементов C_S , C_R и C_S передаёт меандр напряжения без искажений, а сигнал неравновесия в точке «s» либо синфазен, либо противофазен сигналу управления коммутаторами $S1$ и $S2$. Работа этих коммутаторов и полярности напряжений U_R и U_{INT} согласованы так, что токи через конденсаторы C_{AG} и C_R находятся в противофазе друг с другом и благодаря этому взаимно вычитаются. При определённом соотношении ёмкостей и напряжений суммарный ток обращается в ноль, при этом в точке «s» (на входе NSA) переменная составляющая с частотой f_{SG} отсутствует. Нетрудно видеть, что это соотношение выражается формулой:

$$\frac{U_{INT}}{U_R} = \frac{C_{AG}}{C_R}, \quad (2)$$

откуда

$$C_{AG} = \frac{U_{INT}}{U_R} C_R. \quad (3)$$

При нарушении соотношения (2) возникает сигнал неравновесия, который после прохождения через усилитель NSA поступает на фазочувствительный детектор PSD . Опорные напряжения PSD синхронны и синфазны с напряжениями коммутации ключей $S1$ и $S2$, они поступают от того же коммутационного генератора SG , который управляет работой ключей. Выходное напряжение детектора PSD содержит постоянную составляющую, знак которой зависит от направления отклонения схемы от состояния равновесия, а величина – от степени этого отклонения. К выходу PSD подключён интегратор INT , состоящий из резистора R_{INT} , конденсатора C_{INT} и операционного усилителя ОА. Напряжение U_{INT} на выходе интегратора является выходным сигналом схемы, оно пропорционально измеряемой ёмкости сенсора C_{AG} (см. выражение (3)). Далее оно поступает на схему линейного масштабирования SLS , где нормируется для приведения к требуемому диапазону изменения, т. е. когда $C_{AG} = 0$, то $U_{OUT} = 0$, а когда $C_{AG} = C_{AGmax}$, то $U_{OUT} = 10$ В.

На рисунке 4 показаны эпюры напряжений, действующих в схеме.

При равновесии:

$$U_{INT} = U_R \frac{C_{AG}}{C_R}. \quad (4)$$

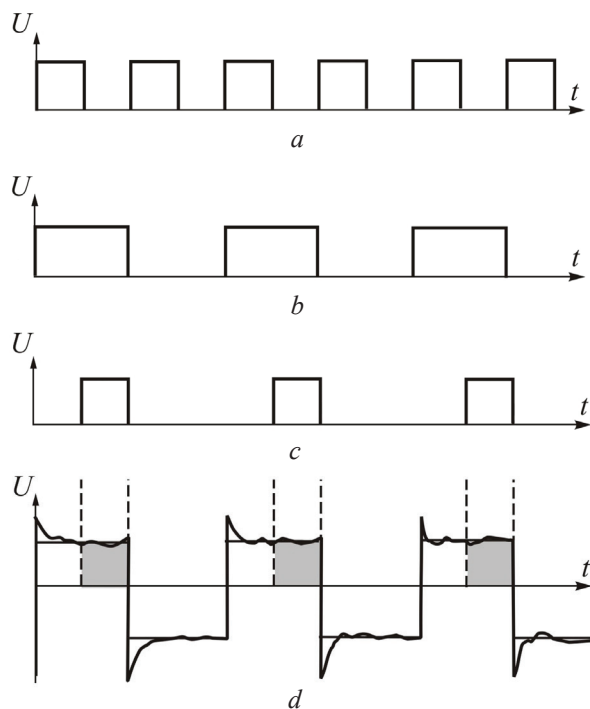


Рисунок 4 – Эпюры напряжений, действующих в преобразователе: a – напряжение задающего генератора в схеме коммутационного генератора SG ; b – напряжение, подаваемое на входы управления коммутаторов $S1$ и $S2$; c – сигнал управления ключами PSD ; d – условный сигнал неравновесия на выходе NSA

Figure 4 – Electrical voltage diagrams acting in the converter: a – the voltage of the driver oscillator in the switching generator SG circuit; b – voltage at the control inputs of the switches $S1$ and $S2$; c – the key control signal PSD ; d – conditional output disequilibrium signal NSA

Если учесть, что в схеме линейного масштабирования U_{INT} преобразуется в U_{OUT} пропорционально коэффициенту k , то на выходе схемы будет постоянное напряжение, равное:

$$U_{INT} = kU_{INT} = kU_R \frac{C_{AG}}{C_R}. \quad (5)$$

В моменты срабатывания коммутаторов $S1$ и $S2$ на входе NSA возникают импульсы коммутационной помехи, которые вызывают в усилителе значительные переходные процессы. С целью уменьшения влияния этих процессов на работу устройства, в PSD используется не весь сигнал неравновесия, а только вторая половина каждого его полупериода (выделено затемненным фоном), свободная от коммутационной

помехи, т. е. реализуется метод весовой функции. Для упрощения на эпюрах показаны только сигналы прямого действия, хотя в схеме сформированы также еще и инверсные к ним напряжения (детектирование в *PSD* двухполупериодное).

На основе блок-схемы разработана принципиальная электрическая схема преобразователя и изготовлен экспериментальный образец измерителя воздушного зазора в капсульном ГГ типа СГК 538/160-70М. Проведенные лабораторные испытания образца подтвердили его работоспособность и основные характеристики. Испытания образца (в том числе и на быстродействие) были проведены на специально разработанном стенде.

Следует отметить, что предложенный в работе преобразователь может быть использован и с емкостным сенсором радиального биения цилиндрических поверхностей валов гидроагрегатов, который описан в работе [21].

Заключение

Разработан вторичный измерительный преобразователь для емкостного сенсора, образованного компланарными параллельными электродами и предназначенного для измерения воздушного зазора между статором и ротором в мощных гидрогенераторах.

Преобразователь обеспечивает погрешность измерения рабочей емкости сенсора зазора не более, чем 0,2–0,5 % и быстродействие в несколько тысяч измерений в секунду. Это даёт возможность измерять воздушный зазор между статором и ротором в мощных гидрогенераторах любого типа в динамическом режиме, т. е. при рабочей скорости вращения машин.

Список использованных источников

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

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

3. *Cerpinska, M.* Dynamic air gap change of low-speed generator considering thermal expansion, centrifugal force and magnetic force effects / M. Cerpinska, R. Elmanis-Helmanis // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2017. – No. 5. – P. 26–37.

DOI: 10.1515/lpts-2017-0031

4. *Adamowski, J.C.* Ultrasonic dynamic air-gap monitoring system for large hydro-generators / J.C. Adamowski [et al.] // In IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013, Prague, Czech Republic. 21–25 July 2013. – P. 1311–1314.

DOI: 10.1109/ULTSYM.2013.0335

5. *Kokoko, O.* Analysis of air-gap influence on a large hydro generator's parameters using sud-den symmetrical short-circuit test / O. Kokoko [et al.] // In 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 10–13 May 2015. – P. 102–107.

DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409044

6. VM™6.1 Capacitive Air Gap Measuring Chains. User's Manual. VibroSystM, Canada, 2017, 12 p.

7. 4000 Series Air Gap Sensor System Datasheet Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. BentlyNevada, Nevada USA, 2019, 18 p.

8. Iris power capacitive air gap sensors. Iris Power, Canada, 2016, 4 p.

9. Air Gap Measuring System LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Vibro-Meter SA, Switzerland, 2012, 4 p.

10. *Левицкий, А.С.* Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М / А.С. Левицкий, С.О. Зайцев, Б.А. Кромпляс // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук. – 2016. – № 43. – С. 134–136.

11. *Джежора, А.А.* Электроемкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: Белорусская наука. – 2008. – 305 с.

12. *Xiaohui, H.* Planar capacitive sensors – designs and applications / H. Xiaohui, Y. Wuqiang // Sensor Review. – 2010. – No. 30(1). – P. 24–39.

DOI: 10.1108/02602281011010772

13. *Mamishv, A.V.* Interdigital Sensors and Transducers / A.V. Mamishv [et al.] // Proceeding of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, no. 5. – P. 808–845.

DOI: 10.1109/JPROC.2004.826603

14. *Yonggang, H.* Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing. Sensors and Actuators / H. Yonggang [et al.] // A203: Physical. – 2013. – P. 149–153. DOI: 10.1016/j.sna.2013.08.037

15. *Amr, N.A.* Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems / N.A. Amr, W. Wael // Journal of Reinforced Plastics and Composite. – 2011. – No. 30(7). – P. 621–629.

DOI: 10.1177/0731684411399944

16. *Chen, T.* Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures / T. Chen. – Iowa: Iowa State University. – 2012. – 204 p.

17. *Sheiretov, Y.* Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric / Y. Sheiretov, M. Zahn //

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12, no. 5. – P. 993–1004.

DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522192

18. Xiaobei, Li. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / Li. Xiaobei [et al.] // IEEE Sensors journal. – 2006. – Vol. 6, no. 2. – P. 434–440. **DOI:** 10.1109/JSEN.2006.870161

19. Chen, T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multilayered dielectric structures / T. Chen, N. Bowler // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – Vol. 17, no. 4. – P. 1307–1318.

DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703

20. Новик, А.И. Особенности построения измерительных цепей для работы с ёмкостными датчиками / А.И. Новик [и др.] // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 66–70.

21. Zaitsev, Ie.O. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface / Ie.O. Zaitsev [et al.] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – Vol. 78, no. 2. – P. 173–180.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80

References

1. Alekseev B.A. *Opređenje sostoyaniya (diagnostika) krupnykh gidrogeneratorov* [Determining the status (diagnostics) of large hydro generators]. ENAS, 2002, 144 p.

2. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gruboj O.P. *Kontrol stanu potuzhnykh hidro- ta turbogeneratoriv za dopomohoyu yemnisnykh vymiryuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv* [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.

3. Cerpinska M., Elmanis-Helmanis R. Dynamic air gap change of low-speed generator considering thermal expansion, centrifugal force and magnetic force effects. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2017, no. 5, pp. 26–37. **DOI:** 10.1515/lpts-2017-0031

4. Adamowski J.C., Souza A.T., Perez N., Lima A.A., Oda P.D., Tiba H.H. Ultrasonic dynamic air-gap monitoring system for large hydro-generators. *In IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*, 2013, Prague, Czech Republic, 21–25 July 2013, pp. 1311–1314.

DOI: 10.1109/ULTSYM.2013.0335

5. Kokoko O., Merkhof A., Tounzi A., Al-Haddad K., Guillot E. Analysis of air-gap influence on a large hydro generator's parameters using sudden symmetrical short-circuit test. *In 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 10–13 May 2015, pp. 102–107.

DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409044

6. VM™6.1 Capacitive Air Gap Measuring Chains. User's Manual. VibroSystM, Canada, 2017, 12 p.

7. 4000 Series Air Gap Sensor System Datasheet Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. BentlyNevada, Nevada USA, 2019, 18 p.

8. Iris power capacitive air gap sensors. Iris Power, Canada, 2016, 4 p.

9. Air Gap Measuring System LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Vibro-Meter SA, Switzerland, 2012, 4 p.

10. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. *Viznachennya funktsiyi peretvorennya Emnisnogo sensora povitryanogo zazoru v gidrogeneratori SGK 538/160-70M* [Determination of the response characteristic of the capacitive sensor of the air gap in the hydrogenerator SGK 538/160-70M]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2016, no. 43, pp. 134–137 (in Ukrainian).

11. Jezhora A.A. *Elektroemkostnye preobrazovateli i metody ikh rascheta* [Electrocapacitance Transducers and Methods of Their Calculation]. Minsk: Bel. Nauka Publ., 2007, 305 p.

12. Xiaohui H., Wuqiang Y. Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*, 2010, no. 30(1), pp. 24–39. **DOI:** 10.1108/02602281011010772

13. Mamishev A.V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y., Zahn M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proceeding of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 808–845. **DOI:** 10.1109/JPROC.2004.826603

14. Cheng H., Yihui Z., Xian H., John A.R., Yonggang H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing. *Sensors and Actuators A203: Physical*, 2013, pp. 149–153.

DOI: 10.1016/j.sna.2013.08.037

15. Amr N.A., Wael W. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, 2011, no. 30(7), pp. 621–629.

DOI: 10.1177/0731684411399944

16. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures. *Iowa State University*, 2012, 204 p.

17. Sheiretov Y., Zahn M. Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 5, pp. 993–1004.

DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522192

18. Xiaobei Li, Larson S., Zyuzin A., Mamishev A.V. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors. *IEEE Sensors journal*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 434–440. **DOI:** 10.1109/JSEN.2006.870161

19. Chen T., Bowler N. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation

of multilayered dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 1307–1318.

DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703

20. Novik A.I., Kolupaev Yu.P., Nuzhnenko V.V., Stadnik A.V. *Osobennosti postroeniya izmeritelnykh tsepey dlya raboty s emkostnyimi datchikami* [Features of construction of meter circuits for use with capacitive

sensors]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2005, no. 1, pp. 66–70 (in Russian).

21. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Berezhnychenko V.O., Smyrnova A.M. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78, no. 2. pp. 173–180.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80