



ЛЕВИЦКИЙ А.С., докт.техн. наук,
НОВИК А.И., докт.техн. наук.,
ЗАЙЦЕВ Е.А., канд.техн. наук.,
Институт электродинамики НАН Украины

ЦИФРОВОЙ ЕМКОСТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УСИЛИЙ В СТЯЖНЫХ ШПИЛЬКАХ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ КОНВЕРТОРА AD7745/46

При эксплуатации, периодических осмотрах и ремонтах мощных генераторов одним из актуальных вопросов является измерение усилий в стяжных шпильках сердечника статора. Результаты измерений позволяют производить контроль состояния прессовки сердечника. Перспективным методом построения измерителей усилия является емкостный с размещением емкостных датчиков под стяжными гайками.

В статье описан разработанный в ИЭД НАН Украины измеритель усилия, в котором используется емкостной датчик с переменным зазором и цифровой преобразователь емкости на основе сигма-дельта модулятора типа AD7746. Рассмотрен также вариант измерителя такого типа с компенсацией погрешности от перекоса электродов измерительного конденсатора

К л ю ч е в ы е с л о в а: генератор, сердечник статора, стяжные шпильки, усилие, емкостный датчик, преобразователь "емкость — цифровой код".

Плотность спрессованного сердечника статора является одной из основных характеристик технического состояния мощных гидро- и турбогенераторов и в значительной степени определяет их эксплуатационную надежность. Но во время эксплуатации довольно часто происходит снижение плотности прессовки, что может привести к относительным смещениям листов активной стали, а также к появлению и развитию таких дефектов, как распушивание зубцов крайних пакетов, выкрашивание фрагментов листов активной стали, местное замыкание листов и нагрев пакетов. Все это в конечном итоге может стать причиной тяжелых аварий [1, 2].

При изготовлении необходимая плотность сердечника статора мощного генератора обеспечивается его прессованием. В спрессованном состоянии сердечник удерживается с помощью нажимных фланцев (плит) и стяжных шпилек (призм). Измерения усилий в стяжных шпильках дают возможность контролировать состояние спрессованности сердечника, а также позволяют регулировать степень затяжки шпилек для обеспечения равномерности распределения усилий между ними. Контроль механических усилий в шпильках наиболее желательно осуществлять в режиме он-лайн или с заданной периодичностью.

Существующие методы и средства измерения усилий в шпильках либо не отвечают современным требованиям по техническим характеристикам [3, 4], либо очень сложные и дорогие [5, 6].

В отделе электрических и магнитных измерений Института электродинамики НАН Украины (отдел ЭМИ ИЭД НАНУ) создан емкостный датчик усилий в стяжных шпильках, в котором используется измерительный плоскопараллельный конденсатор с переменным зазором и кольцевой упругий силовоспринимающий элемент. Датчик устанавливается под стяжные гайки на шейки

стяжных шпилек (призм, ребер). Емкостный сенсор датчика дает возможность с высокой чувствительностью и точностью измерять перемещения в десятки, единицы и даже доли микрометра, что позволяет его использование для измерения малых линейных деформаций упругого чувствительного элемента [7]. Несмотря на малые размеры деформаций (единицы-десятки мкм), методы измерения емкости, разработанные в отделе ЭМИ ИЭД НАН [8], позволяют определять усилия стягивания с достаточной для практики точностью (погрешность менее одного процента). Передаточная характеристика "перемещение — обратная величина емкости" такого емкостного сенсора принципиально линейная, стабильная во времени, строго расчетная, то есть определяется только его геометрическими размерами, благодаря чему не требуется тарирования. Эффективная защита от воздействия электрических полей обеспечивается простым экранированием сенсора (роль экрана обычно выполняет электрический корпус и арматура) и его соединительных проводов. К магнитным полям емкостные сенсоры не чувствительны.

На Рис. 1 показан вариант размещения датчиков усилий на турбогенераторе. Как видно в этом варианте датчики 5 размещены на стяжных шпильках 3 под стяжными гайками 4 как со стороны турбины, так и со стороны возбудителя.

В данной работе предлагается измерительная схема для емкостного датчика усилий в стяжных шпильках, в которой использован преобразователь (конвертор) "емкость-код" на основе сигма-дельта модулятора типа AD7746. В статье рассмотрены два варианта измерителя — для датчика без коррекции погрешности от перекоса электродов емкостного сенсора и для датчика с коррекцией.

В первом варианте предлагаемого измерителя (без коррекции погрешности от перекоса электро-



дов сенсора) электроды 5 и 6 объединены в один электрод, и представляют собой сплошное кольцо с наружным радиусом r_3 и внутренним r_1 . Площадь этого электрода (активная площадь рабочего конденсатора) равна $S_W = \pi(r_3^2 - r_1^2)$, а площадь электрода опорного конденсатора, образованного электродами 8 и 9, — S_R . Размеры электродов 5, 6, 7 и 8, 9, а также зазоры между ними (d_x и d_0) выбраны такими, чтобы емкость рабочего конденсатора C_W в исходном (ненагруженном) состоянии датчика и емкость опорного конденсатора C_R были примерно равны друг другу.

Как видно из Рис. 2, при приложении усилия происходит сжатие упругого элемента 4, вследствие чего зазор между электродами рабочего конденсатора C_W будет уменьшаться (при работе в области упругих деформаций элемента 4) изменения зазора будут прямо пропорциональны приложенной силе F . При этом емкость C_W рабочего конденсатора C_W , увеличивается, в то время как емкость C_R образцового конденсатора не зависит от приложенного усилия и остается постоянной, т. е. можно записать

$$C_W = K_1/d_x; C_R = K_2/d_0, \quad (1)$$

где $K_1 = \epsilon_0 \epsilon S_W$; $K_2 = \epsilon_0 \epsilon S_R$; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ — относительная диэлектрическая постоянная среды.

Обозначим начальный зазор конденсатора C_W (в ненагруженном состоянии упругого элемента) как d_{x0} . При воздействии силы F зазор d_{x0} становится равным $d_{x0} - \Delta d_x$. Как отмечалось выше, размеры электродов сенсора выбираются таким образом, чтобы при отсутствии нагрузки F емкости C_W и C_R были равны друг другу, тогда из (1) следует

$$K_1 d_0 = K_2 d_{x0}. \quad (2)$$

Если, измерив величины C_W и C_R , вычислить функцию

$$p = 1 - C_W/C_R, \quad (3)$$

то нетрудно показать, что величина p будет пропорциональна усилию сжатия F . Действительно, на основании (1) и (3) можно записать

$$p = 1 - \frac{K_2(d_{x0} - \Delta d_x)}{d_0 K_1} = 1 - \frac{K_2 d_{x0}}{K_1 d_0} + \frac{K_2 \Delta d_x}{K_1 d_0}, \quad (4)$$

а поскольку второе слагаемое, как следует из (2), равно единице, окончательно получим

$$p = \frac{K_2}{K_1} \frac{\Delta d_x}{d_0} = N \frac{\Delta d_x}{d_0}, \quad (5)$$

где $N = S_R/S_W$ — отношение площадей электродов образцового и рабочего конденсаторов, являющееся постоянной величиной, заданной конструкцией датчика.

Таким образом, информативный параметр яв-

ляется величиной, прямо пропорциональной Δd_x , т.е. силе F . При этом данная зависимость инвариантна относительно всех неинформативных параметров, одинаково (в виде множителей) влияющих на оба конденсатора датчика.

При выборе вторичного измерительного преобразователя (ВИП) учитывались следующие особенности описываемого устройства. Во-первых, так как емкости конденсаторов сенсора невелики (единицы пикофард), то подключение его к ВИП длинными проводами привело бы к необходимости борьбы с влиянием значительных паразитных емкостей. Во-вторых, усилие в стяжных шпильках является медленно изменяющейся величиной, и поэтому высокого быстродействия здесь не требуется. В-третьих, ВИП должен быть малогабаритным и иметь малое энергопотребление. В-четвертых, ВИП должен хорошо согласовываться по уровням сигналов с мало мощными микроконтроллерами.

Исходя из этого, рационально в качестве ВИП применить конвертор прямого преобразования емкости в код CDC (Capacitance-to-Digital Converter) компании Analog Devices — ИМС типа AD7746 [9], работа которого основана на использовании сигма-дельта модуляции. На Рис.3 приведен ВИП, содержащий сигма-дельта конвертор, который может кодировать в цифровой код либо входную емкость, подключенную к контактам CIN1+, EXC1 (или CIN2+, EXC2), либо разность двух входных емкостей, подключаемых к CIN1+, CIN1-, EXC1 (или CIN2+, CIN2-, EXC2).

На функциональной схеме ВИП (Рис. 3) показано, что электроды рабочего конденсатора датчика C_W подключены к контактам CIN1+ и EXC1, электроды опорного конденсатора C_R — к контактам CIN2+ и EXC2. Линиями обмена данными и синхронизации SDA, SCL интерфейса I2C преобразователь соединен с микроконтроллером МК, например, типа ATmega16L, имеющим малое энергопотребление, в рабочем режиме составляющее 1.1 мА, а в режиме ожидания 0,35 мА. Микросхема AD7746 располагается в непосредственной близости от емкостного датчика и соединяется с его электродами короткими проводниками (прямо на печатной плате), при этом необходимо учитывать, что в процессе работы электроды 5, 6 смещаются относительно электрода 7. Поскольку это смещение невелико — несколько десятков микрометров, для развязки вполне достаточно небольшой вставки из отрезка гибкого провода. Осуществить в такой конструкции тщательное экранирование подводящих проводов друг от друга весьма трудно, поэтому каждый из конденсаторов датчика оказывается шунтированным паразитными емкостями. На Рис. 3 они обозначены как C_{S1} , C_{S2} и показаны пунктирными линиями. Эти емкости невелики и достаточно стабильны, однако их наличие (точнее,

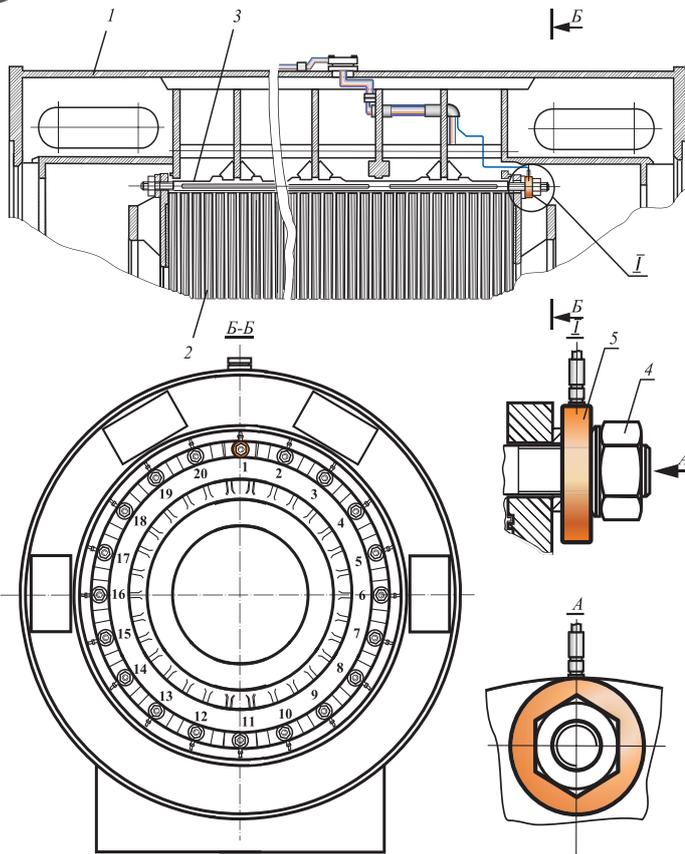


Рис. 1. Схема установки емкостных датчиков усилий в стяжных шпильках на турбогенераторе: 1 – статор; 2 – сердечник статора; 3 – стяжная шпилька; 4 – стяжная гайка; 5 – емкостный датчик

одной из них – C_{S1}) приводит к искажению линейной зависимости параметра p от величины зазора d_x , как это видно из выражений (4) и (5). Наличие другой паразитной емкости C_{S2} приводит лишь к изменению крутизны характеристики $p = f(d_x)$, не нарушая ее линейности. В ИМС AD7746 имеются

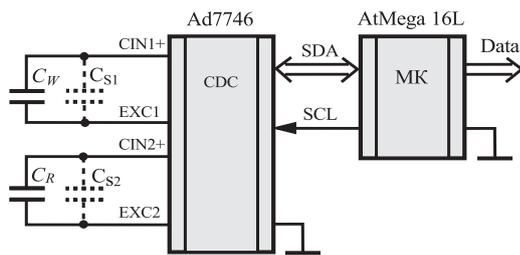


Рис. 3. Функциональная схема канала измерения усилия без коррекции погрешности от перекоса электродов емкостного сенсора

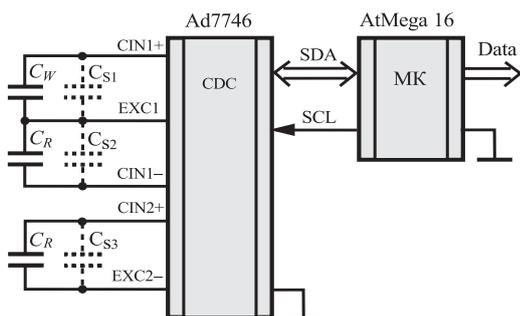


Рис. 4. Функциональная схема канала измерения усилия с коррекцией погрешности от перекоса электродов емкостного сенсора

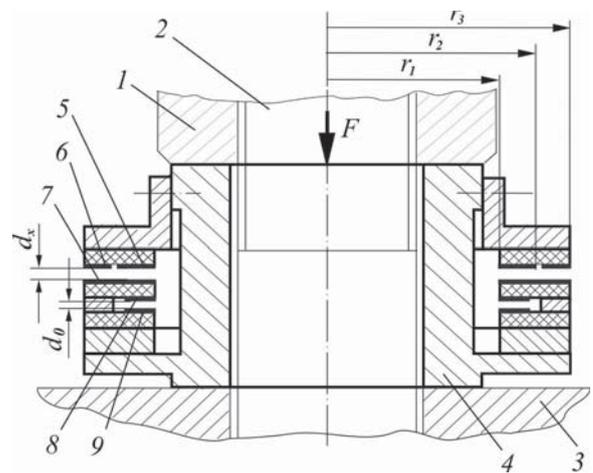


Рис. 2. Конструктивная схема емкостного датчика усилий в стяжных шпильках генератора: 1 – стяжная гайка; 2 – стяжная шпилька (призма); 3 – сердечник статора; 4 – цилиндрический упругий элемент; 5 и 6 – низкопотенциальные кольцевые электроды рабочего конденсатора; 7 – высокопотенциальный электрод рабочего конденсатора; 8 и 9 – кольцевые электроды опорного (образцового) конденсатора.

встроенные средства компенсации смещения результатов измерения емкостей C_W и C_R на значение встроенной емкости, которая вычитается из значения внешних емкостей составляющих величины в несколько пФ (т.н. CAPDAC), с помощью которых влияние паразитных емкостей может быть скомпенсировано. В результате учета значения CAPDAC при вычислении емкостей C_W и C_R строгая пропорциональность между приращением зазора Δd_x и приращением выходной функции p восстанавливается. В микроконтроллер МК поочередно заносятся код соответствующий результату измерения емкостей C_W и C_R , далее выполняется вычисление параметра p по формуле (3), а также масштабирование для получения ре-

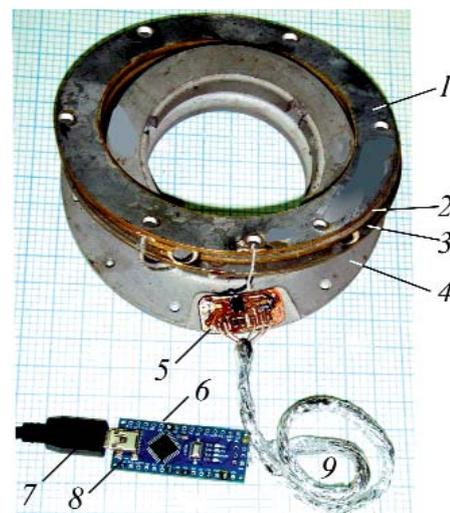


Рис. 5. Общий вид емкостного измерителя усилий в стяжных шпильках с использованием конвертора AD7746.

Основные узлы измерителя: 1, 2, 3 – электроды емкостного сенсора; 4 – упругий элемент; 5 – преобразователь "емкость – цифровой код"; 6 – микропроцессор; 7 – USB кабель к системе сбора и обработки данных; 8 – интерфейсный преобразователь между микропроцессором та системой сбора и обработки данных; 9 – I2C кабель между преобразователем и микропроцессором.



зультата в единицах силы (с учетом геометрических размеров и упругости материала элемента 4 датчика, Рис. 2). Полученные данные приводятся к удобному для дальнейшего использования виду (например, в информационный сигнал представлений в коде NRZ удобный для передачи по протоколу Modbus) и по шине Data передаются на внешние устройства, а также по данной шине передаются и управляющие информационные сигналы.

Существенным недостатком описанного ВИП является погрешность, вызванная непараллельностью плоскостей, в которых расположены электроды рабочего конденсатора датчика, или так называемая погрешность от перекоса. Причины возникновения перекоса — технологические погрешности изготовления стягивающих элементов (резьбовых концов шпилек, торцевых поверхностей гаек), попадание под гайки посторонних предметов, а также возможные неточности юстировки в процессе монтажа электродов емкостного сенсора. В отделе электрических и магнитных измерений ИЭД НАН Украины разработан простой способ уменьшения погрешности от перекоса электродов (в десятки и сотни раз) [9]. Для его реализации один из кольцевых электродов рабочего конденсатора датчика (низкопотенциальный) должен быть разделен на два изолированных друг от друга концентрических кольца с определенным соотношением радиусов r_1 , r_2 , r_3 и бесконечно малым радиальным зазором между ними [11]. В этом варианте исполнения электроды 5 и 6 (Рис. 2) образуют с электродом 7 два конденсатора: рабочий емкостью C_w (электроды 5 и 7) и корректирующий C_c (электроды 6 и 7). В формулу (3) при этом вместо емкости C_w необходимо подставить разность емкостей двух секций рабочего конденсатора датчика, т.е. величину $C_w - C_c$. При использовании в качестве ВИП измерителя на ИМС AD7746 функция вычитания емкостей может быть реализована в самой микросхеме. Для этого общий электрод 7 подключается к выводу EXC1, а электроды 5 и 6 — к выводам CIN1+ и CIN1— соответственно, как показано на функциональной схеме Рис. 4.

Алгоритм работы ВИП (Рис. 4) и его аппаратная реализация не отличаются от описанных для схемы, изображенной на Рис. 3. Так же, как и в предыдущем ВИП (Рис. 3) влияние паразитных емкостей C_{S1} , C_{S2} и C_{S3} в предложенной схеме устраняется программно с использованием значений встроенных в ИМС CAPDAC.

На Рис. 5 показано устройство, реализующее описанный в работе измеритель.

Выводы.

1. Разработанный измеритель усилий в стяжных шпильках генератора с емкостным датчиком и аппаратно простым вторичным преобразователем, состоящим из микросхемы СДС типа AD7745/45/47 и ми-

кроконтроллера, целесообразно использовать при создании систем контроля усилий, когда необходимо измерять усилия в десятках шпилек генератора.

2. Разработанный вторичный преобразователь может работать как с емкостным сенсором датчика, в котором конструкция электродов измерительного конденсатора дает возможность корректировать их перекоса, так с емкостным сенсором без коррекции.

2. На основе емкостных датчиков в сочетании с интегральными схемами СДС типов AD7745/45/47 и подобных могут быть построены устройства для других физических величин, изменения которых сводятся к относительным микросмещениям элементов конструкций различных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б.А. Алексеев. — 2-е изд., стер. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. — 144 с.
2. *Алексеев Б.А.* Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б.А. Алексеев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. — 152 с.
3. *Остерник Э.С.* Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашинах / Э. С. Остерник // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динаміка та міцність машин, № 42. — Вестник НТУ "ХПИ", 2009.
4. *Федоренко Г.М.* Методика и измерительные средства определения усилий прессовки в сердечнике статора мощного турбогенератора / Г. М. Федоренко, А. А. Бут, В. В. Кузьмин и др. // Техн. электродинамика. — 1991. — №4. — С. 64–69.
5. *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 throughbolt in a generator core/Twerdchlib 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.
6. *United States Patent No. US 20120026482 A1.* Int. Cl. G01J5/48. Use of fiber optic sensor techniques for monitoring and diagnostics of large AC generators / George Franklin Dailey (US) — Appl. No. US 13/065,842; Pub. date Feb. 02, 2012.
7. *Левицкий А.С.* Датчики для вимірювання зусилля пресування осердя статорів гідро- і турбогенераторів / А. С. Левицкий, Г. М. Федоренко // Гідроенергетика України. — 2009. — №4. — С.35 — 39.
8. *Новик А.И.* Перспективы использования преобразователей с емкостными датчиками для измерения диагностических параметров в энергомашинах / А.И. Новик // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : 36. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2009. — Вип. 20. — С. 76 — 77.
9. *AD7745/AD7746 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor (rev.0).* Available at: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (дата звернення 07.03.2018).
10. *Гриневиц Ф.Б.* Компенсация погрешности, вызываемой непараллельностью электродов емкостного датчика / Ф.Б. Гриневиц, Р.С. Лежов // Техническая электродинамика. — 1988. — № 5. — С. 68–71.
11. *Левицкий А.С.* Емкостний датчик усилий в стяжных призмах статора турбогенератора с компенсацией погрешности от перекоса электродов / А.С. Левицкий, А.И. Новик, Е. А. Зайцев // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: 36. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2017. — Вип.48. — С. 126 — 132.