

ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

- КУЧИНСКИЙ К.А. д-р техн. наук, вед.н.с. Института электродинамики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com,
ТИТКО В.А. канд. техн. наук, с.н.с., Института электродинамики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: titko.ied@gmail.com,
КРАМАРСКИЙ В.А. канд. техн. наук, с.н.с., Института электродинамики НАН Украины, Киев, Украина,
ГУТОРОВА М.С. канд. техн. наук, н.с., Института электродинамики НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: Gutorova@nas.gov.ua;

Цель работы. Целью работы является создание нового метода и устройства контроля целостности стержневых призм, что позволит, при незначительных усовершенствованиях конструкции отдельных измерительных призм, получать информацию о состоянии (повреждении) всех стержневых призм и, следовательно, о степени прессовки железа статора в целом.

Методы исследования. Тензометрический метод физического моделирования, аналитические расчеты.

Полученные результаты. Разработан и исследован на физической модели турбогенератора мощностью 500 МВт экспериментальный образец устройства контроля и диагностики состояния прессовки шихтованного сердечника статора генераторов.

Преимущество метода контроля с применением датчиков на базе тензорезисторов определяется относительно невысокой стоимостью последних, и при правильном выборе упругого элемента и конструкции можно осуществлять мониторинг элементов крепления сердечника статора с достаточно высокой степенью точности.

Проведенные испытания с моделированием разрушения призм посредством снятия с них нагрузки на модели статора турбогенератора в лабораторных условиях показали удовлетворительное совпадение результатов эксперимента и теоретических расчетов. Данные об изменении напряженно-деформированного состояния стержневой модели оценивались с помощью тензорезисторов, наклеенных определенным образом на измерительную шпильку.

Основным преимуществом предложенного метода контроля усилий в стержневой призме является тот факт, что измерения могут проводиться на остановленном турбогенераторе без снятия торцевых щитов, так как усилия в стержневых призмах с учетом их изменений в случае повреждения какой-либо призмы сохраняются и в нерабочем состоянии.

Внедрение разработанного метода и устройства позволит не только предотвращать аварийные ситуации, связанные с поломкой стержневых призм, но и даст возможность осуществлять постоянный контроль за состоянием прессовки сердечника статора.

Научная новизна. Предложен новый метод контроля состояния стержневых призм сердечника статора без снятия боковых щитов турбогенератора и впервые теоретически обоснована возможность применения математического аппарата для определения места повреждения и количества призм с ослабленными гайками или разорванной резьбой.

Практическая ценность. На базе фундаментальных результатов разработан метод контроля и диагностики состояния прессовки сердечника статора турбогенератора с применением специальных измерительных шпилек. Предложенный метод позволит без вывода генератора в ремонт, по показаниям датчиков, определять количество призм, имеющих повреждения и, таким образом, прогнозировать сроки последующего ремонта.

Ключевые слова: турбогенератор; торцевая зона; обмотка статора; прессовка; тензометрия.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основное оборудование тепловых электростанций (ТЭС), спроектированное по нормативным документам в 50-х гг. и введенное в эксплуатацию в 60-70

гг. прошлого века, практически отработало свой ресурс и физически и морально устарело. Поэтому неотложной проблемой в энергетике является необходимость продолжения надежной и эффективной эксплуатации турбогенераторов (ТГ) сверх нормативных

сроков [1].

В настоящее время обеспечение стабильной работы оборудования ТЭС возможно лишь при существенном увеличении объема диагностирования с одновременным уменьшением сроков междудиагностического периода, а также путем использования эффективных дополнительных методов контроля состояния оборудования непосредственно в процессе эксплуатации. Диагностика и контроль реального состояния энергооборудования становятся практически единственными способами, позволяющими не только снизить количество аварийных отключений и максимально избежать аварий с тяжелыми последствиями, но и повысить экономическую эффективность генерации электроэнергии [2]-[5].

Результаты периодических обследований и типовых испытаний ТГ типов ТГВ-200, ТГВ-300 за 35-40 лет их эксплуатации показывают, что после работы в нестационарных режимах в элементах и узлах машины наблюдаются [6]-[8]:

- распушевка и отламывание зубцов крайних пакетов сердечника статора, в некоторых случаях с одновременным повреждением изоляции обмотки;
- ослабление затяжки гаек стяжных призм сердечника;
- разрывы шейки стяжных призм сердечника статора;
- ослабление прессовки сердечника статора и повышенная его вибрация;
- ослабление креплений лобовых частей обмотки статора.

Непрерывный контроль за состоянием высоконагруженных узлов дает возможность обеспечить достоверный прогноз параметров статора и позволяет существенно повысить надежность и безопасность работы машины.

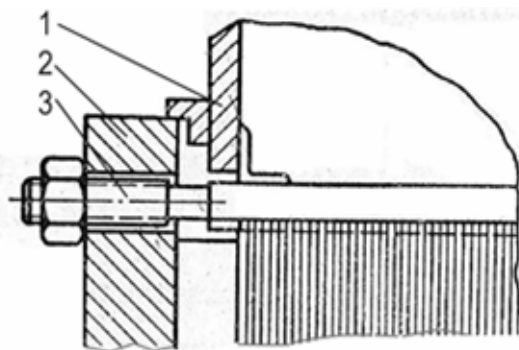
Как известно, масса сердечника статора составляет около 2/3 массы генератора. Главным свойством сердечника статора, определяющим его работоспособность, является конструктивно предусмотренное при его изготовлении состояние упругого сжатия, которое обеспечивается с помощью нажимных плит и стяжных призм. Во время эксплуатации происходит снижение усилий, сжимающих сердечник. Это приводит к потере запаса прочности и является потенциальной причиной опасных повреждений статора [9].

Одними из наиболее повреждаемых элементов статора ТГ являются стяжные призмы (рис. 1), обеспечивающие необходимую плотность запрессовки сердечника и посредством которых осуществляется механическая связь активного железа с корпусом машины.

В зависимости от типа генератора на статоре расположены от 15 до 30 стяжных призм.

При работе ТГ стяжные призмы подвергаются

значительным знакопеременным усилиям. Так, для генератора типа ТГВ-300 общее усилие прессовки в холодном состоянии составляет 900 тонн, в номинальном режиме – 600 тонн, при маневренных режимах и в условиях пусков и остановов оно может достигать 1200 тонн. Таким образом, одна призма в зависимости от режима работы подвергается нагрузке от 30 до 40 тонн.



1 – корпус генератора; 2 – нажимная плита; 3 – шейка призмы.

Рисунок 1. Торцевая зона сердечника статора ТГ

Активное железо статора при штатных режимах работы генератора вибрирует с частотой 100 Гц и амплитудой до 75 мкм, что создает предпосылки для самораскручивания гаек стяжных призм. Наиболее нагруженным является участок шейки призмы вблизи гайки. На этот участок призмы воздействуют максимальные усилия, вызванные знакопеременными осевыми и изгибающими напряжениями от радиальной вибрации, что достаточно часто приводит к обрыву шейки призмы [10]-[11].

Обрыв приводит к снижению усилия запрессовки активного железа на этом участке призмы. При обрыве призмы нагрузка перераспределяется на призмы, расположенные рядом, что создает предпосылки к их ускоренному разрушению и накоплению дефектов в статоре генератора.

При 5–6 оборванных шпильках, расположенных рядом (общее количество стяжных гаек в ТГ типа ТГВ-200 – 32 шт. с одной стороны корпуса статора), персонал выводит генератор в аварийный ремонт через недопустимую амплитуду вибраций сердечника.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время существующие методы контроля состояния запрессовки активного железа статора не отвечают современным требованиям и работы по созданию таких методов контроля являются актуальными.

В основу вибромеханического способа контроля положена зависимость вибромеханических характеристик пакета сердечника от прессования. Известная, специально предназначена для таких испытаний, аппаратура фирмы Брюль и Кьер (Brul & Cier). Молот-

ком со встроенным датчиком, наносят удар по сердцевине генератора с одной стороны статора, а с противоположной стороны статора фиксируют результирующий сигнал. Время прохождения сигнала вдоль сердечника статора дает возможность оценить плотность прессования. К недостаткам описанного метода следует отнести невысокую воспроизводительность результатов (порядка 55%), и нелинейный характер зависимости декремента затухания сигнала от давления прессования.

Ультразвуковой контроль выполняется в процессе ремонтного обслуживания. В основу метода положена экспериментально установленная зависимость скорости распространения звуковых колебаний поперек шихтованных пакетов от усилия прессования. При ослаблении прессования скорость звука уменьшается. Недостатками метода является то, что результаты измерения значительно зависят от навыков персонала и состояния активной стали.

Эти методы контроля состояния прессования статора на остановленной машине. На работающей машине контроль прессования сердечника статора значительно сложнее и методы контроля более сложные. Это в основном, тензометрические методы [14]-[17], методы измерения давления, емкостные, электромагнитные, тепловые и вибрационные методы.

Способ измерения усилий в стяжных призмах сердечника статора ТГ с использованием тензорезисторов, которые наклеиваются на шейку призм, описан в работе [18]. Недостатком способа является невозможность необходимого тарирования измерительных тензомостов на самых призмах. Более перспективным является способ, когда измерительные тензорезисторы наклеиваются на кольцевой упругий элемент, который устанавливается под стяжные гайки [19]. Недостатком способа является необходимость тарировать каждый отдельный сенсор до установки на турбогенераторе, а затем периодически его проверять.

Преобразователи усилий в стяжных призмах на основе емкостных сенсоров с изменяющимся зазором и аналогичного кольцевого упругого элемента, предложены в работе [20]. Измерители с таким и преобразователями дают возможность с высокой чувствительностью и точностью измерять малые линейные деформации последнего. Недостатком метода является ограниченная дистанционность измерения.

Так же есть сообщения о разработке измерителей усилий в стяжных призмах с использованием волоконно-оптических брэгговскими решетками (ВБР), которые как и тензорезисторы, наклеиваются на специальные упругие элементы, устанавливаемые под гайки [21], [22]. Технология изготовления таких волоконно-оптических измерителей в настоящее время является достаточно сложной и дорогой, требует применения специального технологического и метрологического оборудования, но они имеют большую перспективу в применении.

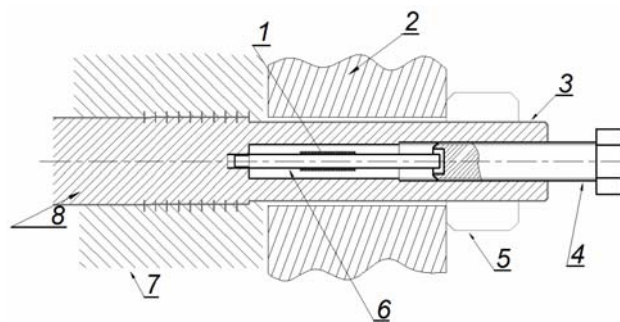
Все эти методы предполагают установления большого количества датчиков, и поэтому пока не нашли практического применения из-за сложности, дороговизны и неизвестной надежности, в условиях работы турбогенератора.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является создание нового метода и устройства контроля целостности стяжных призм, что позволит, при незначительных усовершенствованиях конструкции отдельных измерительных призм и относительно небольших затратах, получать информацию о состоянии (повреждении) всех стяжных призм и, следовательно, о степени прессовки железа статора в целом.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для практической реализации данного метода в торце шейки стяжной призмы просверливается канал таким образом, чтобы его конец на 20÷30 мм вошел в зону крепления призмы к сердечнику статора. Это база, относительно которой будут проводиться последующие измерения смещений шейки призмы. В канале тела призмы располагается стержень из стали или титана диаметром 10 мм, закрепленный по резьбе на внутреннем конце отверстия. Свободная же часть стержня упирается в нажимной болт или стандартный датчик на внешнем конце шейки призмы (рис. 2).



1 – тензорезистор, 2 – плита нажимная, 3 – шейка призмы, 4 – натяжной болт, 5 – гайка, 6 – титановый стержень, 7 – статор, 8 – призма.

Рисунок 2. Схема установки тензорезисторного датчика на титановом стержне в шейке призмы

Для проведения исследований в качестве материала стержня выбран титан, поскольку его удельная механическая прочность почти вдвое превышает удельную механическую прочность легированных сталей и, в то же время, при его растяжении (модуль упругости титана равен $1 \cdot 10^5$ МПа) удлинение такого образца в два раза больше, чем стального стержня (модуль упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа). Это позволяет увеличить точность измерений, в результате чего достоверность получаемой информации значительно повышается.

С помощью тензометрического (натяжного) болта создается предварительное усилие титанового стержня порядка 1÷1,5 т, фиксируемое с помощью регистрирующей аппаратуры, при этом возможные изменения положения или обрыв шейки призмы будут характеризоваться изменением сопротивления тензорезисторов на титановом стержне.

Расчет титанового стержня.

Первоначальная нагрузка титанового стержня (рис. 3), создаваемая нажимным болтом (рис. 4), определяется следующим образом.

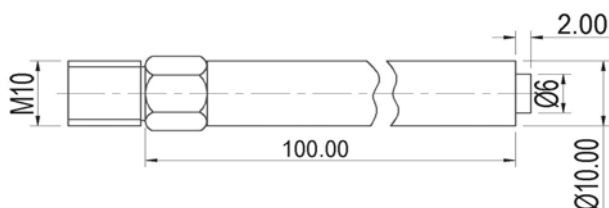


Рисунок 3. Размеры стержня для расчетов

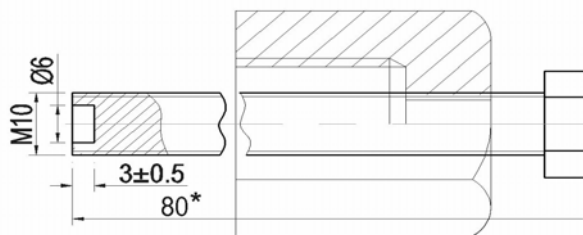


Рисунок 4. Размеры нажимного болта для расчета нагрузки, которая регулируется величиной крутящего момента

$$M_{кр} \approx \left[0,16 \frac{S}{d} + f \left(0,6 + \frac{R_{ср}}{d} \right) \right] * Qd \quad (1)$$

Отсюда

$$Q = \frac{M_{кр}}{\left[0,16 \frac{S}{d} + f \left(0,6 + \frac{R_{ср}}{d} \right) \right] * d} \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент; S – шаг резьбы; d – диаметр резьбы; $R_{ср}$ – средний радиус опорной поверхности гайки; f – коэффициент трения (в данном случае равен 0,2); Q – усилие затягивания.

В качестве материала стержня использован титан ВТЗ-1, имеющий предел текучести 850 МПа и модуль упругости $1,1 \cdot 10^5$ МПа, т.е., при одинаковых со стальным стержнем условиях, его сжатие в 2 раза больше, чем у последнего (модуль упругости стали $2,1 \cdot 10^5$ МПа), что повышает чувствительность измерений и позволяет получить более достоверный результат.

При внешнем диаметре стержня $d=10$ мм пре-

дельно допустимая нагрузка на сжатие $P_{ст}$ может быть найдена по формуле:

$$P_{ст} = \sigma_m S$$

где $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь сечения стержня; σ_t – предел текучести материала ВТЗ-1 (850 МПа):

$$P_{ст} = \frac{\pi}{4} 10^2 \cdot 850 = 66,725 \text{ кН} = 6800 \text{ кг} \quad | \text{ ©.}$$

Таким образом, стержень можно затягивать с усилием, не превышающим 6800 кг.

Для проверки стержня на прочность находим момент инерции сечения стержня $I = \frac{\pi r_1^4}{4}$ и, далее, по формуле Эйлера проводим проверку для наименьшего критического усилия $P_{кр}$:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости, ($1,1 \cdot 10^5$ МПа); I – момент инерции сечения стержня; l – длина стержня; r_1 – радиус стержня.

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 1,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{10}{2} \right)^4}{10^2} = 53,292 \text{ кН} = \text{кг},$$

что не превышает допустимую нагрузку на сжатие.

Точность расчетов проверялась на модели статора ТГ (рис. 5).

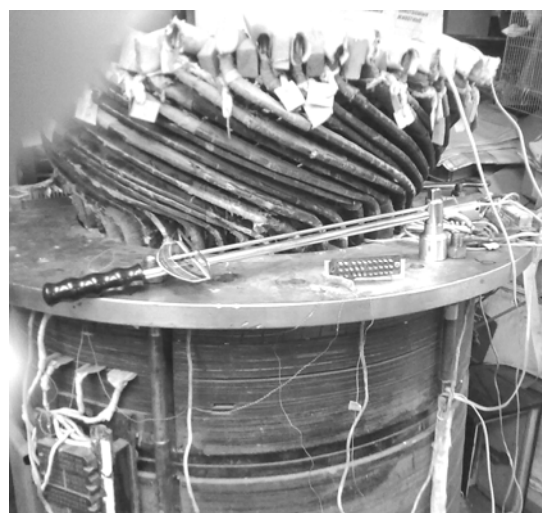


Рисунок 5. Физическая модель статора турбогенератора

Основные параметры модели: количество пазов статора – 48; диаметр расточки активного железа – 540 мм; высота зубца – 65 мм; высота спинки активного железа – 117 мм; внешний диаметр активного

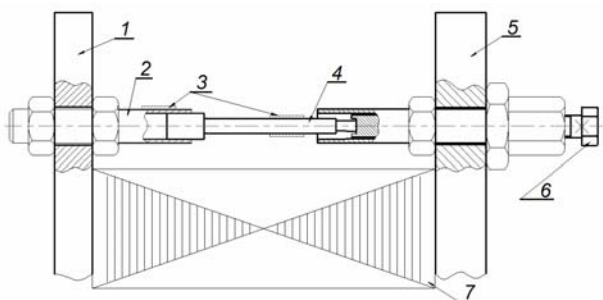
железа – 774 мм; диаметр стяжных плит – 900 мм; толщина стяжных плит – 27 мм; количество стяжных шпилек – 6; диаметр стяжных шпилек – 20 мм.

Плиты стягиваются шестью шпильками с гайками, чем создается усилие прессовки железа статора.

Усилие затягивания гаек на шпильках создается величиной крутящего момента (кг·м) с помощью динамометрического ключа.

Следует отметить, что в данном эксперименте одна из шпилек использована в качестве измерительной (в таблице 1 и 2 показана под №6).

Описанный выше метод контроля целостности шейки призмы на модели генератора реализуется следующим образом (рис. 6).



1 – опорная плита, 2 – шпилька измерительная, 3 – тензорезисторы, 4 – титановый стержень, 5 – нажимная плита, 6 – натяжной болт, 7 – статор

Рисунок 6. Принцип работы измерительной шпильки

В «левую» (нижнюю) плиту модели (база измерений) вкручивается стяжная измерительная шпилька длиной 580 мм, на конце которой закреплен титановый стержень длиной 100 мм с наклеенными фольговыми тензорезисторами КФ 5П1-50-120-А-12.

На «правой» (верхней) плите модели крепится соответствующая полая часть шпильки (направляющая для титанового стержня) с нажимным болтом.

На тело измерительной шпильки наклеены под углом 90° две системы тензорезисторов марки 5П1-10-200-А12 и марки 5П1-10-400-А12.

После наклеивания, просушки и проверки тензорезисторов на целостность, к ним припаиваются выводные провода, и подготовленная шпилька приобретает вид, приведенный на рис. 7.

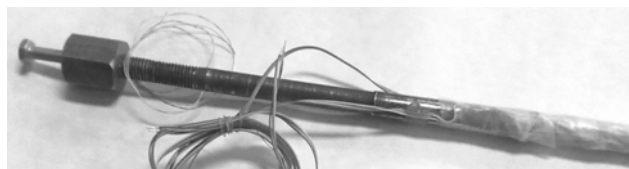


Рисунок 7. Измерительная шпилька в рабочем виде

Результаты исследований.

Перед началом эксперимента проводим тариро-

вание измерительной шпильки. Для этого устанавливаем шпильку на модель статора ТГ, нагружаем ее посредством динамометрического ключа и с помощью измерительного моста снимаем зависимость показаний тензорезистивных датчиков от нагрузки. Измерительная шпилька включает в себя две системы датчиков: на стержне внутри шпильки и на ее внешней поверхности.

Динамометрическим ключом нагружаем шпильку усилием 3 кг·м и, с помощью тензометрического болта, задаем начальное усилие в титановом стержне.

Исследования проводились путем последовательного снятия нагрузки (до 0 кг·м) со стяжных шпилек. При этом были исследованы различные варианты нарушения прессовки сердечника статора. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Данные эксперимента обрабатываются с помощью тензостанции ТОПА3-3-01, поступают на АЦП Е14-440, результаты измерений контролируются мостами постоянного тока УПИП-60Г (точность 10-2 Ом) и МОД-61 (точность 10-3 Ом).

Таблица 1. Изменения усилий в измерительной шпильке статора физической модели ТГ

Изменение сопротивления, Ом	Номер Шпильки (нагрузка, кг·м)					
	6	5	4	3	2	1
0,69	3	3	3	3	3	3
0,81	3	3	3	3	3	0
0,72	3	3	3	3	0	3
0,70	3	3	3	0	3	3
0,73	3	3	0	3	3	3
0,82	3	0	3	3	3	3

В табл. 1 приведены изменения усилий в измерительной шпильке статора физической модели ТГ при ослаблении стяжных усилий других шпилек при вариации их расположения относительно шпильки с датчиком. Измерительные тензорезисторы расположены внутри шпильки на титановом стержне.

Далее из табл. 1 выбраны параметры, которые соответствуют обрыву шпильки, и по этим данным построен график (рис. 8), который показывает зависимость напряжения в шпильке от места ее расположения относительно измерительной шпильки.

В табл. 2 приведены показания датчика усилий в измерительной шпильке при последовательном раскручивании гаек на физической модели ТГ. Две системы тензорезисторов наклеено снаружи на измерительной шпильке (марка 5П1-10-200-А12 и марка 5П1-10-400-А12).

Характер изменения усилий в измерительной шпильке подобен характеру изменения усилий, полу-

ченных расчетным путем.

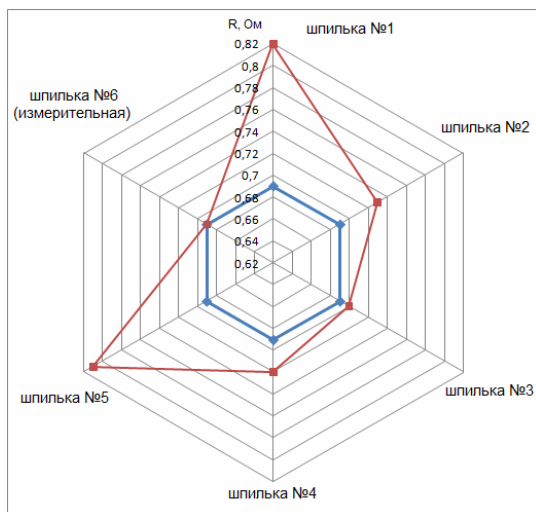


Рисунок 8. Показание датчика усилий в измерительной шпильке при последовательном раскручивании гаек на физической модели ТГ

Таблица 2. Показания датчика усилий в измерительной шпильке

5П1-10-200- А12	5П1-10-400- А12	№ ШПИЛЬКИ, нагрузка, кг·м					
		6	5	4	3	2	1
Изменение сопротивления, Ом							
0,95	0,36	3	3	3	3	3	3
0,98	0,42	3	3	3	3	3	0
0,96	0,40	3	3	3	3	0	3
0,95	0,37	3	3	3	0	3	3
0,96	0,41	3	3	0	3	3	3
0,97	0,43	3	0	3	3	3	3

Из табл. 1, 2 видно, что чувствительность датчиков на внешней поверхности призмы существенно меньше по сравнению с чувствительностью датчика на стержне.

V. ВЫВОДЫ

Получил дальнейшее развитие тензорезисторный метод контроля состояния прессовки сердечника статора мощных турбогенераторов в процессе эксплуатации.

Разработан способ выполнения и изготовлены специальные измерительные шпильки для физической модели статора турбогенератора с тензорезисторами с использованием принципа растягивания элементов с датчиками при изменении степени прессовки шихтованного сердечника.

Результаты экспериментов по контролю усилий стяжных призм статора показывают на существенное

повышение чувствительности измерения механических характеристик разработанными средствами в сравнении с известным способом измерения при установке датчиков на внешней поверхности шпилек. Чувствительность контролируемых к изменениям усилий в призмах параметров повышается практически в 2 раза при применении титанового стержня, расположенного в отверстии шпильки с установленным на нем датчиком.

Получены научные результаты в области контроля и диагностики механических дефектов статора таких машин. Анализ результатов по данным тензодатчиков позволяет определять степень распрессовки сердечника статора турбогенератора без снятия боковых щитов генератора (без вывода оборудования в ремонт) и, таким образом, перейти к планированию ремонтов и обслуживанию оборудования по его фактическому состоянию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шидловський, А.К. Розвиток паливно-енергетичного комплексу шляхом його модернізації [Текст] / Матеріали науково-практичної конференції «Утвердження інноваційної моделі розвитку економіки України» – 2003. – С. 121-131.
- [2] Кучинский, К.А. Термонапряженное состояние изоляции обмотки статора турбогенератора при различных вариантах ее крепления в торцевой зоне сердечника [Текст] / К.А. Кучинский // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2016. – №43. – С. 65-70.
- [3] Kuchynskiy, K. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area [Text] / K.Kuchynskiy, V.Titko, M.Hutorova, V.Mystetskiy, A.Khudyakov, V.Prus // Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems MEES'17. Kremenchuk, Ukraine. – 2017. – С. 308-311.
- [4] Васьковский, Ю.Н. Исследование и оптимизация устройства диагностики дефектов обмотки ротора короткозамкнутого асинхронного электродвигателя [Текст] / Ю.Н. Васьковский, М.А.Коваленко // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. –№2. – С. 12-17.
- [5] Кобозев, А. С. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кв [Текст] / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda, Л. Б. Жорняк, В. В. Моргун // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. –№2. – С. 66-73.
- [6] Бутов, А.В. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов [Текст] / А.В. Бутов, Л.Г. Мамиконянц, В.А. Пикульский // Электрические станции. – 2001. –№5. – С. 41-47.
- [7] Здановський, В.Г. Досвід експлуатації турбо-

- генераторів типу ТГВ з вичерпаним ресурсом на українських ТЕС [Текст] / В.Г. Здановський, Г.М. Федоренко // Новини енергетики. – 2001. – №9. – С. 63-67.
- [8] Алексеев, Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов [Текст] / Б.А. Алексеев. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
- [9] Зозулін, Ю.В. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій [Текст] / Ю.В. Зозулін, О.Ю. Антонов, В.М. Бичин та ін.. – Х.: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
- [10] Голоднова, О.С. О причинах повреждений торцевых зон сердечников статоров турбогенераторов и мерах по их предупреждению [Текст] / О.С. Голоднова, Г.В. Ростик // Энергетик. – 2005. – №1. – С. 17-20.
- [11] Кузнецов, Д.В. Дефекты турбогенераторов и методы их диагностики на начальной стадии появления [Текст] / Д.В. Кузнецов, В.В. Маслов, В.А. Пикульский // Электрические станции. – 2004. – №4. – С. 51-57.
- [12] Фирсанов Е. П. Исследование термомеханических процессов в одномерной системе прямолинейных механически связанных стержней [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11226.html>
- [13] Назолин, А.Л. Обнаружение дефектов машин и механизмов циклического действия по временным и виброакустическим параметрам [Текст]: автореф. дис. на получение научн. степени докт. техн. наук : 01.02.06 / Назолин Андрей Леонидович. — Москва, 2013. — 32 с.
- [14] Pat. US7946023B2 United States, МПК H02K15/00; G01R31/28; H01F3/04. Method and apparatus for measuring compression in a stator core / Cook, James Allan; Allen, David T. (USA); заявник і патентовласник Siemens Energy, Inc. (Orlando, USA). - № US11/285834; заяв. 11.22.05; опуб. 05.24.11. - Режим доступа: <http://patents.com/us-7946023.html>
- [15] Pat. US8156820B2 United States, МПК B25B 2.3/4 (2006.01). Device and method for tightening a nut placed on a threaded end, and assembled washer and nut for such a device / Nico Anthonie Dral, Matheus Theodoor Hendrik Marie Van Kortenhof; заявник і патентовласник Industrial Bolting Tech and Supply Group Industrial Bolting Tech And Supply Group BV - № 12/518588; заяв. 28.12.09; опуб. 13.05.10. - Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US8156820B2/en>.
- [16] Левицький, А.С. Волоконно-оптичні вимірювачі зусиль в стяжних призмах турбогенераторів на основі решіток Брегга [Текст] / А. С. Левицький, Є. О. Зайцев, К. О. Кобзар // Гідроенергетика України. – 2017. – №3-4. – С. 22-25.
- [17] Левицький, А.С. Пружний елемент перетворювача зусиль в стяжних призмах осердя статора потужного турбогенератора [Текст] / А. С. Левицький, Є. О. Зайцев, А. М. Смирнова // Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2018. – №49. – С. 32-39.
- [18] Остерник, Э. С. Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашин [Текст] / Э. С. Остерник // Вестник НТУ "ХПИ". – 2009. – №42. – С. 66-73.
- [19] Федоренко, Г.М. Методика и измерительные средства определения усилий прес-совки в сердечнике статора мощного турбогенератора [Текст] / Г.М. Федоренко, А.А. Бут, В.В. Кузьмин // Техн. электродинамика. – 1991. – №4. – С. 64-69.
- [20] Левицький А.С. Контроль стану потужних гідрота турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів [Текст] : монографія / А.С. Левицький, Г.М. Федоренко, О.П. Грубой; Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
- [21] Pat. 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; опубл. 02.02. 2012.
- [22] Pat. US9,016,991 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; опубл. 28.04.2015.

Стаття надійшла до редакції 09.10.2018

ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИЙ МЕТОД І ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

- КУЧИНСЬКИЙ К.А. д-р техн. наук, пров.н.с. Інституту електродинаміки НАН України, Київ, Україна, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com,
- ТИТКО В.А. канд. техн. наук, с.н.с., Інституту електродинаміки НАН України, Київ, Україна, e-mail: titko.ied@gmail.com,

КРАМАРСЬКИЙ
В.А.

канд. техн. наук, с.н.с., Інституту електродинаміки НАН України, Київ, Україна,

ГУТОРОВА М.С.

канд. техн. наук, н.с., Інституту електродинаміки НАН України, Київ, Україна,
e-mail: Gutorova@nas.gov.ua;

Мета роботи. Метою роботи є створення нового методу і пристрою контролю цілісності стяжних призм, що дозволить, при незначних удосконаленнях конструкції окремих вимірювальних призм, отримувати інформацію про стан (пошкодження) всіх стяжних призм і, отже, про ступінь пресування заліза статора в цілому.

Методи дослідження. Тензометричний метод фізичного моделювання, аналітичні розрахунки.

Отримані результати. Розроблено та досліджено на фізичній моделі турбогенератора потужністю 500 МВт експериментальний зразок пристрою контролю і діагностики стану пресування шихтованого осердя статора генератора.

Перевага методу контролю із застосуванням датчиків на базі тензорезисторів визначається відносно невисокою вартістю останніх, і при правильному виборі пружного елемента і конструкції можна здійснювати моніторинг елементів кріплення сердечника статора з досить високим ступенем точності.

Проведені випробування з моделюванням руйнування призм за допомогою зняття з них навантаження на моделі статора турбогенератора в лабораторних умовах показали задовільний збіг результатів експерименту і теоретичних розрахунків.

Дані про зміну напружено-деформованого стану стержнів моделі оцінювалися за допомогою тензорезисторів, наклеєних певним чином на вимірювальну шпильку. Основною перевагою запропонованого методу контролю зусиль в стяжній призмі є той факт, що вимірювання можуть проводитися на зупиненому турбогенераторі без зняття торцевих щитів, так як зусилля в стяжних призмах з урахуванням їх змін у разі пошкодження будь-якої призми зберігається і в неробочому стані.

Впровадження розробленого методу і пристрою дозволить не тільки запобігати аварійним ситуаціям, пов'язаними з поломкою стяжних призм, але і дасть можливість здійснювати постійний контроль за станом пресування осердя статора.

Наукова новизна. Запропоновано новий метод контролю стану стяжних призм осердя статора без зняття бічних щитів турбогенератора і вперше теоретично обґрунтована можливість застосування математичного апарату для визначення місця пошкодження і кількості призм з ослабленими гайками або розірваною різьбою.

Практична цінність. На базі фундаментальних результатів розроблено метод контролю і діагностики стану пресування осердя статора турбогенератора із застосуванням спеціальних вимірювальних шпильок. Запропонований метод дозволить без виведення генератора в ремонт, за показаннями датчиків, визначати кількість призм, що мають пошкодження і, таким чином, прогнозувати терміни подальшого ремонту.

Ключові слова: турбогенератор; кінцева зона; обмотка статора; пресування; тензометрія.

SHEAR RESISTANT METHOD AND DEVICE FOR MONITORING THE HEART OF A STATOR TURBOGENERATOR DURING THE OPERATION PROCESS

KUCHYNSKYI K.A.

Sci.D, Leading Researcher, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com;

KRAMARSKY V.A.

Ph.D, Senior Researcher, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

TITKO V.A.

Ph.D, Senior Researcher, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: titko.ied@gmail.com;

HUTOROVA M.S.

Ph.D, Researcher, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: Gutorova@nas.gov.ua;

Purpose. The aim of the work is to create a new method and device for monitoring the integrity of the coupling prisms, which will allow, with minor improvements in the design of individual measuring prisms, to obtain information on the state (damage) of all the coupling prisms and, therefore, on the degree of pressing of the stator iron as a whole.

Methodology. The tensometric method of physical modeling, analytical calculations.

Findings. An experimental model of a device for monitoring and diagnosing the state of pressing of a generator stator core was developed and investigated on a physical model of a 500 MW turbogenerator.

The advantage of the control method with the use of sensors based on strain gauges is determined by the relatively low cost of the latter, and with the right choice of elastic element and design, it is possible to monitor the mounting elements of the stator core with a fairly high degree of accuracy.

The tests carried out with the simulation of the destruction of prisms by removing from them the load on the models of the stator of the turbogenerator in laboratory conditions showed a satisfactory agreement between the results of the experiment and theoretical calculations. The data on the change in the stress-strain state of the rods of the model were evaluated using strain gauges pasted in a certain way on the measuring stud.

The main advantage of the proposed method of controlling forces in the clamping prism is the fact that measurements can be made on a stopped turbogenerator without removing the end shields, since the forces in the clamping prisms, taking into account their changes, in the event of damage to any prism remain inoperative.

The introduction of the developed method and device will not only prevent emergencies associated with the breakage of the coupling prisms, but also provide an opportunity to exercise constant monitoring of the state of pressing of the stator core.

Originality. A new method for controlling the state of coupling prisms of the stator core without removing the side panels of the turbogenerator is proposed, and for the first time theoretically substantiated the possibility of using a mathematical apparatus to determine the location of damage and the number of prisms with loosened nuts or broken threads.

Practical value. On the basis of fundamental results, a method for monitoring and diagnosing the state of pressing the stator core of a turbogenerator using special measuring studs has been developed. The proposed method will make it possible to determine the number of prisms that are damaged, and, therefore, to predict the timing of the subsequent repair without the output of the generator to be repaired, according to the readings of the sensors.

Keywords: turbogenerator; end zone; stator winding; pressing; strain gauge.

REFERENCES

- [1] Shidlovskij A.K. (2003) Rozvitok palivno-energetichnogo kompleksu shljahom jogo modernizacii [Development of the fuel and energy complex through its modernization]. Materiali naukovopraktichnoi konferencii «Utverdzhennja innovacijnoi modeli rozvitku ekonomiki Ukraïni» [Proc. of the Int. Conf. " Approval of an innovative model for the development of the Ukrainian economy ".], 121–131. (in Ukrainian.)
- [2] Kuchinskij K.A. (2016) Termonaprijazhennoe sostojanie izoljacii obmotki statora turbogeneratora pri razlichnyh variantah ee kreplenija v torcevoj zone serdechnika. [Thermally stressed state of insulation of the stator winding of the turbogenerator with different variants of its mounting in the end zone of the core.]. Praci In-tu elektrodynamiky NAN Ukraïny, 43, 65-70.
- [3] Kuchynskiy K., Titko V., Hutorova M., Mystetskiy V., Khudyakov A., Prus V. (2017) Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems MEES'17, 308–311.
- [4] Vas'kovskij Ju.N., Kovalenko M.A. (2012) Yssledovanye y optymizacija ustrojstva dyagnostyky defektov obmotky rotora korotkozamknutogo asynhronnogo elektrodygatelja [Research and optimization of the device for diagnosing defects in the winding of a rotor of a short-circuited asynchronous electric motor]. Elektrotehnika i elektroenergetyka, 2, 12-17.
- [5] Kobozev A. S., Sereda A. G., Zhornjak L. B., Morgun V. V. (2012) Modernizacija zashhity jelektrostanovok sobstvennyh nuzhd AJeS naprijazheniem 0,4 kv [Modernization of protection of electrical installations of own needs of NPPs with a voltage of 0.4 kV]. Elektrotehnika i elektroenergetyka, 2, 66-72.
- [6] Butov A.V., Mamikonjanc L.G., Pikul'skij V.A. (2001) Povrezhdaemost' i kontrol' zubcovyh zon zapechennyh krajnih paketov stali serdechnikov statorov turbogeneratorov [Damage and control of the tooth zones of the baked outer packets of steel cores of stators of turbogenerators]. Jelektricheskie stancii, 5, 41-47.
- [7] Zdanovskij V.G., Fedorenko G.M. (2001) Dosvid ekspluatacii' turbo-generatoriv typu TGV z vycherpanym resursom na ukrai'ns'kyh TES [Experience of operation of turbogenerators of the type DVB with exhausted resource at Ukrainian TPPs]. Novyny energetyky, 9, 67-63.
- [8] Alekseev B.A. (2001) Opređenje sostojanija (diagnostika) krupnyh turbogeneratorov [Determination of the state (diagnostics) of large turbine generators]. Moscow, NTs ENAS Publ., 152.
- [9] Zozulin Ju.V. (2011) Stvorennja novih tipiv ta modernizacija dijuchih turbogeneratoriv dlja teplovih elektrichnih stancij [Creation of new types and modernization of existing turbine generators for thermal electric power stations]. Harkiv, PF « Kolegium » Publ., 228.
- [10] Golodnova O.S., Rostik G.V. (2004) O prichinah povrezhdenij torcevyh zon serdechnikov statorov turbogeneratorov i merah po ih preduprezhdeniju [On

- the causes of damage to the end zones of the stator cores of the turbogenerator-tori and measures to prevent them]. St. Petersburg, Sbornik «Elektrosila», 43, 56-64.
- [11]Kuznecov D.V., Maslov V.V., Pikul'skij V.A. (2004) Defekty turbogeneratorov i metody ih diagnostiki na nachal'noj stadii pojavlenija [Defects of turbogenerators and methods of their diagnostics at the initial stage of appearance]. Jelektricheskie stancii, 4, 51-57.
- [12]Firsanov E. P. (2011) Issledovanie termomechanicheskikh processov v odnomernoj sisteme prjamolinyh mehanicheski svjazannyh sterzhnej [Investigation of thermomechanical processes in a one-dimensional system of rectilinear mechanically connected rods]. – Access mode: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11226.html>
- [13]Nazolin, A.L. (2013) Obnaruzhenie defektov mashin i mehanizmov ciklicheskogo dejstvija po vremennym i vibroakusticheskim parametram [Detection of defects of machines and mechanisms of cyclic action on time and vibroacoustic parameters]. avtoref. dis. na poluchenie nauchn. stepeni dokt. tehn. nauk : 01.02.06, 32.
- [14]Cook J. A., Allen D.T. Method and apparatus for measuring compression in a stator core. Patent U.S. no. 7946023, 2011.
- [15]Nico Anthonie Dral, Matheus Theodoor Hendrik Marie Van Korten Hof Device and method for tightening a nut placed on a threaded end, and assembled washer and nut for such a device. Patent U.S. no. 8156820, 2010.
- [16]Levyckij A. S., Zajcev Je. O., Kobzar K. O. (2017) Volokonno-optychni vymirjuvachi zusyl' v stjaznyh pryzmah turbogeneratoriv na osnovi reshitok Bregga [Fiber Optic Measuring Factors in Brazing Pins of Turbogenerators Based on Bragg Grates]. Hidroenergetyka Ukrainy, 3-4, 22-25.
- [17]Levytskyi A.S., Zaitsev Ye. O., Smyrnova A.M. (2018) Pruzhnyj element peretvorjuvacha zusyl' v stjaznyh pryzmah oserdja statora potuzhnogo turbogeneratora [Elastic element of the power transformer in the coupling prisms of the stator core of a powerful turbogenerator]. Pr. In-tu elektrodynamiky NANU, 49, 32-39.
- [18]Osternik, Je. S. (2009) Modelirovanie i analiz pogreshnostej shem pri issledovanii naprjazhenij v moshhnyh jelektromashinah [Modeling and analysis of circuit errors in the study of voltages in high-power electric machines]. Vestnik NTU "HPI", 42, 66-73.
- [19]Fedorenko G.M., But A.A., Kuz'min V.V. (1991) Metodika i izmeritel'nye sredstva opredelenija usilij pressovki v serdechnike statora moshhnogo turbogeneratora [Technique and measuring tools for determining the pressing forces in the stator core of a powerful turbo-generator]. Tehn. jelektrodinamika, 4, 64-69.
- [20]A.S. Levic'kij, G.M. Fedorenko, O.P. Gruboj (2011) Kontrol' stanu potuzhnyh gidro- ta turbogeneratoriv za dopomogoju emnisnih vimirjuvachiv parametriv mehanichnih defektiv [Control of the state of powerful hydro and turbogenerators by means of capacitive measuring instruments of mechanical defects parameters]. In-t jelektrodinamiki NAN Ukrainy, 242.
- [21]Pat. US9,016,991 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 28.04.2015.
- [22]Pat. 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; Date of Patent 02.02. 2012.