

УДК 621.317.39

## **КОНТРОЛЬ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ СБОРКЕ**

*А. С. ЛЕВИЦКИЙ, Е. А. ЗАЙЦЕВ, М. В. ПАНЧИК*

Институт электродинамики НАН Украины  
Киев, Украина

UDC 621.317.39

## **TURBOGENERATOR STATOR CORE ASSEMBLY CONTROL**

*A. S. LEVYTSKYI, I. O. ZAITSEV, M. V. PANCHUK*

**Аннотация.** Разработан метод автоматического контроля ослабления монолитности сердечника статора мощного турбогенератора, предназначенный для обнаружения дефектов при сборке сердечника на заводе-изготовителе. Для контроля используется многосенсорная информационно-измерительная система с тензометрическим преобразователем удельного давления прессования в  $N$  точках поперечного сечения сердечника, где устанавливаются легко деформируемые контрольные пробы. Приведена разработанная конструкция устройства, в которой реализован предложенный метод. Устройство в виде специального нажимного кольца устанавливается на торцевую поверхность сердечника.

**Ключевые слова:** турбогенератор, сердечник статора, сборка, прессование, давление, контроль, измерительная ячейка, деформируемая проба, мембрана с жестким центром, тензометрический сенсор.

**Abstract.** In this paper was proposed method for hardness weakening powerful turbine generator stator core automatic control. It's method designed to detect defects during core assembly at the manufacturing plant. A multi-sensor information-measuring system with a strain-gauge transducer of the specific pressing pressure at  $N$  points of the core cross-section is used for control, where easily deformable control samples are installed. The developed design of the device, which implements the proposed method, is presented. The system in the form of a special pressure ring is installed on the end surface of the core.

**Key words:** turbogenerator, stator core, assembly, compression, control, measuring cell, deformable test, rigid center membrane, strain gauge sensor.

Сердечник является одним из основных узлов статора мощного турбогенератора (ТГ). Его работоспособность в основном определяется состоянием упругого сжатия, которое он первоначально получает на заводе-изготовителе во время сборки и прессовки. Как правило, при сборке сердечника штампованные и лакированные сегменты из электротехнической стали должны быть уложены со сравнительно высокой точностью и спрессованы с одинаковой плотностью по всему объему сердечника для обеспечения вибрационной устойчивости и заданных электромагнитных характеристик [1]. Но во время сборки и прессовки сердечника через различные технологические причины (неравномерность листов по толщине, неравномерность лакового покрытия и т. д.) появляются неравномерности в

его монолитности в разных точках поперечных сечений. Эти неравномерности, то есть местные уменьшения монолитности, необходимо диагностировать в как можно большем количестве точек поперечного сечения сердечника.

Самым простым способом диагностирования является способ обнаружения мест с ослабленной прессовкой с применением специальных щупов или ножей, которые вводятся между листами пакета [2, 3]. Мерой спрессованности является величина заглублиения клиновидного щупа между отдельными листами. Такой метод занимает много времени, неточен и субъективен. К тому же проникновение щупа между листами может привести к дефектам лаковой изоляции и, как следствие, к образованию замкнутых контуров и возникновению локальных перегревов сердечника во время работы машины.

Существует способ контроля сердечника с измерением усилий сжатия пакета сердечника с применением специальных устройств в виде штангенциркуля или струбцины [1, 4]. Во время контроля их губки через вентиляционные каналы охватывают отдельные пакеты. Ненормированное уменьшение толщины пакета под действием зажимных губок указывает на местные неплотности сердечника. Способ также трудоемок и, как правило, его применение позволяет проведение контроля только со стороны рашотки сердечника.

Применение вибротехнического [5] и ультразвукового [6] методов контроля для обнаружения дефектных мест в сердечнике при сборке из-за сложности устройств затруднительно.

На Государственном предприятии «Завод «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина) был разработан метод обнаружения участков сердечника с ослабленной монолитностью во время сборки и прессовки. Для этого под нажимным кольцом прессы в 45 точках на торцевой поверхности сердечника помещаются специальные пробы из легкодеформируемого материала (например, свинца) [7]. При этом деформация проб будет зависеть от величины дефекта сердечника, в зоне которого они расположены: наибольшая деформация будет соответствовать наименьшему дефекту и, наоборот, наименьшая деформация – наибольшему дефекту. Равномерное расположение контрольных проб по торцу сердечника (три пробы на один сегмент) обеспечивается применением дополнительного нажимного кольца на прессе с вставленными контрольными ячейками с пробами. Метод применен при сборке и прессовке сердечника статора ТГ типа ТГВ-250-2ПТЗ. Недостатком устройства является низкая производительность труда, так как оценка деформации проб производится вручную, без автоматизации.

В данной работе представлен метод автоматического контроля сердечника статора мощного ТГ при его сборке и прессовании, в котором степень дефекта сердечника определяется с использованием системы

контрольных легкодеформируемых свинцовых проб и измерителя удельного давления, действующего на каждую пробу. Величина удельного давления с помощью специальных тензорезисторов преобразуется в электрический сигнал.

Устройство, реализующее метод, представляет собой дополнительное нажимное кольцо с контрольными ячейками. На прессе кольцо устанавливается на торцевую поверхность сердечника под нажимное кольцо, являющееся технологической оснасткой при прессовании. Дополнительное кольцо получило наименование «нижнее нажимное кольцо», а кольцо технологической оснастки – «верхнее нажимное кольцо». Контрольные ячейки устанавливаются равномерно по кольцу из расчета три ячейки на один стальной сегмент сердечника. Например, если по кольцу сердечника устанавливается 15 сегментов, то количество контрольных ячеек  $N = 45$ . В состав устройства также входят электронный блок регистрации и обработки измерительной информации и соединительные кабели между контрольными ячейками и электронным блоком.

Схема установки дополнительного кольца на прессе показана на рис. 1, общий вид дополнительного кольца – на рис. 2, принцип работы контрольной ячейки – на рис. 3.

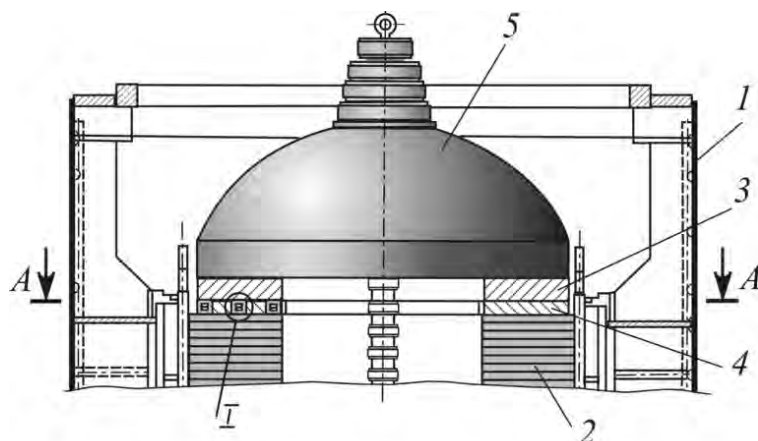


Рис. 1. Схема установки дополнительного нажимного кольца на прессе: 1 – корпус статора ТГ; 2 – сердечник статора ТГ; 3 – верхнее нажимное кольцо; 4 – нижнее дополнительное нажимное кольцо; 5 – зонтичный пресс; I – контрольная ячейка

На рис. 3 показано: 1 – сердечник статора; 2 – верхнее нажимное кольцо пресса; 3 – нижнее нажимное кольцо пресса; 4 – стакан; 5 – недеформированная свинцовая проба; 5.1 – деформированная свинцовая проба; 6 – втулка; 7 – мембрана с жестким центром; 8 – тензорезисторы.

Высота втулки 6 выбрана из условия – расстояние между ее верхней поверхностью и верхней поверхностью кольца 3 примерно равно толщине пробы 5 и одинаково для всех контрольных ячеек.

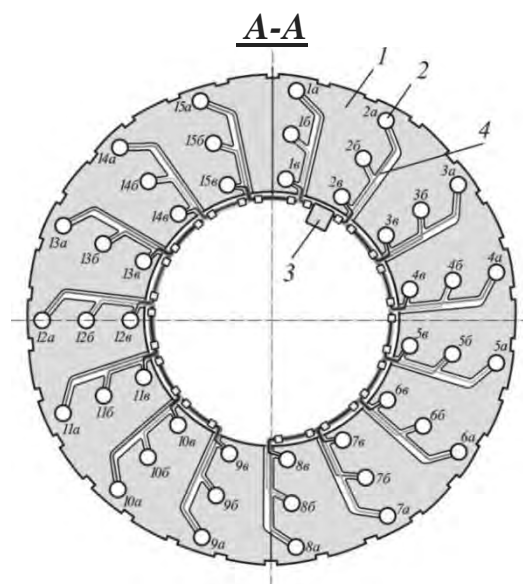


Рис. 2. Общий вид дополнительного кольца: 1 – металлический диск; 2 – контрольная ячейка; 3 – кабели; 4 – электронный блок регистрации и обработки измерительной информации

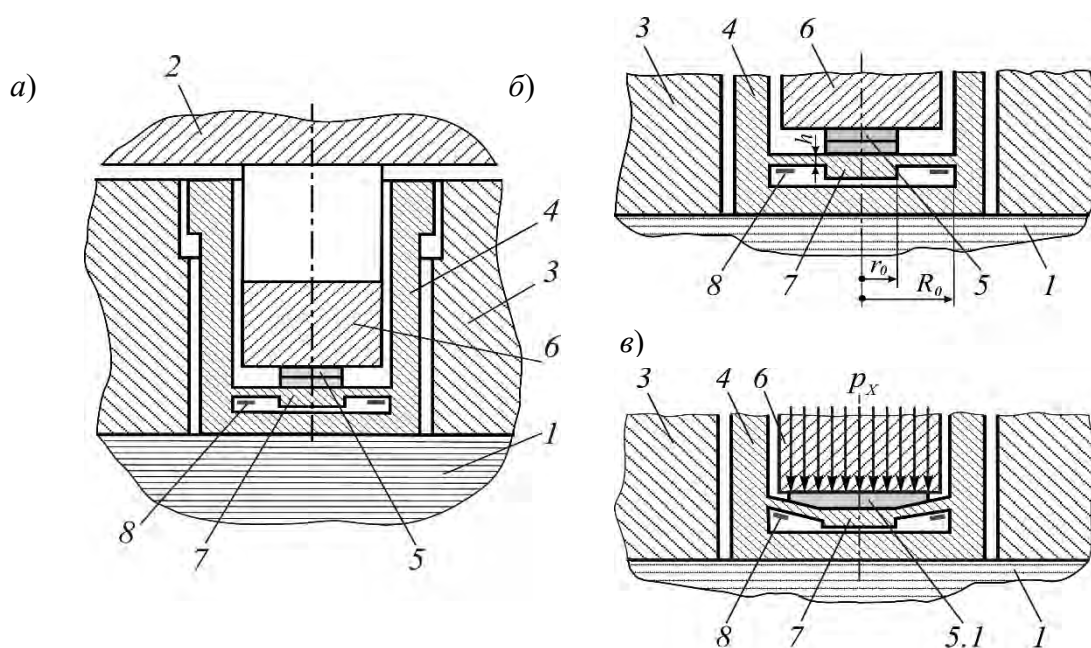


Рис. 3. Принцип работы контрольной ячейки: а – общая конструктивная схема ячейки; б – состояние мембраны и контрольной пробы до приложения давления пресса; в – состояние мембраны и контрольной пробы после приложения давления пресса

Во время прессования сердечника удельное давление пресса  $p_x$  через втулку 6 воздействует на пробу 5 и мембрану 7 (см. рис. 3, в). Проба 5 будет деформирована, мембрана 7 прогнется, в ней возникнут радиальные  $\sigma_r$  напряжения и, соответственно, относительные радиальные  $\epsilon_r$  деформации.

Учитывая, что мембрана есть симметричная круглая пластина, в ней по дуге одного радиуса  $r$  напряжения и относительные деформации будут одинаковыми. Схема для расчета мембраны с жестким центром показана на рис. 4.

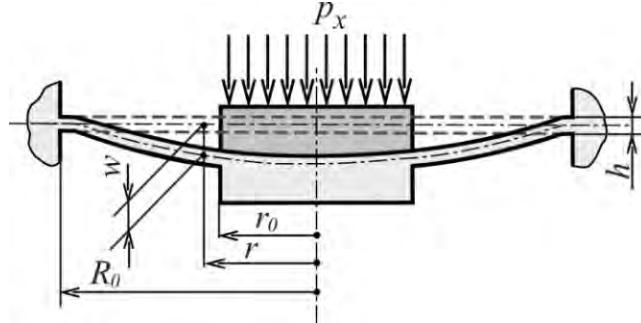


Рис. 4. Расчетная схема мембраны

Величины деформаций в отдельной точке плоской части мембраны зависят от удельного давления пресса, геометрических размеров мембраны и механических характеристик ее материала и могут быть определены по следующим формулам:

$$\varepsilon_r = \frac{w}{1-\mu^2} \left[ C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3p_x r^2}{16D} + \mu \left( C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{p_x r^2}{16D} \right) \right], \quad (1)$$

где  $w = A_r \frac{p_x R_0^4}{Eh^3}$ ;  $A_r = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4}$ ;  $C_1 = -\frac{p_x}{16D} (r_0^2 - R_0^2)$ ;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

$p_x$  – удельное давление пресса;  $E$  – модуль упругости материала мембраны;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $R_0$  – внешний радиус мембраны;  $r_0$  – радиус жесткого центра мембраны;  $h$  – толщина мембраны;  $w$  – прогиб средней линии мембраны в точке с радиусом  $r$ ;  $c = r/r_0$ .

Как известно, относительные радиальные деформации  $\varepsilon_r$  поверхности можно измерить, используя тензорезисторы, и изменение их активного сопротивления при изменении нагрузки можно определить по формуле [11–13]

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \varepsilon_r,$$

где  $K_T$  – коэффициент тензочувствительности, который зависит от изменения формы тензорезистора и изменения удельного сопротивления;  $\varepsilon_r$  – относительная радиальная деформация.

Вариант размещения тензорезисторов на мембране с жестким центром, при котором обеспечивается высокая чувствительность и линейность измерения относительных радиальных деформаций тензометрическим мостом с четырьмя тензорезисторами, приведен на рис. 5.

На рис. 5, а показано: 1 – мембрана с жестким центром; 2 – тензорезисторы, размещенные в зоне заземления мембраны (для измерения относительной радиальной деформации мембраны; 3 – тензорезисторы, размещенные возле жесткого центра мембраны. Схема включения тензорезисторов в тензометрический мост изображена на рис. 5, б.

Измерив деформации и в указанных точках мембран, определяют давление прессования в каждой из  $N$  ячеек, а учитывая то, что это давление благодаря неравномерной монолитности сердечника после прессования из-за наличия дефектов будет разным, автоматически определяются расположение дефектов и их величина.

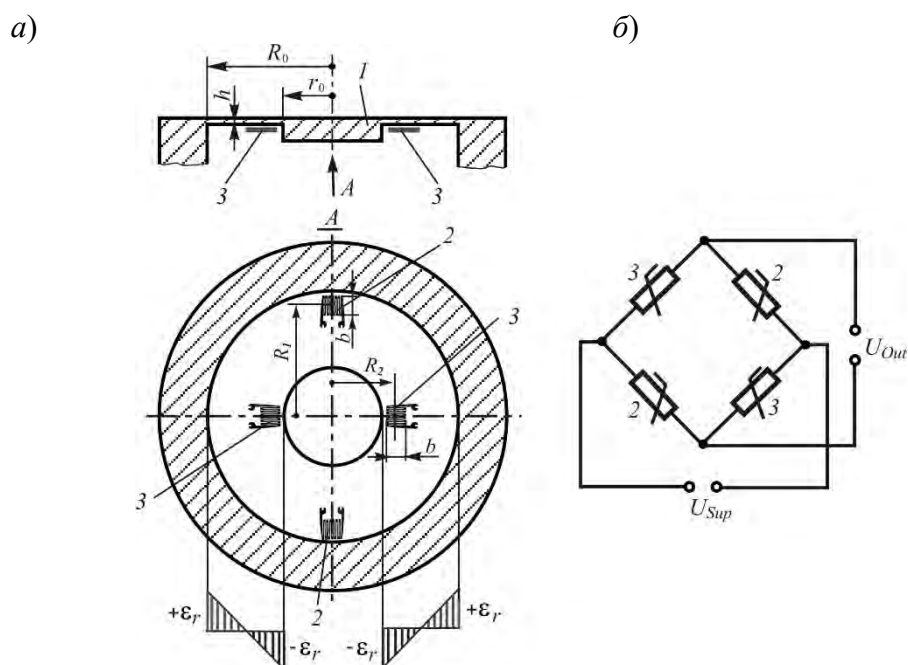


Рис. 5. Схема измерения относительных радиальных деформаций мембраны с жестким центром с использованием четырехплечего тензометрического моста

### Выводы

Использование устройства позволит повысить производительность труда при контроле сердечника мощного турбогенератора при сборке и прессовке на заводе-изготовителе, с большей достоверностью диагностировать дефекты сердечника и как результат – повысить надежность электрической машины и ее долговечность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фомин, Б. П.** Технология крупного электромашиностроения. Турбогенераторы / Б. П. Фомин, Б. Г. Циханович, Г. М. Виро. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1981. – Т. 1. – 303 с.
2. Справочник по ремонту турбогенераторов / С. Е. Пузаков [и др.]; под ред. Х. А. Бекова и В. В. Барило. – Москва: ИПК госслужбы, ВИПКэнерго, 2006. – 724 с.
3. **Алексеев, Б. А.** Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б. А. Алексеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭНАС, 2001. – 152 с.
4. Stator core compressibility test. Available at [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test>. – Data of access: 07.07.2020.
5. **Григорьев, А. В.** Применение параметра поглощения энергии колебаний для контроля прессовки сердечников статоров турбогенераторов / А. В. Григорьев, В. Н. Осотов, Д. А. Ямпольский // Электротехника. – 2004. – № 11. – С. 16–19.
6. Способ диагностики состояния сердечника статора электрической машины: пат. RU 2223587 / В. С. Шаронин, А. В. Полторадня. – Опубл. 10.02.2004.
7. Контроль осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування / В. Ф. Пінської [и др.] // Гідроенергетика України. – 2020. – № 1–2. – С. 55–58.
8. **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1981. – 392 с.
9. **Скворцов, П. А.** Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «Кремний на сапфире»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / П. А. Скворцов. – Москва, 2019. – 20 с.
10. **Тиняков, Ю. Н.** О расчете мембран датчиков давления / Ю. Н. Тиняков, А. С. Николанева // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2015. – № 6. – С. 135–142.
11. **Бауман, Э.** Измерение сил электрическими методами: пер. с нем. / Э. Бауман. – Москва: Мир, 1978. – 430 с.
12. **Dan Mihai Stefanescu.** Handbook of Force Transducers: Principle and Components / Dan Mihai Stefanescu. – Berlin: Springer, 2011. – 612 p.
13. Guide to the Measurement of Force. The Institute of Measurement and Control. – London: Originally published, 1998. – 46 p.

E-mail: zaitsev@i.ua.