

рення портативних метрологічних установок дасть змогу оснастити ними українські центри стандартизації й метрології за доступною ціною та зменшить їх дефіцит.

1. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Тонкаль В.Е., Липковский К.А., Мельничук Л.П. Способы улучшения качества выходного напряжения автономных инверторов. – Киев, 1972. – 93 с. (Препринт-49/ИЭД АН УССР).
3. Осипов Ю.М. Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей / Уч. пособ. по курсам электротехники и ТОЭ. Ч. 2. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002 – 99 с.
4. ГОСТ 26035-83. Счетчики электрической энергии переменного тока электронные. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, – 1998.
5. А.с. 173306 СССР. Преобразователь постоянного тока в переменный / В.Е. Скороваров. – Опубл. 21.07.1965. Бюл. №15.

УДК 621.317

Ю.Ф. Тесик, докт. техн. наук, **Р.Н. Мороз**

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Анализ процесса формирования синусоиды из сигналов прямоугольной формы на основе принципа суперпозиции

Исследован метод формирования синусоиды из группы сигналов прямоугольной формы на основе принципа суперпозиции. Раскрыты теоретические вопросы формирования синусоидального напряжения и методика исследования. Создана математическая модель сигнала. Проведено сравнение результатов теоретических исследований с результатами компьютерного моделирования. По результатам исследований даны рекомендации по формированию синусоидального сигнала и выбору оптимального количества сигналов прямоугольной формы. Обосновано использование указанного метода в метрологии. Библ. 5, рис. 8.

Ключевые слова: воспроизведение, метрологическое обеспечение, электроэнергия, моделирование, импульсное преобразование энергии, синусоидальные сигналы.

Yu.F. Tesyk, R.N. Moroz

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Sinewave signal formation process analysis based on superposition of rectangular signals

The method of forming a sinusoid from a group of signals of a rectangular shape on the basis of the superposition principle is investigated. Theoretical questions of sinusoidal voltage formation and research technique are revealed. A mathematical model of the signal was created. The results of theoretical studies and the results of computer simulation are compared. According to the results of the research, recommendations on the formation of a sinusoidal signal and the choice of the optimal number of signals of a rectangular shape are given. The use of this method in metrology is justified. References 5, figures 8.

Key words: reproduction, metrological equipment, electric power, simulation, impulse energy conversion, sinusoidal signals.

Надійшла 30.08.2017

Received 30.08.2017

УДК 621.317.39: 681.586.772

ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК УСИЛИЙ В СТЯЖНЫХ ПРИЗМАХ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ПЕРЕКОСА ЭЛЕКТРОДОВ

А.С. Левицкий, докт. техн. наук, **А.И. Новик**, докт. техн. наук, **Е.А. Зайцев**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: zaitsev@i.ua

Рассмотрен способ существенного уменьшения погрешности измерения усилий в стяжных призмах турбогенератора с использованием упругого элемента и емкостного датчика с переменным зазором. Проанализиро-

вана погрешность, возникающая из-за непараллельности (перекоса) плоских кольцевых электродов сенсора. Найдены соотношения размеров внешнего и внутреннего электродов, при которых основная составляющая погрешности преобразования «микроремещение – обратная величина емкости» превращается в бесконечно малую величину. Предложено использование понятия "коэффициент перекоса" для упрощения определения и оценки величины непараллельности электродов независимо от их геометрических размеров. Проанализирована эффективность предложенного способа коррекции в зависимости от коэффициента перекоса кольцевых электродов. Показано, что относительная погрешность измерения при больших углах перекоса уменьшается в несколько раз, а при малых – в несколько сотен раз. Библ. 7, рисунок, таблица.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, стяжная призма, усилие, емкостный датчик, перекас электродов, погрешность.

Для больших электромашин (в частности, мощных турбогенераторов) плотность прессовки сердечника статора является одной из основных характеристик, которые определяют надежность машины. Снижение плотности прессовки приводит к относительному смещению листов активной стали и к другим дефектам, что в конечном итоге может вызвать тяжелую аварию [4]. При изготовлении необходимая плотность сердечника статора обеспечивается его прессованием. В спрессованном состоянии сердечник удерживается с помощью нажимных плит и стяжных призм. Измерение усилий в стяжных призмах позволяет контролировать состояние прессовки, а также дает возможность регулировать степень затяжки призм гайками для обеспечения равномерности распределения между призмами усилий отдачи активной стали сердечника, которая появляется после снятия усилий прессы [3, 5].

В отделе электрических и магнитных измерений (ЭМИ) Института электродинамики НАН Украины были предложены способ и устройство для измерения усилий в стяжных призмах с помощью кольцевых упругих элементов, устанавливаемых под гайки стяжных призм [2]. В сжатом состоянии происходит изменение высоты кольца, и эта деформация определяется по изменению емкости сенсора микроперемещений. Несмотря на малые размеры деформаций (единицы-десятки микрон), методы измерения емкости, разработанные в отделе ЭМИ, позволяют определять усилия в призмах с достаточной для практики точностью (погрешность менее одного процента).

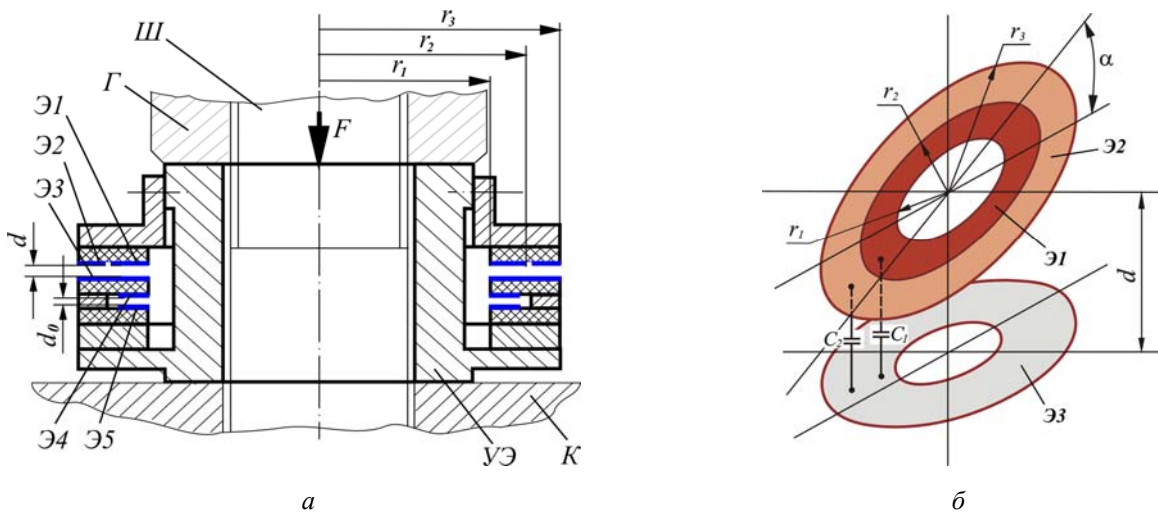
В процессе эксплуатации опытных образцов подобных устройств, условно названных "датчик под гайку", обнаружилось появление специфической погрешности измерения, обусловленной тем, что плоские кольцевые электроды измерительного конденсатора сенсора, которые в идеальном случае должны быть размещены в параллельных плоскостях, в действительности часто оказываются не совсем параллельными друг другу. Между плоскостями электродов появляется некоторый относительно небольшой угол перекоса α . Причины возникновения этого перекоса – технологические погрешности изготовления элементов стягивающих конструкций (концевых частей призм с резьбой, торцов гаек), попадание под гайки частиц окалины, другого мусора и т.п., а также возможные неточности юстировки в процессе монтажа электродов емкостного сенсора.

Авторами предлагается конструкция емкостного сенсора усилия, в котором значительно уменьшена погрешность от перекоса электродов. Использован способ компенсации, описанный в [1, 6], где показано, что если при круглых электродах конденсатора один из этих электродов разделен на два – внутренний круг и окружающее его концентрическое кольцо, и при этом отдельно измеряется емкость каждого из двух образовавшихся плоскопараллельных конденсаторов, то по результатам измерений можно определить значение среднего зазора, практически не зависящее от перекоса, т.е. от непараллельности плоскостей электродов.

Поскольку в "датчике под гайку" центральный участок поперечного сечения занят шпилькой (резьбовой частью стягивающей призмы), электроды конденсатора датчика выполняются в виде двух колец, лежащих в параллельных плоскостях [2]. Для использования упомянутого способа борьбы с погрешностью перекоса один из кольцевых электродов необходимо разделить на две части – на два концентрических кольца, образующих с противоположащим (сплошным кольцом) два конденсатора – основной (емкостью C_1) и корректирующий (емкостью C_2).

Покажем, что в этом случае также возможна компенсация погрешности от влияния перекоса электродов емкостного сенсора, и найдем условия для минимизации этой погрешности.

На рисунке *а* показан разрез "датчика под гайку" с разделенными электродами (полу-дифференциальный емкостный датчик с переменным зазором [2]), на рисунке *б* схематически изображены электроды рабочего конденсатора датчика. Соотношения между величиной зазора, поперечными размерами электродов и угол перекоса α показаны в условном масштабе. В действительности в реальных конструкциях угол α составляет доли или единицы угловых градусов. Охранные электроды не показаны. Обозначено: *Г* – гайка; *Ш* – шпилька (резьбовая часть стягивающей призмы); *К* – корпус машины; *УЭ* – упругий элемент датчика; *Э1*, *Э2* – секции верхнего электрода рабочего конденсатора; *Э3* – его общий электрод; *Э4*, *Э5* – электроды образцового конденсатора; *d* и *d*₀ – зазоры рабочего и образцового конденсаторов соответственно; α – угол перекоса (отклонение от параллельности плоскостей электродов рабочего конденсатора).



Площади колец основного *Э1* и корректирующего *Э2* электродов соответственно равны

$$S_1 = \pi(r_2^2 - r_1^2); S_2 = \pi(r_3^2 - r_2^2). \quad (1)$$

В дальнейшем изложении для компактности записи заменим обозначения радиусов r_1 , r_2 , r_3 соответственно на a , b , c :

$$S_1 = \pi(b^2 - a^2); S_2 = \pi(c^2 - b^2). \quad (2)$$

При отсутствии перекоса ($\alpha = 0$) и при условии пренебрежимо малого влияния краевых эффектов емкости C_1 и C_2 определяются как

$$C_1 = \frac{\varepsilon S_1}{d} = \frac{\varepsilon \pi (b^2 - a^2)}{d}; C_2 = \frac{\varepsilon S_2}{d} = \frac{\varepsilon \pi (c^2 - b^2)}{d}, \quad (3)$$

т.е. имеет место строгая обратная пропорциональность между величинами емкости и зазора.

Для образцового конденсатора

$$C_0 = \frac{\varepsilon S_0}{d_0}. \quad (4)$$

В качестве информативного параметра рабочего конденсатора будем использовать разность емкостей его основной C_1 и корректирующей C_2 секций

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon \pi}{d} (2b^2 - a^2 - c^2). \quad (5)$$

Взяв отношение (4) и (5), получим

$$\frac{C_0}{C_1 - C_2} = \frac{d}{d_0} \frac{S_0}{\pi (2b^2 - a^2 - c^2)}, \quad (6)$$

т.е., вычислив отношение емкостей C_0 и $C_1 - C_2$, легко получить измеряемую величину d , причем в коэффициент пропорциональности входят только постоянные геометрические размеры d_0, S_0, a, b, c .

При возникновении перекося ($\alpha \neq 0$) выражение (5) усложняется и при разложении в ряд выглядит следующим образом (показаны только первые три члена ряда):

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon\pi \sin\alpha}{d} \frac{\sin\alpha}{\alpha} \left[(2b^2 - a^2 - c^2) + \frac{\sin^2\alpha}{4d^2} (2b^4 - a^4 - c^4) + \frac{\sin^4\alpha}{8d^4} (2b^6 - a^6 - c^6) + \dots \right] =$$

$$= \frac{\varepsilon\pi \sin\alpha}{d} \frac{\sin\alpha}{\alpha} [A + B + D + \dots]. \quad (7)$$

Заметим, что влияние множителя $\sin\alpha/\alpha$ в выражении (7) и в последующих можно не учитывать, поскольку в реальных конструкциях при отношении зазора к внешнему диаметру большего электрода 1:20 – 1:50 угол α не превышает 3° , при этом значение $\sin\alpha/\alpha$ отличается от единицы не более чем на $4 \cdot 10^{-4}$ [7].

Наибольшую составляющую погрешности от перекося вносит второй член многочлена в квадратных скобках. Найдем условия, при которых этот член обращается в нуль:

$$B = 2b^4 - a^4 - c^4 = 0. \quad (8)$$

Выразим величины b, c через a и определенные коэффициенты p и m

$$b = pa, \quad c = ma. \quad (9)$$

Обычно коэффициент m (отношение внешнего радиуса активного электрода рабочего конденсатора к его внутреннему радиусу) задается конструктивными соображениями, а коэффициентом p можно варьировать. Подставив (9) в (8), получим уравнение

$$2p^4 - 1 - m^4 = 0, \quad (10)$$

решение которого

$$p = \left(\frac{1 + m^4}{2} \right)^{0,25} \quad (11)$$

дает условие обращения в нуль второго слагаемого в выражении (7). Для конкретной конструкции, например, при $m = 2$ имеем $p = \sqrt[4]{8,5} \approx 1,71$. При этом коэффициент уменьшения эффективной емкости рабочего конденсатора (по сравнению со случаем, когда электроды Э1 и Э2 объединены в один) составит

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\sqrt{2(m^4 + 1)} - m^2 - 1}{m^2 - 1}, \quad (12)$$

и при $m = 2$ эта величина составит 0,277, т.е. чуть менее 30 %.

Определим, какова при выбранной величине p погрешность измерения от влияния третьего члена разложения D (влиянием четвертого и последующих пренебрегаем в связи с их малостью):

$$D = \frac{\sin^4\alpha}{8d_x^4} (2b^6 - a^6 - c^6) = \frac{\sin^4\alpha \cdot a^6}{8d_x^4} (2p^6 - 1 - m^6). \quad (13)$$

Для оценки влияния этого члена на погрешность устройства умножим и разделим выражение (7) на A (учитывая, что $B = 0$) и вынесем A за скобки:

$$C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon\pi \sin\alpha}{d} \frac{\sin\alpha}{\alpha} a^2 (2p^2 - m^2 - 1) \left[1 + \frac{a^4 \sin^4\alpha}{8d^4} \cdot \frac{2p^6 - m^6 - 1}{2p^2 - m^2 - 1} \right]. \quad (14)$$

Очевидно, что второе слагаемое в квадратных скобках выражения (14) представляет собой относительную погрешность измерения δ_3 разности емкостей $C_1 - C_2$:

$$\delta_3 = \frac{a^4 \sin^4\alpha}{8d^4} \cdot \frac{2p^6 - m^6 - 1}{2p^2 - m^2 - 1}. \quad (15)$$

Оценим значение δ_3 . Если p отвечает условию (11), а $m = 2$, то из (15) имеем

$$\delta_3 = -2,34 \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{d^4}. \quad (16)$$

Заметим, что угол α физически не может превышать некоторое критическое значение $\alpha_{кр}$, поскольку иначе края противоположащих электродов конденсатора соприкоснутся, и датчик потеряет работоспособность. Таким образом, условием нормальной работы является $\alpha < \alpha_{кр}$. Введем понятие "коэффициент перекоса" k_{Π} :

$$k_{\Pi} = \frac{\alpha}{\alpha_{кр}}. \quad (17)$$

Касание электродов наступает при $k_{\Pi} = 1$. Для критического угла перекоса с учетом малости углов перекоса [7] получим

$$\sin \alpha_{кр} \approx \alpha_{кр} = \frac{d}{ma}. \quad (18)$$

Выразив из (18) величину a и подставив ее в (16), получаем

$$|\delta_3| = 2,34 \left(\frac{k_{\Pi}}{m} \right)^4. \quad (19)$$

Для $m = 2$ имеем $|\delta_3| = 0,146k_{\Pi}^4$, что при $k_{\Pi} = 0,5$ дает значение $|\delta_3| \approx 0,009$.

Оценим эффективность описанного способа компенсации. Сравним полученное значение погрешности с ее значением в некомпенсированном датчике. Пусть в аналогичном по конструкции и размерам датчике электроды $\mathcal{E}1$ и $\mathcal{E}2$ объединены в один кольцевой электрод с внешним диаметром $r_3 = c$ и внутренним $r_1 = a$. Информативным параметром здесь является емкость конденсатора $C = C_1 + C_2$. По аналогии с (1)...(3) имеем

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} (c^2 - a^2). \quad (20)$$

При наличии перекоса выражение (20) с учетом (7) преобразуется к виду

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin \alpha}{\alpha} (c^2 - a^2) \left[1 + \frac{\sin^2 \alpha}{4d^2} \left(\frac{c^4 - a^4}{c^2 - a^2} \right) + \frac{\sin^4 \alpha}{8d^4} \left(\frac{c^6 - a^6}{c^2 - a^2} \right) \right]. \quad (21)$$

Поскольку, как и ранее, $c = ma$,

$$C = \frac{\varepsilon\pi}{d} \frac{\sin \alpha}{\alpha} (c^2 - a^2) \left[1 + \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{4d^2} (m^2 - 1) + \frac{a^4 \sin^4 \alpha}{8d^4} (m^4 + m^2 + 1) \right]. \quad (22)$$

Сумма второго и третьего слагаемых многочлена в квадратных скобках (22) представляет собой относительную погрешность $\delta_{нк}$ некомпенсированного датчика, т.е. отклонение его емкости от идеального случая, описываемого выражением (20). Подставив (18) в (20), при $m = 2$ получаем $\delta_{нк} = 1,25k_{\Pi}^2 + 2,63k_{\Pi}^4$.

Для сравнения в таблице приведены округленные значения погрешностей компенсированного $\delta_{к}$ и некомпенсированного $\delta_{нк}$ датчиков для нескольких значений коэффициента перекоса k_{Π} , а также эффективность компенсации как отношение величин $\delta_{нк}$ и $\delta_{к}$.

Коэффициент перекоса k_{Π}	Погрешность некомпенсированного датчика $ \delta_{нк} $, %	Погрешность компенсированного датчика $ \delta_{к} $, %	Эффективность $\left \frac{\delta_{нк}}{\delta_{к}} \right $
0,9	36	9,6	3,75
0,5	8,8	0,9	9,8
0,3	2,9	0,11	26,4
0,1	0,31	0,0015	209,3
0	0	0	—

Выводы. 1. Рассмотрен способ существенного снижения погрешности от перекоса при измерении взаимного смещения электродов плоскопараллельного емкостного сенсора с переменным зазором, образованного кольцевыми электродами. Способ основан на разделении одного из кольцевых электродов конденсатора на два отдельных концентрических электрода, лежащих в одной плоскости, при этом в качестве информативного параметра сенсора используется разность емкостей образующихся двух секций измерительного конденсатора.

2. Определена относительная погрешность компенсированного сенсора, обусловленная остаточными членами ряда разложения выражения для емкости.

3. Введено понятие «коэффициент перекоса» – отношение угла перекоса к его критическому, т.е. предельно допустимому значению.

4. Оценена эффективность компенсации путем сравнения погрешностей компенсированного и некомпенсированного емкостных сенсоров. Показано, что при больших углах перекоса, близких к критическим, погрешность уменьшается в несколько раз, а при малых углах – в несколько сотен раз.

5. Полученные результаты могут быть использованы при разработке конструкций емкостных сенсоров микроперемещений с переменным зазором и кольцевыми электродами, в том числе сенсоров для измерения продольных усилий в элементах конструкций в виде стержней либо деформаций этих элементов.

1. *Гриневич Ф.Б., Лежоев Р.С.* Компенсация погрешности, вызываемой непараллельностью электродов емкостного датчика // Техн. электродинамика.– 1988. – № 5.– С. 68–71.
2. *Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П.* Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
3. *Титко О.І., Мистецький В.А.* Математична модель, методика та результати розрахунку зусиль у стяжних призмах осердя статора турбогенератора за наявності дефектів на основі методу трьох моментів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 38–44.
4. *Фомин Б.П., Циханович Б.Г., Виро Г.М.* Технология крупного электромашиностроения. Т.1: Турбогенераторы. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
5. *Шторгин А.В.* Научно-технические мероприятия по уменьшению повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванной вибрацией в торцевых зонах: Дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05 «Электрические машины и аппараты». – К., 2015. – 161 с.
6. *Heerens W.C.* Multi-terminal capacitor sensors // Journal of Physics E. Scientific Instruments. – Vol. 15. – 1982. – P. 137-141.
7. *Polyanin A.D., Manzhurov A.V.* Handbook of mathematics for engineers and scientists // Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC. – 2007. – 1543. – Available at: http://izt.ciens.ucv.ve/ecologia/Archivos/Referencias-I-math/books-math/Math/Polyanin_Manzhurov-Handbook_of_Mathematics_for_Engineers_and_Scientists.pdf (accessed 24.05.2017).

УДК 621.317.39: 681.586.772

А.С. Левицький, докт. техн. наук, **А.І. Новік**, докт. техн. наук, **Є.О. Зайцев**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Ємнісний перетворювач зусиль у стяжних призмах осердя статора турбогенератора з компенсацією похибки від перекосу

Розглянуто спосіб зменшення похибки вимірювання зусилля в стяжних призмах осердя статора турбогенератора ємнісним сенсором зі змінним зазором та пружним елементом. Проаналізовано похибку, яка виникає внаслідок непаралельності (перекосу) плоских кільцевих електродів сенсора. Знайдено співвідношення розмірів зовнішнього та внутрішнього електродів сенсора, при яких основна складова похибки перетворення «мікропереміщення – зворотна величина ємності» перетворюється в нескінченно малу величину. Запропоновано використання поняття «коефіцієнт перекосу» для спрощення визначення і оцінки величини непаралельності електродів незалежно від їх геометричних розмірів. Проаналізовано ефективності запропонованого способу корекції залежно від коефіцієнта перекосу кільцевих електродів. Показано, що відносна похибка вимірювання при великих кутах перекосу зменшується в декілька разів, а при малих – у декілька сотень разів. Бібл. 7, рисунок, таблиця.

Ключові слова: турбогенератор, осердя статора, стяжна призма, зусилля, ємнісний перетворювач, перекося електродів, похибка.

A.S. Levytskyi, A.I. Novik, Ye.O. Zaitsev

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Capacity transducer of efforts in turbogenerator stator tightening prisms core with compensation of influence of out-of-parallelism electrodes

This paper present the method of considerable reduction of measuring error of efforts in the turbogenerator tightening prisms with the use of resilient element and capacity sensor with variable gap is considered. The error, which was as result of arising up from out-of-parallelism of flat sensor circular electrodes, is analyzed. Correlations of sizes external and internal electrodes at that basic constituent of error of transformation "microdisplacement – reciprocal of electric capacity" transforms into an infinitesimal are found. The ratio of size of the external and internal ring electrodes at that basic constituent of error of transformation "microdisplacement – reciprocal of electric capacity" transforms into an infinitesimal are found. The use of concept "Coefficient of defect" for simplification of determination and size estimation out-of-parallelism of electrodes regardless of their geometrical sizes is proposed. Efficiency of the proposed method of correction depending on the coefficient of circular electrodes defect is analysed. It is shown that the relative error of measuring at the large angles of defect diminishes in several times, and at small - in several hundred one times. Refences 7, figure, table.

Key words: turbogenerator, stator core, tightening prism, effort, capacity sensor, out-of-parallelism of electrodes, error.

Надійшла 17.07.2017

Received 17.07.2017