

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-303-313>

УДК 621.317.39; 621.317.3

Метод контроля сердечника статора мощного турбогенератора

А. С. Левицкий¹⁾, Е. А. Зайцев¹⁾, М. В. Панчик¹⁾

¹⁾Институт электродинамики Национальной академии наук Украины (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Статья посвящена разработке автоматического метода и устройства для контроля прессовки сердечника статора мощного турбогенератора при сборке на заводе-изготовителе. Сердечник собирается и прессуется в вертикальном положении отдельными частями, на каждом этапе необходимо отслеживать места с ослабленной монолитностью. Неравномерность плотности спрессованности ведет к относительному смещению листов активной стали и потерям в железе, а также появлению и развитию дефектов (разрыхлению зубцов крайних пакетов, выкрашиванию фрагментов листов активной стали, местному замыканию листов и нагреву пакетов), что в итоге может стать причиной тяжелых аварий и выхода турбогенератора из строя. Существующие методы, в том числе автоматические, не позволяют выполнить качественный контроль. Предложенный авторами метод обнаружения мест с ослабленной монолитностью основан на автоматическом измерении удельного давления прессовки при деформации специальных контрольных проб. Разработано реализующее его устройство, представляющее собой кольцо, устанавливаемое на торцевую поверхность сердечника. В кольце равномерно размещены ячейки с контрольными пробами. Наибольшее уменьшение толщины пробы, вызванное наибольшим удельным давлением, соответствует наименьшему дефекту, и наоборот. В качестве преобразователя давления предлагается использовать плоскую металлическую мембрану и емкостный датчик с цифровым выходом. Рассчитаны и экспериментально проверены характеристики преобразователя. Обработка результатов измерения удельного давления осуществляется с помощью специального электронного блока. Разработанное устройство позволяет улучшить производительность труда при контроле сердечника, с большей достоверностью диагностировать дефекты и устранять их и в конечном счете повысить надежность турбогенератора и его долговечность.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, сборка, прессовка, давление, контроль, измерительная ячейка, деформируемая проба, мембрана с жестким центром, емкостный сенсор

Для цитирования: Левицкий, А. С. Метод контроля сердечника статора мощного турбогенератора / А. С. Левицкий, Е. А. Зайцев, М. В. Панчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 4. С. 303–313. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-303-313>

Адрес для переписки

Зайцев Евгений Александрович
Институт электродинамики
Национальной академии наук Украины
просп. Победы, 56,
03057, г. Киев, Украина
Тел.: +38 044 366-24-70
zaitsev@i.ua

Address for correspondence

Zaitsev Ievgen O.
Institute of Electrodynamics
of the National Academy of Sciences of Ukraine
56, Peremogy Ave.,
03057, Kyiv, Ukraine
Tel.: +38 044 366-24-70
zaitsev@i.ua

Method for Monitoring the Stator Core of a Powerful Turbo Generator

A. S. Levitskyi¹⁾, Ye. O. Zaitsev, M. V. Panchik¹⁾

¹⁾Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Abstract. The article is devoted to the development of an automatic method and device for monitoring the pressing of the stator core of a powerful turbo generator during its assembling at the manufacturer. The core is assembled and pressed in an upright position in separate parts; at each stage, it is necessary to monitor places with weakened solidity. The unevenness of the compaction density causes a relative displacement of the active steel sheets and losses of iron, as well as the appearance and development of certain defects (loosening of the teeth of the extreme packages, coloring of fragments of the active steel sheets, local closure of the sheets and heating of the packages), which can eventually cause severe accidents and failure of the turbo generator. Existing methods, including automatic ones, do not allow performing reliable monitoring. The method proposed by the authors for detecting places with weakened solidity is based on automatic measurement of the specific pressure of pressing during deformation of special control samples. A device for its implementation has been developed, which is a ring installed on the end surface of the core. Cells with control samples are evenly placed in the ring. The largest decrease in the sample thickness caused by the highest specific pressure corresponds to the smallest defect, and vice versa. As a pressure converter, it is proposed to use a flat metal membrane and a capacitive sensor with a digital output. The characteristics of the converter were calculated and experimentally verified. The specific pressure measurement results were processed using a special electronic unit. The device that has been developed makes it possible to improve labor productivity when monitoring the core, diagnose defects with greater reliability and eliminate them, and, ultimately, increase the reliability of the turbo generator as well as its durability.

Keywords: turbo generator, stator core, assembly, pressing, pressure, monitoring, measuring cell, deformable sample, rigid center membrane, capacitive sensor

For citation: Levitskyi A. S., Zaitsev Ye. O., Panchik M. V. (2021) Method for Monitoring the Stator Core of a Powerful Turbo Generator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (4), 303–313. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-303-313> (in Russian)

Введение

Основным узлом статора мощного турбогенератора (ТГ) является его сердечник, масса которого составляет около 2/3 массы всего статора. Другие составные части статора могут быть отремонтированы или заменены, тогда как неисправность сердечника означает необходимость замены всего статора. Поэтому контроль за его состоянием и обнаружение дефектов должны осуществляться как на этапе сборки, так и в процессе работы машины с учетом режимов [1–8].

Работоспособность сердечника определяется в основном состоянием упругого сжатия, задаваемого во время сборки и прессовки на заводе-изготовителе. В дальнейшем в спрессованном состоянии сердечник удерживается с помощью нажимных плит (фланцев) и стяжных шпилек (призм). При сборке сердечника штампованные и лакированные сегменты из электротехнической стали должны быть уложены со сравнительно высокой точностью и спрес-

сованы с одинаковой плотностью по всему объему для обеспечения вибрационной устойчивости и заданных электромагнитных характеристик [9]. Укладку сегментов производят вручную [9] либо с использованием роботов [10, 11].

Сердечник собирается на специальном стенде и прессуется отдельными частями толщиной 500–600 см. Формы и размеры сегментов активной стали обеспечивают внешний и внутренний диаметры сердечника, определенную геометрию пазов под укладку стержней обмотки, а также базирование собранного сердечника в корпусе статора.

Одним из факторов, влияющих на качество монолитности сердечника, является усилие прессования, которое для каждого типа ТГ определяется исходя из его технических характеристик по методике, описанной в [9].

При недостаточной силе прессования коэффициент заполнения сердечника сталью низкий, что вызывает появление вибрации и специфического шума при работе ТГ. Вибрация машины и отдельных листов сердечника, в свою очередь, ведет к разрушению лаковой межлистовой изоляции, поломке слабо спрессованных стальных листов, смежных с вентиляционными каналами, ослаблению вентиляционных распорок в сердечнике и другим повреждениям активной стали. Значительная вибрация листов сердечника в зубцовой зоне представляет особую опасность для изоляции обмотки, так как вызывает истирание в местах, прилегающих к участкам вибрации, а также излом зубцов.

При чрезмерном прессовании также может нарушаться изоляционное покрытие листов. Кроме того, растут механические напряжения в элементах крепления сердечника к корпусу статора, что ведет к их деформации и поломке, отрыву шпилек от корпуса статора, нарушению сварных швов и т. д. [9].

Во время сборки и прессовки сердечника в силу различных технологических причин (неравномерность толщины листов, лакового покрытия и т. д.) в тех или иных точках поперечных сечений появляются местные уменьшения монолитности. Для их ликвидации в ослабленные места сердечника устанавливаются специальные клинья. Однако для выполнения ремонта необходимо провести диагностику монолитности в как можно большем количестве точек.

Обнаружение дефектов в спрессованном сердечнике осуществляется различными методами. Самый простой способ определения мест с ослабленной прессовкой заключается в применении специальных щупов или ножей, вводимых между листами пакета [1, 2, 12]. При этом мерой спрессованности является величина заглубления 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, образованию замкнутых контуров и возникновению локальных перегревов сердечника во время работы машины.

Существует способ контроля спрессованности специальными устройствами в виде штангенциркуля или струбцины [9, 13, 14]. Отдельные пакеты через вентиляционные каналы охватываются зажимными губками инструментов. Ненормированное уменьшение толщины пакета под действием губок указывает на местные неплотности. Данный способ трудоемкий и позволяет проводить исследование только со стороны расточки сердечника.

В основу вибромеханического способа контроля положена зависимость вибромеханических характеристик пакета сердечника (резонансной частоты колебаний и логарифмического декремента возбужденных колебаний) от его спрессованности [15, 16]. К недостаткам метода относятся сложность реализующих его устройств и неудовлетворительная повторяемость результатов измерений.

Ультразвуковой метод использует зависимость скорости распространения звуковых колебаний поперек шихтованных пакетов от давления прессовки [17]. Его применение также затруднительно из-за сложности устройств.

В [18] описана многоточечная система контроля сердечника с помощью датчиков, электрическая емкость которых изменяется в зависимости от давления прессовки. Датчики жестко соединены со специальными стеклотекстолитовыми сегментами, форма и толщина которых соответствуют сегментам электротехнической стали. Сегменты устанавливаются между листами стали при изготовлении сердечника и после опрессовки остаются в пакете, т. е. предназначены для одноразового использования.

На Государственном предприятии «Завод «Электротяжмаш» (Украина, г. Харьков) разработан метод обнаружения участков сердечника с ослабленной монолитностью во время сборки и прессовки. Для этого в 45 точках на торцевой поверхности сердечника помещаются специальные пробы из материала (например, свинца), который легко деформируется при приложении к нему давления [19]. При этом деформация проб зависит от величины дефекта сердечника, в зоне которого они расположены: наибольшая деформация соответствует 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. Его недостатком является низкая производительность труда, так как оценка деформации проб производится вручную, без автоматизации.

В настоящей статье представлен метод автоматического контроля сердечника статора мощного ТГ, в котором степень дефекта сердечника определяется с использованием системы контрольных легкодеформируемых свинцовых проб и измерителя удельного давления, действующего на каж-

дую пробу. Удельное давление вызывает осевое перемещение мембраны с жестким центром, которое в дальнейшем с помощью емкостного измерителя перемещений преобразуется в электрический сигнал.

Основная часть

Устройство для автоматического контроля сердечника статора мощного ТГ представляет собой нажимное кольцо с контрольными ячейками. Оно устанавливается как дополнительный элемент 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», при этом диаметры колец равны. Контрольные ячейки устанавливаются равномерно по кольцу из расчета три ячейки на один стальной сегмент сердечника. Например, если по кольцу сердечника устанавливаются 15 сегментов, то количество контрольных ячеек 45 [20]. Ниже представлены схема установки дополнительного кольца (рис. 1), его общий вид (рис. 2), конструктивная схема контрольной ячейки и способ ее установки (рис. 3), где А–А – вид на нажимное кольцо с контрольными ячейками; I – дополнительное выносное изображение контрольной ячейки.

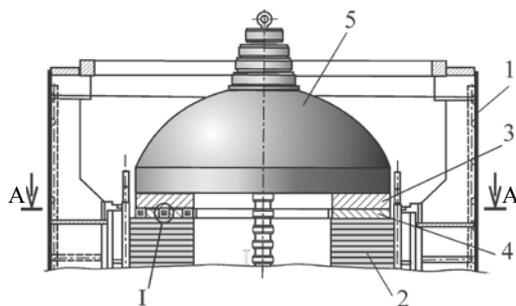
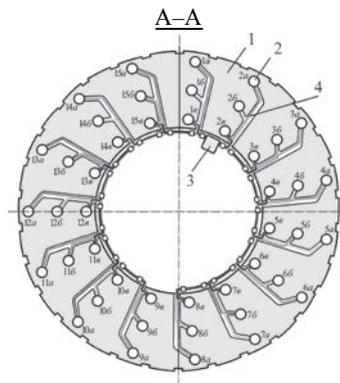


Рис. 1. Схема установки дополнительного нажимного кольца на прессе:
1 – корпус статора; 2 – сердечник статора; 3 – верхнее нажимное кольцо;
4 – нижнее дополнительное нажимное кольцо; 5 – зонтичный пресс

Fig. 1. Installation diagram of an additional pressure ring on the press:
1 – stator housing; 2 – stator core; 3 – upper pressure ring;
4 – lower additional pressure ring; 5 – umbrella press

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

Fig. 2. General view of the additional ring:
1 – metal disk; 2 – control cell; 3 – cables;
4 – electronic unit for recording and processing
measurement information



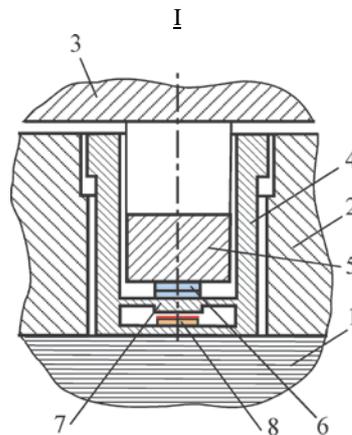


Рис. 3. Конструктивная схема контрольной ячейки и способ ее установки: 1 – сердечник статора; 2 – нижнее нажимное кольцо; 3 – верхнее нажимное кольцо; 4 – обойма; 5 – втулка; 6 – контрольная свинцовая проба; 7 – плоская мембрана с жестким центром; 8 – диэлектрическая пластина с тонкопленочным плоским электродом

Fig. 3. Structural layout of the control cell and method of its installation: 1 – stator core; 2 – lower pressure ring; 3 – upper pressure ring; 4 – holder; 5 – bushing; 6 – control plumbum sample; 7 – flat rigid center membrane; 8 – dielectric plate with a thin film flat electrode

В контрольной ячейке жесткий центр мембраны и электрод диэлектрической пластины образуют измерительный конденсатор с плоскопараллельными электродами, в котором жесткий центр заземлен. Состояние мембраны и емкостного сенсора до приложения усилия прессования показано на рис. 4.

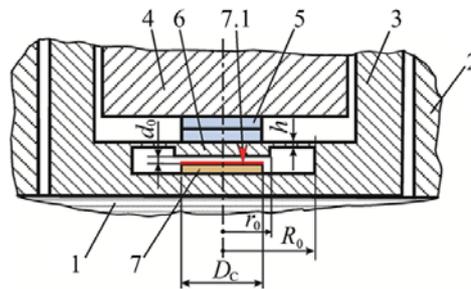


Рис. 4. Состояние мембраны и электродов емкостного сенсора до приложения усилия прессования: 1 – сердечник статора; 2 – нижнее нажимное кольцо; 3 – обойма; 4 – втулка; 5 – проба; 6 – жесткий центр мембраны; 7 – диэлектрическая пластина; 7.1 – электрод емкостного сенсора; R_0 – внешний радиус мембраны; r_0 – радиус жесткого центра мембраны; h – толщина мембраны; D_c – диаметр электрода; d_0 – начальный зазор в емкостном сенсоре

Fig. 4. The state of the membrane and electrodes of the capacitive sensor before applying the pressing force: 1 – stator core; 2 – lower pressure ring; 3 – holder; 4 – bushing; 5 – sample; 6 – membrane rigid center; 7 – dielectric plate; 7.1 – capacitive sensor electrode; R_0 – the outer radius of the membrane; r_0 – radius of the rigid center of the membrane; h – membrane thickness; D_c – electrode diameter; d_0 – initial clearance in the capacitive sensor

Усилие прессы через верхнее кольцо и втулку передается на пробу, вызывая деформацию пробы и прогиб мембраны (рис. 5). При этом зазор в емкостном датчике, т. е. расстояние между жестким центром мембраны и плоским электродом, изменится от d_0 до d_x .

Изменение зазора можно вычислить и как перемещение жесткого центра мембраны W_x [21]

$$W_X = A_p \frac{p_X R_0^4}{Eh^3},$$

где $A_p = f(k) = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \cdot \frac{k^4 - 1 - 4k^2 \ln k}{k^4}$, $k = R_0/r_0$; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала мембраны.

Рис. 5. Состояние мембраны и электродов емкостного сенсора после приложения усилия прессования: 1 – деформированная мембрана; 2 – деформированная проба; p_X – удельное давление прессования; d_X – зазор в емкостном сенсоре после приложения усилия прессования

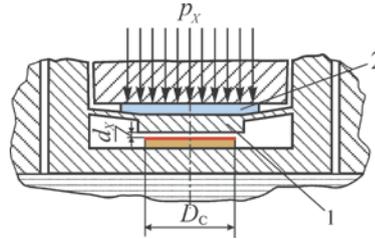


Fig. 5. The state of the membrane and electrodes of the capacitive sensor after applying the pressing force: 1 – deformed membrane; 2 – deformed sample; p_X – specific pressing pressure; d_X – clearance in the capacitive sensor after applying a pressing force

При этом электрическая емкость сенсора C_X в зависимости от перемещения жесткого центра мембраны W_X определяется выражением

$$C_X = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_c^2}{4(d_0 - W_X)},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Так как контрольной величиной при прессовании сердечника является удельное давление пресса p_X , выражение для емкости сенсора запишем в виде

$$C_X = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\pi D_c^2}{4 \left(d_0 - A_p \frac{p_X R_0^4}{Eh^3} \right)}.$$

Для измерения емкости применен вторичный измерительный преобразователь, электрическая принципиальная схема которого показана на рис. 6.

Измеренное в каждой ячейке значение емкости в цифровом коде передается в электронный блок при помощи кабелей (рис. 2). Обработка результатов производится с помощью специального программного обеспечения, и на дисплее ПК отображается диаграмма с указанием в относительных величинах дефектов в каждой контрольной точке.

В Институте электродинамики Национальной академии наук Украины разработан один из возможных вариантов конструкции контрольной ячейки, САД-модель которой показана на рис. 7. Емкостный преобразователь выполнен в виде отдельного узла, на котором в центральной части сфор-

мирован неподвижный кольцевой электрод емкостного сенсора, а вокруг него – все остальные элементы вторичного преобразователя. Фотография узла показана на рис. 8.

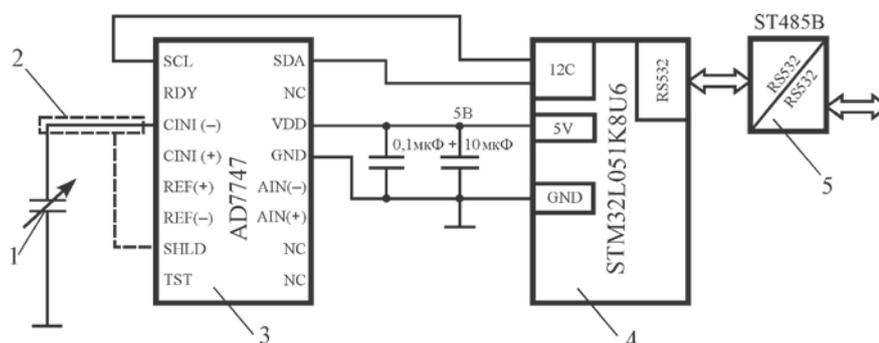


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема вторичного измерительного преобразователя: 1 – переменный плоскопараллельный рабочий конденсатор; 2 – экран для защиты рабочего конденсатора от паразитных наводок; 3 – 24-разрядный преобразователь; 4 – микроконтроллер; 5 – преобразователь интерфейсов

Fig. 6. Circuit diagram of the secondary measuring transducer: 1 – alternating plane-parallel working capacitor; 2 – screen to protect the working capacitor from spurious interference; 3 – 24-bit converter; 4 – microcontroller; 5 – interface converter

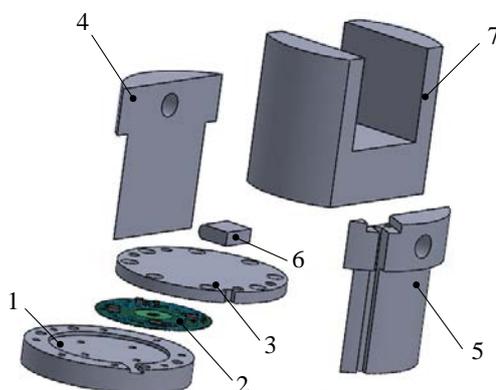


Рис. 7. CAD-модель контрольной ячейки: 1 – дно; 2 – емкостный преобразователь; 3 – мембрана; 4 – левая стойка; 5 – правая стойка; 6 – проба; 7 – втулка

Fig. 7. CAD-model of the control cell: 1 – bottom; 2 – capacitive transducer; 3 – membrane; 4 – left rack; 5 – right rack; 6 – sample; 7 – bushing

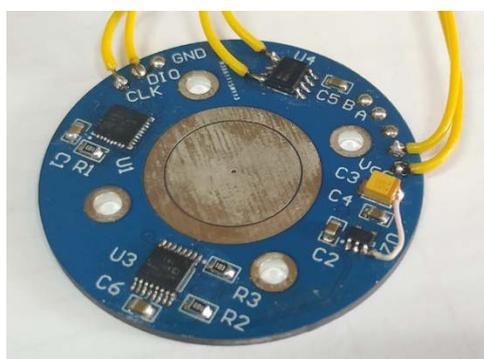


Рис. 8. Преобразователь «электрическая емкость – цифровой код»
Fig. 8. “Electrical capacitance – digital code” converter

Расчетная характеристика преобразователя $C_X = f(p_X)$ показана на рис. 9.

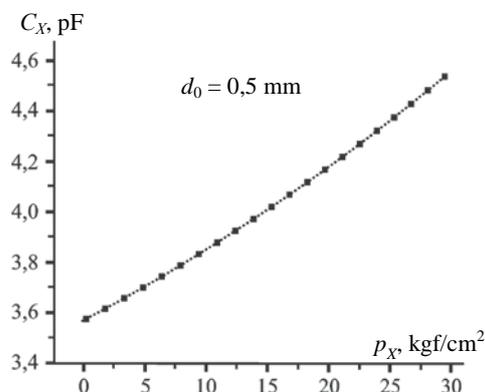


Рис. 9. Расчетная характеристика преобразователя

Fig. 9. Converter calculated characteristic

Испытания экспериментального образца разработанной контрольной ячейки при прессовке сердечника статора ТГ типа ТГВ-250-2ПТЗ на заводе «Электротяжмаш» показали ее работоспособность и подтвердили основные расчетные характеристики.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод автоматического контроля сердечника статора мощного турбогенератора на заводе-изготовителе для обнаружения дефектов в виде ослабления монолитности. Используется измерение удельного давления прессования в различных точках поперечного сечения сердечника, где устанавливаются легкодеформируемые контрольные пробы.

2. Для реализации предложенного метода разработана конструкция устройства в виде нажимного кольца, устанавливаемого на торцевую поверхность сердечника.

3. Разработан емкостный преобразователь удельного давления прессования, расчетные характеристики которого подтверждены экспериментами.

4. Использование устройства позволит повысить производительность труда при контроле сердечника, с большей достоверностью диагностировать дефекты и устранять их и, как результат, повысить надежность электрической машины и ее долговечность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tavner, P. J. Core Faults in Large Generators / P. J. Tavner, A. F. Anderson // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 2005. Vol. 152, Iss. 6. P. 1427–1439. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050102>.
2. Kuznetsov, D. V. Investigation of Features of Localization of Defects of Stator Core Elastic Suspension Systems in High-Power Turbogenerators / D. V. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86, Iss. 10. P. 612–619. <https://doi.org/10.3103/S1068371215100119>.
3. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов / А. В. Бутов [и др.] // Электрические станции. 2001. № 5. С. 41–48.
4. Кенсицкий, О. Г. Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора / О. Г. Кенсицкий, Д. И. Хвалин, К. А. Кобзарь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>.

5. Хвалин, Д. И. Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины / Д. И. Хвалин, О. Г. Кенсичкий, К. А. Кобзарь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>.
 6. Zaitsev, Ie. O. Capacitive Distance Sensor with Coplanar Electrodes for Large Turbogenerator Core Clamping System / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Apr. 16–18, 2019, Kiev. P. 644–647. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>.
 7. Левицкий, А. С. Измерение хода тарельчатых пружин в силовых аккумуляторах сердечника статора турбогенератора с помощью емкостного сенсора / А. С. Левицкий, Е. А. Зайцев, К. А. Кобзарь // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 2. С. 121–129. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129>.
 8. Zaitsev, Ie. O. Hybrid Capacitive Sensor for Hydro- and Turbo Generator Monitoring System / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES-17), Nov. 15–17, 2017, Kremenchuk. P. 288–291. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.
 9. Юхимчук, В. Д. Технология производства электрических машин / В. Д. Юхимчук. Харьков: Тимченко, 2006. 543 с.
 10. Patil, A. Modeling a Virtual Prototype of Stator Core Lamination Assembly Device / A. Patil, S. Biswas // International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication. 2013. Vol. 1, Iss. 10. P. 32–35.
 11. Geddam, P. Developing a Virtual Prototype for Stacking Laminations in Stator Core of Turbogenerator Using Robot Simulation Software / P. Geddam, B. K. Barik // Journal of Material Science and Mechanical Engineering. 2015. Vol. 2, Iss. 5. P. 456–460.
 12. Справочник по ремонту турбогенераторов / С. Е. Пузаков [и др.]; под общ. ред. Х. А. Бекова, В. В. Барило. М.: ИПКгосслужбы, ВИПКэнерго, 2006. 724 с.
 13. 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.
 14. Stator Core Compressibility Test [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.slide-share.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test>. Date of access: 28.05.2020.
 15. Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможностей их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора / А. В. Григорьев [и др.] // Электротехника. 2003. № 8. С. 36–41.
 16. Применение параметра поглощения энергии колебаний для контроля прессовки сердечников статоров турбогенераторов / А. В. Григорьев [и др.] // Электротехника. 2004. № 11. С. 16–19.
 17. Способ диагностики состояния сердечника статора электрической машины: пат. 2223587 РФ, МПК НО2 К15/00, НО2 К15/02 / В. С. Шаронин, А. В. Полторадня. Оpubл. 10.02.2004.
 18. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю. В. Зозулін [та ін.]. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
 19. Контроль осердя статора потужного турбогенератора під час складання і пресування / В. Ф. Пінської [та ін.] // Гідроенергетика України. 2020. № 1–2. С. 55–58.
 20. Пристрій для контролю осердя статора потужного турбогенератора: заявка на патент України № а 2020 02912, МКИ Н02 К 15/00 / А. С. Левицкий [та ін.]. Оpubл. 14.05.2020.
 21. Андреева, Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
- Поступила 22.06.2020 Подписана в печать 08.09.2020 Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Tavner P. J., Anderson A. F. (2005) Core Faults in Large Generators. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, 152 (6), 1427–1439. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20050102>.
2. Kuznetsov D. V. (2015) Investigation of Features of Localization of Defects of Stator Core Elastic Suspension Systems in High-Power Turbogenerators. *Russian Electrical Engineering*, 86 (10), 612–619. <https://doi.org/10.3103/S1068371215100119> (in Russian).

3. Butov A. V. et al. (2001) Damageability and Control of the Tooth Zones of Baked End Packages of Steel Cores of Stators of Turbogenerators. *Elekticheskie Stantsii = Electrical Stations*, (5), 41–48 (in Russian).
4. Kensytskyi O. H., Hvalin D. I., Kobzar K. O. (2019) The Mathematical Model of Coupling Calculation the Electromagnetic Field and Heats of End Zone Powerful Turbogenerator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46> (in Russian).
5. Hvalin D. I., Kensytskyi O. H., Kobzar K. O. (2021) Simulation of Electromagnetic Field of a Powerful Electrical Machine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142> (in Russian).
6. Zaitsev Ie. O., Levytskyi A. S., Kromplyas B. A. (2019) Capacitive Distance Sensor with Coplanar Electrodes for Large Turbogenerator Core Clamping System. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Apr. 16–18, 2019, Kiev, 644–647. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783916>.
7. Levitskyi A. S., Zaitsev I. O., Kobzar K. O. (2018) Measuring the Stroke of Cone Disk Springs in Power Accumulators of the Turbogenerator Stator Core Using a Capacitive Sensor. *Pribyori i Metody Izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 9 (2), 121–129. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-121-129> (in Russian).
8. Zaitsev Ie. O., Levytskyi A. S., Kromplyas B.A. (2017) Hybrid Capacitive Sensor for Hydro- and Turbo Generator Monitoring System. *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES-17)*, Nov. 15–17, 2017, Kremenchuk, 288–291. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248913>.
9. Yuhimchuk V. D. (2006) *The Production Technology of Electric Machines*. Kharkov, Timchenko Publ. 543 (in Russian).
10. Patil A., Biswas S. (2013) Modeling a Virtual Prototype of Stator Core Lamination Assembly Device. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 1 (10), 32–35.
11. Geddam P., Barik B. K. (2015) Developing a Virtual Prototype for Stacking Laminations in Stator Core of Turbogenerator Using Robot Simulation Software. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 2 (5), 456–460.
12. Puzakov S. E., Golodnova O. S., Rostik G. V., Kutukov L. G., Zav'yalov G. V., Tkacheva L. N. (2006) *Reference Guide for the Repair of Turbo Generators*. Moscow, IPKgosluzhby, VIPKenergo Publ. 724 (in Russian).
13. Alekseev B. A. (2001) *Determination of the State (Diagnosis) of Large Turbogenerators*. 2nd ed. Moscow: NTs ENAS Publ. House. 152 (in Russian).
14. *Stator Core Compressibility Test*. Available at: <https://www.slideshare.net/donaldsatrianistephen/stator-core-compr-test> (Accessed 28 May 2020).
15. Grigoriev A. V. et al. (2003) Investigation of the Vibromechanical Characteristics of an Electrical Steel Package and the Possibilities of their Use for Monitoring the Pressing of a Stator Core of a Turbogenerator. *Elektrotekhika = Electrical Engineering*, 8, 36–41 (in Russian).
16. Grigoriev A. V., Osotov V. N., Yampol'skii D. A. (2004) The Use of the Parameter of Absorption of Vibrational Energy to Control the Pressing of the Cores of Stators of Turbogenerators. *Elektrotekhika = Electrical Engineering*, 11, 16–19 (in Russian).
17. Sharonin V. S., Poltoradnya A. V. (2004) *A Method for Diagnosing the State of the Stator Core of an Electric Machine*. Patent RF. No 2223587 (in Russian).
18. Zozulin Yu. V., Antonov V. E., Borichevskii A. M., Bychik V. N., Kobzar K. A., Livshits A. L., Rakogon V. G., Rogovoi I. Kh., Khaimovich L. L., Cherednik V. I. (2011) *Creation of New Types and Modernization of Existing Turbogenerators for Thermal Power Plants*. Kharkiv, Kolegium Publ. 228 (in Ukrainian).
19. Pinskiy V. F., Zakhoshaev V. M., Shoful A. K., Levitsky A. S. (2020) Stator Core Control of a Powerful Turbogenerator During Assembly and Pressing. *Gidroenergetika Ukrainy [Hydropower of Ukraine]*, (1–2), 55–58 (in Ukrainian).
20. Levitsky A. S. [et al.] (2020) *Device for Monitoring the Stator Core of a Powerful Turbogenerator*. Patent Application of Ukraine No a 2020 02912 (in Ukrainian).
21. Andreeva L. E. (1981) *Elastic Elements of Devices*. 2nd ed. Moscow, Mechanical Engineering Publ. 392 (in Russian).