

УДК 621.586.772; 621.313.32

Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора

Левицкий А.С.¹, Зайцев Е.А.¹, Кобзарь К.А.²

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

²Завод «Электротяжмаши»,
пр. Московский, 299, г. Харьков 61089, Украина

Поступила 25.01.2018

Принята к печати 04.05.2018

Безаварийная и эффективная работа мощных турбогенераторов в значительной степени зависит от стабильности их основных механических параметров, к которым относится давление прессовки сердечника статора. Целью работы являлось обоснование возможности применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора.

Состояние прессовки сердечника косвенным образом можно оценить, измеряя ход тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах, которые устанавливаются на стяжных призмах сердечника вместо стяжных гаек. Для измерения хода пружин предложено применение компланарного емкостного сенсора с секторальными электродами, который встраивается в конструкцию силовых аккумуляторов. Каждый сектор содержит свой элементарный сенсор, который размещен на кольцевой диэлектрической пластине и образован компланарными электродами, являющимися составной частью соосных концентрических колец, образующих компланарный емкостной сенсор. Сенсор состоит из высокопотенциального, низкопотенциального и заземленного электродов. Заземленный электрод расположен между высокопотенциальным и низкопотенциальным электродами, а также вокруг них.

Приведена упрощенная аналитическая модель расчета для получения аналитической зависимости изменения информативной составляющей электрической емкости сенсора от хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах. Достоверность модели и характеристики зависимости подтверждены экспериментально при испытании лабораторного образца емкостного сенсора.

Ключевые слова: турбогенератор, стабилизация давления прессовки сердечника статора, силовой аккумулятор, тарельчатая пружина, емкостный сенсор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А.
Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 121–129.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

For citation:

Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O.
[Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor].
Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor

Levytskyi A.S.¹, Zaitsev I.O.¹, Kobzar K.O.²

¹The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine

²State Enterprise plant «Electrotyazmsh»,
Moskovsky Ave., 299, Kharkiv 61089, Ukraine

Received 25.01.2018

Accepted for publication 04.05.2018

Abstract

The troubleproof and efficient work of powerful turbogenerators depends on the stability of their main mechanical parameters, which include the stator core pressing. The aim of the work was to describe the possibility of using a multielement capacitive sensor with coplanar electrodes to measure the movement of disk springs of the stabilizer systems power batteries in the turbogenerator stator core.

The state of the core pressurizer can be indirectly assessed by measuring the displacement of the disk springs in power accumulators, which are installed on the tightening prism of the core instead of the compression nuts. To measure the movement of springs, a coplanar capacitive sensor with sectoral electrodes built into the power accumulators design is proposed. Each sector contains its own elementary sensor formed by coplanar electrodes. Each elementary sensor in each sector is placed on an annular dielectric plate and is formed by coplanar electrodes that are part of coaxial concentric rings. The sensor consists of a high-potential, low-potential and grounded electrodes. A grounded electrode is located between the high-potential and low-potential electrodes, as well as around them.

A simplified analytical calculation model for obtaining the analytical response characteristic of the change in the informative component of the sensor electric capacity on the course of the disk springs in the CA is presented. The reliability of the model and the response characteristics are confirmed experimentally by testing a laboratory prototype of a capacitive sensor.

Keywords: turbogenerator, stabilization of the pressure of pressing the stator core, power accumulator, cone disk spring, capacitive sensor.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Адрес для переписки:

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

Для цитирования:

Левицкий А.С., Зайцев Е.А., Кобзарь К.А.
Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 2. – С. 121–129.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Address for correspondence:

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

For citation:

Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kobzar K.O.
[Measuring the stroke of cone disk springs in power accumulators of the turbogenerator stator core using a capacitive sensor].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129

Введение

Безаварийная и эффективная работа мощных турбогенераторов (ТГ) в значительной степени зависит от стабильности их основных механических параметров, к которым относится давление прессовки сердечника статора. Снижение давления представляет большую опасность и ограничивает работоспособность ТГ [1, 2].

Основными причинами снижения среднего давления прессовки являются самоотвинчивание гаек стяжных призм и неизбежная усадка шихтованных пакетов сердечника, состоящего из лакированных листов, в результате упруговязкого течения лаковых пленок, т.е. процесса старения сердечника.

Самым простым способом ликвидации ослабления прессовки сердечника является ручная подтяжка гаек на стяжных призмах [2]. Гайки подтягивают специальным ключом, создавая нормированный крутящий момент. Подтяжку начинают с той стороны машины, где обнаружилось ослабление. При этом контроль подтяжки осуществляют, измеряя величину аксиального зазора между нажимной плитой и элементами корпуса статора. По понятным причинам такой способ является субъективным и малопроизводительным.

В работе [3] описан способ восстановления давления прессовки сердечника ТГ путем автоматической подтяжки каждой гайки червячным редуктором с электроприводом. Контроль процесса стабилизации при этом процессе производят, измеряя усилие в стяжных призмах с помощью волоконно-оптических сенсоров на основе решеток Брега, наклеенных на специальную коническую шайбу, устанавливаемую под стяжными гайками [4]. Также для подтяжки гаек могут использоваться гидравлические устройства с автоматическим контролем процесса стабилизации давления прессовки дифференциальными трансформаторными датчиками линейных перемещений типа *LVDT* (*linear voltage differential transformer*), измеряющих осевое смещение нажимной плиты ТГ [5]. Оба способа стабилизации прессовки сердечника очень сложные и дорогие при их практическом использовании на эксплуатируемых ТГ.

Перспективным и сравнительно недорогим способом, который используется для стабилизации давления прессовки сердечника статора ТГ, является применение силовых аккумуляторов

(СА) с блоками тарельчатых пружин – специальных пружинных устройств с заданным и регулируемым усилием, устанавливаемых вместо гаек на стяжные призмы [6–13]. Первые СА были разработаны для ТГ типа ТГВ и могли быть установлены только в процессе изготовления статора. В дальнейшем были созданы СА, позволяющие монтаж как на заводе, так и при модернизации сердечника активной стали в условиях станции – до укладки обмотки. Такие СА применены для ТГ типа ТВВ-220-2 и ТВВ-320-2, наиболее подверженных повреждению торцевых зон, и установлены на АЭС Финляндия и Греции, на ГРЭС – Костромской, Киришской, Азербайджанской, Лукомльской и др. [11]. При этом контроль процесса стабилизации давления прессовки осуществляют, измеряя стандартными мерительными инструментами смещение нажимной плиты или отдельных частей СА [9].

В работе [10] предложена конструкция СА, в котором для контроля степени стабилизации давления прессовки используется емкостный сенсор хода тарельчатых пружин. В сенсоре с переменным зазором одним из электродов является заземленный элемент СА (металлическое нажимное кольцо), а вторым – тонкий проводящий слой на диэлектрической пластине, жестко связанной с неподвижной частью СА. По мере усадки шихтованных пакетов сердечника тарельчатые пружины СА будут распрямляться, перемещая при этом нажимное кольцо и соответственно изменяя зазор в измерительном конденсаторе. Измеряя емкость сенсора C_0 при зазоре d_0 (когда пружины сжаты) и емкость C_X при изменившемся во время хода пружин зазоре d_X , рассчитывают ход блока пружин ΔL :

$$\Delta L = d_0 - d_X = \pi \varepsilon_A \varepsilon_0 S \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_X} \right), \quad (1)$$

где $\varepsilon = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε_A – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздуха); S – площадь проводящего слоя на диэлектрической пластине.

Недостатками предложенного в [10] устройства является необходимость применения специального трансформатора, вторичная обмотка которого наматывается экранированным кабелем, что дорого и нетехнологично особенно с учетом конструктивных особенностей СА и места монтажа измерительных преобразователей на ТГ.

К тому же в данном случае между сенсором и вторичным преобразователем необходимо использовать дорогой триаксиальный кабель (с двойным экраном). Указанные выше недостатки минимизируются в схемах с компланарными емкостными сенсорами.

Целью работы являлось обоснование возможности устранения указанных выше недостатков посредством применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора.

Результаты исследования

В данной работе для использования в качестве измерителя хода упомянутых пружин рассматривается емкостный сенсор с секторными компланарными электродами, вторичным преобразователем для которого можно использовать простой конвертор «емкость-код», выпускаемый в виде интегральной микросхемы, например ИМС фирмы *Analog Devices AD7745/46* [14].

На рисунке 1 представлена конструкция СА, в котором для измерения хода тарельчатых пружин предложено вместо емкостного сенсора с переменным зазором [10] использовать многоэлементный емкостный сенсор с компланарными электродами.

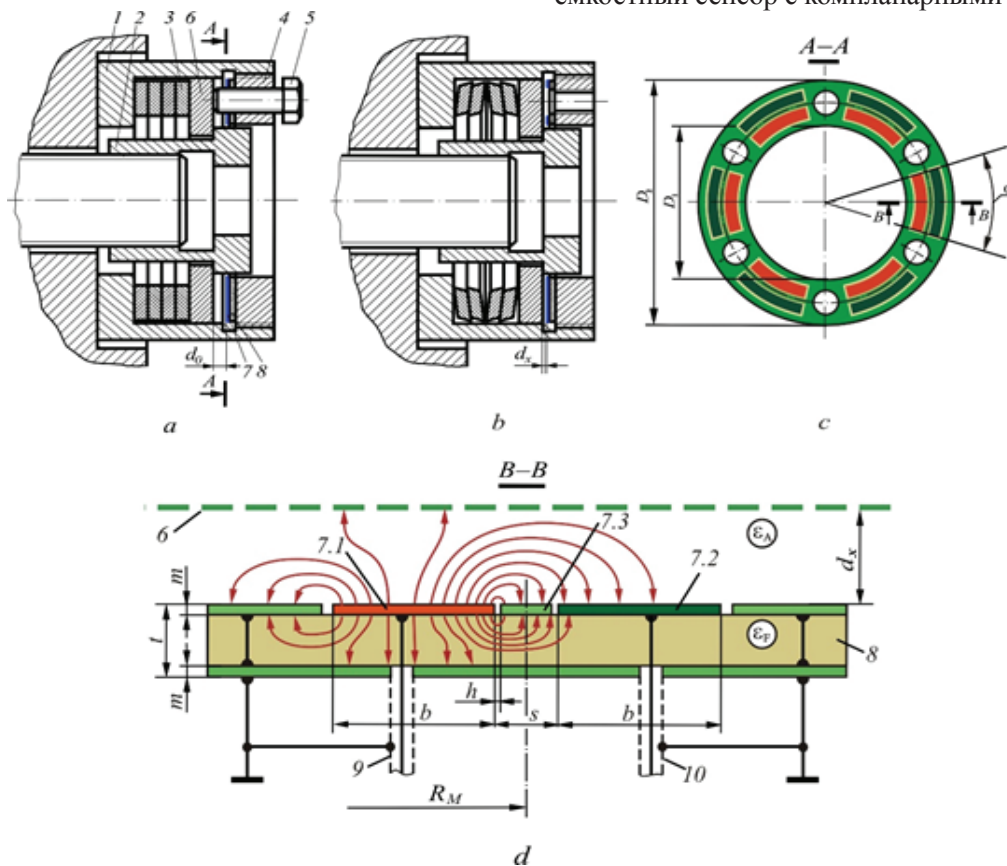


Рисунок 1 – Силовой аккумулятор с емкостным сенсором хода тарельчатых пружин: *a* – аккумулятор с полностью сжатыми тарельчатыми пружинами; *b* – аккумулятор с разжатыми тарельчатыми пружинами; *c* – многоэлементный емкостный сенсор с компланарными электродами; *d* – электрическое поле в емкостном сенсоре; *A-A* – поперечное сечение силового аккумулятора; *B-B* – радиальное сечение пластины емкостного сенсора; 1 – корпус СА; 2 – стяжная гайка; 3 – тарельчатые пружины; 4 – упорное кольцо; 5 – фиксирующие болты; 6 – металлическое нажимное кольцо; 7 – электропроводящий слой электродов емкостного сенсора; 7.1 – высокопотенциальный электрод сенсора; 7.2 – низкопотенциальный электрод сенсора; 7.3 – заземленный электрод сенсора; 8 – диэлектрическая пластина; 9, 10 – экранированные кабели

Figure 1 – The power accumulator with the capacitive motion sensor of cone disk springs: *a* – accumulator with fully compressed cone disc springs; *b* – accumulator with open cone disc springs; *c* – multi-element capacitive sensor with coplanar electrodes; *d* – electric field in a capacitive sensor; *A-A* – cross section of the power accumulator; *B-B* – radial section of capacitive sensor plate; 1 – body of power accumulator; 2 – coupling nut; 3 – cone disk springs; 4 – stop ring; 5 – fixing bolts; 6 – pressure ring; 7 – electrically conductive layer of electrodes of the capacitive sensor; 7.1 – high potential sensor electrode; 7.2 – low-potential sensor electrode; 7.3 – grounded electrode of the sensor; 8 – dielectric plate; 9, 10 – shielded cables

СА состоит из корпуса 1, гайки 2, тарельчатых пружин 3, упорного кольца 4, фиксирующих болтов 5, нажимного кольца 6 и диэлектрической пластины 8, которая жестко соединена с упорным кольцом 4. Пластина 8, которая выполнена в виде кольца с внутренним диаметром D_1 и внешним диаметром D_2 , содержит электропроводящий тонкий слой 7 (например, медный – при изготовлении пластины 8 из фольгированного диэлектрика).

В токопроводящем слое 7 сформированы (как правило, методом фотолитографии) элементарные емкостные сенсоры с компланарными электродами, которые являются частями концентрических колец (рисунок 1с, d). Разбивка концентрических колец на части (сектора) вызвана наличием отверстий для фиксирующих болтов. Угловой размер каждого i -го сенсора при этом равен α .

Каждая секция содержит один элементарный сенсор, который состоит из следующих основных частей: высокопотенциального электрода 7.1 шириной b , низкопотенциального электрода 7.2 такой же ширины b , между которыми размещен заземленный охранный электрод 7.3 шириной $(s-2h)$. Радиус средней линии электродов 7.1, 7.2 и 7.3 равен R_M (рисунок 1d). Электроды 7.1, 7.2 и 7.3 изолированы друг от друга тонкими промежутками, минимальная ширина h которых зависит от технологии изготовления и в исследуемом случае составила $h = 0,1$ мм. Картина электрического поля в радиальном сечении сенсора показана на рисунке 1d. Для того чтобы двумерное электрическое поле между электродами в каждом радиальном сечении элементарного сенсора было одинаковой формы, необходимо определить оптимальные соотношения между размерами b , s , R_M и α .

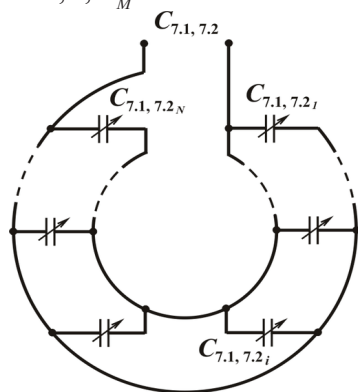


Рисунок 2 – Схема электрическая многоэлементного емкостного сенсора: $C_{7.1, 7.2i}$ – емкость элементарного компланарного сенсора

Figure 2 – Circuit diagram of an electric multi-cell capacitive sensor: $C_{7.1, 7.2i}$ – capacity of the elementary coplanar sensor

На рисунке 2 приведена электрическая схема многоэлементного емкостного сенсора.

При измерении общая электрическая емкость $C_{7.1, 7.2}$ сенсора определяется как сумма трех емкостей: емкости $C_{7.1, 7.2A}$ между электродами 7.1 и 7.2 через воздушный промежуток с диэлектрической проницаемостью ϵ_A , емкости $C_{7.1, 7.2F}$ между электродами 7.1 и 7.2 через стеклотекстолитовую подложку 8 с диэлектрической проницаемостью ϵ_F и паразитной емкости C_s (stray capacitance), обусловленной краевыми эффектами и емкостью линий связи между сенсором и вторичным измерительным преобразователем.

Емкость $C_{7.1, 7.2}$ изменяется с изменением расстояния d_x между общей плоскостью электродов 7.1, 7.1, 7.3 и торцевой поверхностью нажимного кольца 6, т.е. $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$. Емкость $C_{7.1, 7.2F}$ является постоянной величиной ($C_{7.1, 7.2F} = \text{const}$). Каждая из указанных емкостей состоит из суммы емкостей соответствующих элементарных сенсоров и рассчитывается аналитически. Паразитная емкость C_s определяется экспериментальным путем.

Методы расчета электрической емкости сенсоров с системой компланарных электродов изложены во многих работах [15–26]. В основном исследуются сенсоры, которые применяются для неразрушающего контроля материалов при одностороннем доступе [16–19, 21–26], а в [19, 20] приведены результаты расчета емкостных компланарных сенсоров приближения. Так, работа [16] посвящена теоретическим основам создания сенсоров контроля полимерных материалов, [17] – сенсоров влажности ортотропных материалов (волокон, лент, бумаги, шпона и др.), [21] – сенсоров влажности человеческой кожи, [22] – сенсоров качества бетонных плит, [23] – сенсоров контроля композитных авиационных материалов, [24, 26] – сенсоров для исследования многослойных диэлектриков. К сожалению, результаты этих исследований применить для решения задачи измерения перемещений заземленной плоской поверхности относительно общей плоскости двух компланарных электродов невозможно.

Так как ширина b электродов 7.1 и 7.2 (рисунок 1) значительно меньше среднего радиуса R_M , то, условно считая их параллельными, применим для расчета емкости между этими электродами результаты работ [27, 28].

Для расчета емкостей $C_{7.1, 7.2A}$ и $C_{7.1, 7.2F}$ используем формулу по определению емкости C_L на единицу длины между двумя бесконечными

компланарными параллельными электродами, разделенными низкочастотным охранным электродом:

$$C_L = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x}}, \quad (2)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; b – ширина электродов 7.1 и 7.2; s – расстояние между электродами 7.1 и 7.2; d_x – расстояния между общей плоскостью электродов 7.1, 7.2, 7.3 и торцевой поверхностью нажимного кольца 6.

Переменная емкость $C_{7.1, 7.2A}$ с учетом того, что длина суммарной средней линии между электродами 7.1 и 7.2 (рисунок 1с, d) равна $L_{7.1, 7.2} = N \cdot 2\pi R_M \frac{\alpha}{2\pi} = NR_M \alpha$, определяется как:

$$C_{7.1, 7.2A} = \varepsilon_0 \varepsilon_A \frac{\alpha}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d_x} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d_x}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_A = 1,00056$ – диэлектрическая проницаемость воздуха; N – количество элементарных сенсоров; α – угловой размер элементарного сенсора; R_M – радиус средней линии размещения электродов 7.2, 7.2 и 7.3 по кольцу.

График функции $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$ для значений: $N = 1$; $b = 7,5$ мм; $\alpha = 24^\circ$; $s = 1,4$ мм; $R_M = 65$ мм; $2 \text{ мм} \leq d_x \leq 6 \text{ мм}$ приведен на рисунке 3.

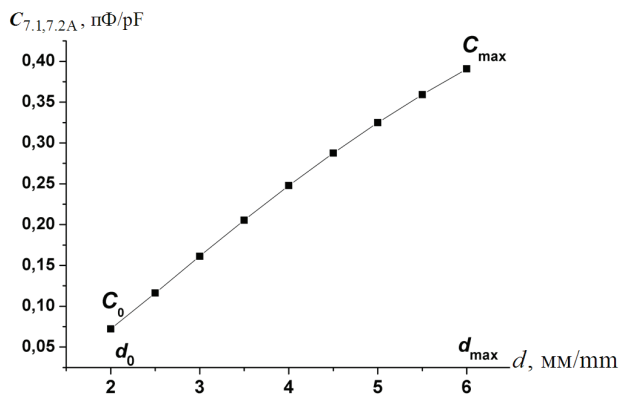


Рисунок 3 – График функции $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$

Figure 3 – Graph of a function $C_{7.1, 7.2A} = f(d_x)$

Практические результаты использования СА на ТГ мощностью 200–500 МВт показали, что при стабилизации усилия прессования сердечника статора нажимная плита смещается на 3–5 мм [1]. Из анализа зависимости (3) можно сделать вывод, что сенсор с заданными геометрическими размерами может быть использован для измерения хода блока тарельчатых пружин равном 4 мм. При этом начальное расстояние между плоскостью электродов сенсора и торцом нажимного кольца 6 составит 2 мм, а максимальное – 6 мм (рисунок 3).

Постоянная емкость $C_{7.1, 7.2F}$ при изготовлении сенсора из фольгированного двустороннего стеклотекстолита общей толщиной $t = 1$ мм, толщиной медного слоя $m = 35$ мкм, учитывая то, что относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита $\varepsilon_F = 5,5$, будет равна:

$$C_{7.1, 7.2F} = \varepsilon_0 \varepsilon_F \frac{\alpha}{\pi} NR_M \cdot \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4(t-2m)} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4(t-2m)}} = 0,030028 \text{ пФ}. \quad (4)$$

На рисунке 4 показаны результаты метрологических исследований экспериментального образца сенсора при использовании автоматического моста переменного тока Р5083 в качестве измерителя емкости. В результате проведенных исследований получена зависимость емкости сенсора $C_{7.1, 7.2}$ от расстояния d_x между плоскостью электродов и плоской заземленной металлической поверхностью (рисунок 4 кривая 1).

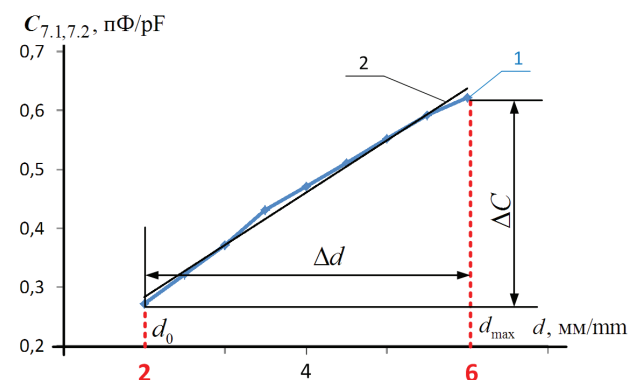


Рисунок 4 – Графики $C_{7.1, 7.2} = f(d_x)$: 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая зависимость $C_{7.1, 7.2} = 0,0884d_x + 0,1065$

Figure 4 – Graphs of the $C_{7.1, 7.2} = f(d_x)$: 1 – experimental data; 2 – approximating dependence $C_{7.1, 7.2} = 0,0884d_x + 0,1065$

Заключение

Обоснована возможность применения многоэлементного емкостного сенсора с компланарными электродами для измерения хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах систем стабилизации давления сердечника статора турбогенератора. В результате аналитических и экспериментальных исследований получены результаты, которые дают возможность спроектировать сенсор для силовых аккумуляторов с различным ходом тарельчатых пружин.

Применение указанного сенсора позволяет:

- улучшить контроль давления прессовки сердечника статора турбогенератора;
- оценить распределение усилий в стяжных призмах сердечника статора;
- повысить надежность и продлить срок службы турбогенератора;
- снизить стоимость обслуживания системы стабилизации давления прессовки;
- получить возможность проведения контроля давления прессовки сердечника статора турбогенератора в процессе его эксплуатации;
- спроектировать сенсор такого типа для силовых аккумуляторов с различным ходом тарельчатых пружин.

Список использованных источников

1. Голоднова, О.С. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов / О.С. Голоднова, Г.В. Ростик // Сборник «Электросила». – СПб. : Электросила, 2004. – № 43. – С. 56–64.
2. Голоднова, О.С. О причинах повреждений торцевых зон сердечников статоров турбогенераторов и мерах по их предупреждению / О.С. Голоднова, Г.В. Ростик // Энергетик. – 2005. – № 1. – С. 17–20.
3. United States Patent No. 9,016,991 B2. Int. Cl. F16B 31/02, H02 K1/16, H02 K11/00, 3P 19/06, G01L 1/24, G01L 5/24, G01 D 5/353. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core / Twerdochlib Michael (US), Edward David (US), Diatzikis Evangelos V. (US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. no. 13/863,473; Date of Patent Apr. 28, 2015.
4. Sanjeev, D. Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating – A. Review / D. Sanjeev, G. Vikas, G. Amit // Advanced Engineering Technology and Application. – 2015. – No. 2. – P. 15–25. doi: 10.12785/aeta/040202
5. United States Patent No. 7,946,023 B2. Int. Cl. H02K 15/00, H02F 3/04, H01R 31/28. Method and

apparatus for measuring compression in a stator core / James Allan Cook (Orlando, FL, US), David T. Allen (Longwood, FL, US); Assignee Siemens Energy, Inc. (Orlando, FL, US) – Appl. no. 11/285,834; Date of Patent May 24, 2011.

6. Paspalovski, T. Replacement (reconstruction) of the active steel end zone of the turbogenerator / T. Paspalovski, N. Mojsoska, N. Jovanovski, V. Jovanovska, Z.V. Sovreski // Proceeding 1-st Global Conference, April 8–12, 2013. – P. 659–663.

7. Jovanovska, V. Increasing the Power of the Turbogenerator in the Process Of Modernization in the Mining and Energy Industry / V. Jovanovska, M. Arapcheska // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2015. – Vol. 2, iss. 2. – P. 162–166.

8. Минко, А.Н. Оптимальная геометрия и массогабаритные параметры конструкции корпуса статора турбогенераторов с воздушной системой охлаждения / А.Н. Минко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 1. – С. 33–39.

9. Зозулін, Ю.В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю.В. Зозулін, О.С. Антонов, В.М. Бичік [та ін.]. – Х. : ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.

10. 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.

11. Иванов, В.В. О способе стабилизации плотности прессования активной стали турбогенераторов / В.В. Иванов, В.Н. Петров, Г.В. Ростик // Энергетик. – 2009. – № 8. – С. 29–30.

12. Paspalovski, T. Partial replacement of the active steel on the turbogenerator end zone / T. Paspalovski, V. Jovanovska // Termotechnika. – 2015. – XLI, 1. – P. 1–7.

13. Шевченко, В.В. Модернизация конструкций отечественных турбогенераторов с учетом требований поддержания их конкурентоспособности / В.В. Шевченко, А.Н. Минко // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 38 (1081). – С. 146–155.

14. Неболюбов, Е.Ю. Электронные преобразователи для работы с емкостными датчиками (аналоговые и цифровые) / Е.Ю. Неболюбов, А.И. Новик // Техническая электродинамика. – 2015. – № 3. – С. 67–74.

15. Baxter, L.K. Capacitive Sensors: design and applications / L.K. Baxter. – New York : IEEE Press, 1997. – 320 с.

16. Mamishev, A.V. Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation / A.V. Mamishev. – Cambridge : MIT, 1999. – 709 p.

17. Джежора, А.А. Электроемкостные преоб-

разователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 305 с.

18. 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

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

20. Yong, Y. Novel Method for Proximity Detection of Moving Targets Using a Large-Scale Planar Capacitive Sensor System / Y. Yong, D. Jiahao, S. Sanmin, H. Zhuo, L. Yuting // *Sensors (Basel)*. – 2016. – No. 16(5): 699. doi: 10.3390/s16050699

21. Cheng, H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing / H. Cheng, Z. Yihui, H. Xian, A.R. John, H. Yonggang // *Sensors and Actuators A203: Physical*. – 2013. – P. 149–153. doi: 10.1016/j.sna.2013.08.037

22. Amr, N.A. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems / A.N. Amr, W. Wael // *Journal of Reinforced Plastics and Composite*. – 2011. – No. 30(7). – P. 621–629. doi: 10.1177/0731684411399944

23. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures: A dissertation of doctor of philosophy: Electrical Engineering / T. Chen. – Iowa State University, 2012. – 204 p.

24. 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

25. Xiaobei, Li B. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / X. Li, S. Larson, A. Zyuzin, A.V. Mamishev // *IEEE Sensors journal*. – 2006. – Vol. 6, no. 2. – P. 434–440. doi: 10.1109/JSEN.2006.870161

26. 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, iss. 4. – P. 1307–1318. doi: 10.1109/TDEI.2010.5539703

27. Gorbova, G.M. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar micro-displacement sensor / G.M. Gorbova, M.M. Gorbov, G.C. Meijer // *Proceeding XVII IMECO World Congress, June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia*. – TC15. – P. 1965–1968.

28. Левицкий, А.С. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного засто-

ру в гідрогенераторі СТК 538/160-70М / А.С. Левицкий, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромплєс // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : зб. наук. пр.* – К. : ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 134–136.

29. Srbulov M. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples / M. Srbulov. – Netherlands : Springer, 2010. – 233 p.

Reference

1. Golodnova O.S., Rostik G.V. [Analysis and measures to prevent damage to the cores of stators of turbogenerators]. *Elektrosila*, 2004, no. 43, pp. 56–64 (in Russian).

2. Golodnova O.S., Rostik G.V. [On the causes of damage to the end zones of the cores of stators of turbogenerators and measures for their prevention]. *Energetic*, 2005, no. 1, pp. 17–20 (in Russian).

3. Twerdochlib M., Edward D., Diatzikis E.V. Bolt tightener device for tightening a through-bolt in a generator core. Patent U.S. no. 9016991, 2015.

4. Sanjeev D., Vikas G., Amit G. Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating – A Review. *Advanced Engineering Technology and Application*, 2015, no. 2, pp. 15–25. doi: 10.12785/aeta/040202

5. Cook J.A., Allen D.T. Method and apparatus for measuring compression in a stator core. Patent U.S. no. 7946023, 2011.

6. Paspalovski T., Mojsoska N., Jovanovski N., Jovanovska V., Sovreski Z.V. Replacement (reconstruction) of the active steel end zone of the turbogenerator. *Proceeding 1-st Global Conference*, April 8–12, 2013, pp. 659–663.

7. Jovanovska V., Arapcheska M. Increasing the Power of the Turbogenerator in the Process of Modernization in the Mining and Energy Industry. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, vol. 2, iss. 2, pp. 162–166.

8. Minko A.N. [Optimal geometry and mass-dimensional parameters of the stator housing structure of turbogenerators with an air cooling system]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2012, no. 1, pp. 33–39 (in Russian).

9. Zozulin Yu.V., Antonov O.E., Bichik V.M. & others. *Stvorenniya novykh typiv ta modernizatsiya diyuchykh turboheneratoriv dlya teplovykh elektrychnykh stantsiy* [Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal power stations]. Kharkiv, PF «Collegium» Publ., 2011, 228 p. (in Ukrainian).

10. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gruboj O.P. *Kontrol stanu potuzhnykh hidro- ta turboheneratoriv za dopomohoyu yemnisnykh vymiryuvachiv paramet-riv 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. (in Ukrainian).

11. Ivanov V.V., Petrov V.N., Rostik G.V. [On the method of stabilizing the pressing density of the active steel of turbogenerators]. *Energetic*, 2009, no. 8, pp. 29–30 (in Russian).

12. Paspalovski T., Jovanovska V. Partial replacement of the active steel on the turbogenerator end zone. *Termotechnika*, 2015, XLI 1, pp. 1–7.

13. Shevchenko V.V., Minko A.N. [Modernization of domestic turbogenerator designs taking into account the requirements of maintaining their competitiveness]. *News of NTU «KhPI»*, 2014, no. 38 (1081), pp. 146–155 (in Russian).

14. Nebolyubov E.Yu., Novik A.I. [Electronic converters for working with capacitive sensors (analog and digital)]. *Technical Electrodynamics*, 2015, no. 3, pp. 67–74 (in Russian).

15. Baxter L.K. Capacitive Sensors: design and applications. New York, IEEE Press, 1997, 320 p.

16. Mamishev A.V. Interdigital Dielectrometry Sensor Design and Parameter Estimation Algorithms for Non-Destructive Materials Evaluation, Cambridge, MIT, 1999, 709 p.

17. Jezhora A.A. *Elektroemkostnye preobrazovately i metody ikh rascheta* [Electrocapacitance Transducers and Methods of Their Calculation], Minsk, Belarus. Nauka Publ., 2007, 305 p. (in Russian).

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

19. 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

20. Yong Y., Jiahao D., Sanmin S., Zhuo H., Yuting L. Novel Method for Proximity Detection of Moving Targets Using a Large-Scale Planar Capacitive Sensor System. *Sensors (Basel)*, 2016, no. 16(5), pp. 1–17. **doi:** 10.3390/s16050699

21. 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

22. Amr A.N., 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

23. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures: A dissertation of doctor of philosophy: *Electrical Engineering*. Iowa State University, 2012, 204 p.

24. 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

25. Li X., 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

26. 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, iss. 4, pp. 1307–1318. **doi:** 10.1109/TDEI.2010.5539703

27. Gorbova G., Gorbov M., Meijer G.C. Analysis capacitance and linearity gauge characteristic of coplanar microdisplacement sensor. *Proceeding XVII IMECO World Congress*, 2003, TC15, pp. 1965–1968.

28. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., 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'noi akademiji nauk Ukraini*, 2016, no. 43, pp. 134–137 (in Ukrainian).

29. Srbulov M. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples. *Netherlands*, Springer Publ., 2010, 233 p.