

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТАТОРОВ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, ВЫЗВАННЫХ ВИБРАЦИЕЙ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ (АНАЛИЗ, ГИПОТЕЗЫ, ЭКСПЕРИМЕНТ)

*Аналіз відмов турбогенераторів ТВВ-1000-2 засвідчив, що найбільш вразливою ланкою є статор ТГ, особливо такі елементи статора, як стяжні призми, зубці крайніх пакетів осердя статора, вивідні та з'єднувальні шини обмотки статора. Основною причиною руйнування вищезазначених елементів конструкції статора є утомні явища, викликані підвищеною вібрацією під впливом осевих змінних сил електромагнітного походження. Запобігти руйнації згаданих елементів конструкції можливо впровадженням вібромоніторингу і вібродіагностики.*

*Анализ отказов турбогенераторов ТВВ-1000-2 показал, что наиболее уязвимым звеном является статор ТГ, такие его элементы, как стяжные призмы, зубцы крайних пакетов сердечника, выводные и соединительные шины обмотки статора. Основной причиной разрушения вышеназванных элементов является усталость металлов, вызванная повышенной вибрацией под влиянием осевой переменной силы электромагнитного происхождения. Предотвратить разрушения элементов конструкции возможно внедрением вибромониторинга и вибродиагностики.*

В настоящее время в электроэнергетике Украины большая часть оборудования отработала либо приближается к отработке рабочего ресурса, что вызывает его повышенную повреждаемость. К такому оборудованию относятся пять турбогенераторов ТВВ-1000-2УЗ на 3000 об/мин, установленных на трёх атомных электростанциях – Южноукраинской, Хмельницкой и Ровенской.

Аналитический обзор и системный анализ отказов и дефектов статоров турбогенераторов ТВВ-1000-2УЗ

производства ОАО "Электросила", выявленных на пяти турбогенераторах за многие годы их эксплуатации, показал [7], что к числу наиболее повреждаемых элементов конструкции статора данных турбогенераторов относятся:

- тяжёлые призмы статора (рис. 1);
- зубцы крайних пакетов сердечника статора (рис. 2);
- выводные и соединительные шины лобовых частей обмотки статора (рис. 3).



Рис. 1. Усталостный излом хвостовика стяжной призмы по резьбе М64х4 турбогенератора ТВВ 1000-2УЗ



Рис. 2. Фрагменты разрушенных зубцов сердечника статора турбогенератора ТВВ 1000-2У

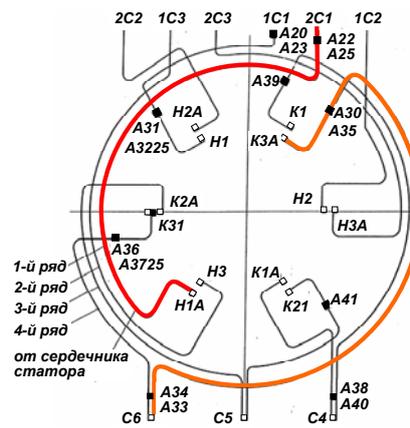


Рис. 3. Схема установки виброакселерометров FOA-100 и датчиков ИПА-9. Условные обозначения: ■ – датчики. Буквенные обозначения: **С** – секция шины; **Н** – начало шины; **К** – конец шины; **А** – датчик

При анализе причин разрушения тяжёлых призм в основу была положена теория усталостного разрушения материалов, с помощью которой были получены расчетные результаты, позволяющие определить время эксплуатации ТГ (в виде количества циклов знакопеременной силы, изменяющейся с частотой 100 Гц) до разрушения хвостовиков тяжёлых призм.

В предположении 10-летнего периода эксплуатации ТГ, оценка циклически изменяющейся осевой силы, приложенной к торцевым элементам сердечника и способной вызвать разрушение тяжёлых призм, была выполнена на основе теории усталостного разрушения и составила 514 кН (52,41 тонны) [4, 6]. При этом 10 годам непрерывной работы ТГ соответствовало  $3.153 \cdot 10^{10}$  циклов изменения осевой силы с частотой 100 Гц.

Параллельно было проведено математическое моделирование электромагнитных вибровозмущающих

осевых сил в сердечнике статора для разных режимов работы ТГ. Эти силы воздействуют на крайние пакеты, экран, нажимную плиту и нажимные пальцы торцевых зон сердечника статора и **передаются тяжёлым призмам**. Моделирование выполнялось с помощью методов теории электромагнитного поля с использованием двухмерной и трехмерной моделей торцевой зоны. При этом амплитуда действующей на сердечник суммарной осевой электромагнитной вибровозмущающей силы, полученная для номинального режима работы ТГ составила 541,6 кН (55,22 тонны) [4, 8].

Сравнение найденного значения электромагнитной силы в 55,22 тонны со значением силы в 52,41 тонны, рассчитанной по условиям усталостного разрушения хвостовиков тяжёлых призм, демонстрирует

достаточно хорошее совпадение двух результатов, что свидетельствует об адекватности разработанной методики расчета вибровозмущающих сил. Некоторое расхождение величины силы, полученной в результате электромагнитных расчетов, от величины силы, полученной методами сопротивления материалов деформации и разрушению, может быть объяснено влиянием следующих причин:

- в реальной конструкции ТГ действует сложное сочетание различных факторов, влияющих на усталостную прочность призм, которые практически не поддаются строгому анализу;
- характеристики материала стяжных призм получены на опытных образцах в лабораторных условиях, при которых невозможно учесть поведение той или иной конструктивной детали, выполненной из данного материала, в реальном сложном изделии, каким является турбогенератор;
- кроме того, выполненные оценки не учитывают изменения температуры призм и возникающих при этом термомеханических напряжений.

Несмотря на то, что полученные выше результаты носят приближенный характер, они раскрывают тенденции поведения стяжных призм под воздействием осевых знакопеременных сил в процессе длительной эксплуатации ТГ.

Исходя из результатов системного анализа отказов и дефектов статоров турбогенераторов ТБВ-1000-2У3, было также проведено моделирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора [3]. Была предложена расчетная модель, позволяющая объяснить явление разрушения зубцов резонансными процессами, обусловленными вибрациями сердечника статора.

Известно, что с целью уменьшения вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора выполняется их скос. Другими словами, ряд примыкающих к торцу сердечника пакетов выполняется с различной высотой зубцов, причем, чем ближе расположен пакет к торцу, тем меньше высота его зубца. Например, в турбогенераторе ТБВ-1000-2У3 высота зубцов статора изменяется от 222 мм (пакеты в центральной активной зоне) до 50 мм (на торце статора).

При оценке прочности зубца было учтено изменение характеристик его шихтованной (клеевой) структуры при длительном многоцикловом нагружении, так как под влиянием температуры нагрева и вибрации существенно снижаются прочность и диэлектрические свойства клеевых эпоксидных соединений.

Предположив, что вследствие разрушения клевого слоя расслоение зубца произошло лишь в одном месте пакета, две отдельные части зубца могут резонировать самостоятельно. В экстремальном случае зубец может быть расслоен (распушен) на отдельные листы стали. Для нескольких характерных случаев расслоения зубца расчёты показали, что с уменьшением толщины отслоенной части зубца происходит снижение собственных частот его поперечных колебаний, т.е. отдельные его части могут резонировать самостоятельно. Это может вызывать резкое повышение амплитуды колебания и, как следствие, возрастание деформации и механических напряжений, что ускоряет процесс разрушения зубца.

Таким образом, предложенная гипотеза объясняет причины, приводящие к разрушению зубцов, расслоением склеенных пакетов сердечника вследствие потери склеивающих и изолирующих свойств клея при длительной эксплуатации турбогенератора и повышенной вибрацией отдельных групп листов электротехни-

ческой стали под воздействием вибровозмущающих сил разного происхождения.

Заслуживают внимания результаты экспериментальных исследований вибраций на ТГ третьего блока ЮУ АЭС с целью определения причин повреждаемости междуфазных соединительных шин обмотки статора турбогенератора (рис. 3.)

При измерении вибраций использовалась не принятая на станции характеристика вибрации – виброперемещение (измеряемая в микронах), а виброускорение, непосредственно регистрируемое вибродатчиками.

Запись вибраций происходила на протяжении примерно 14 часов на стадии запуска турбоблока после внеочередного ремонта ТГ.

Экспериментально показано, что ряд соединительных шин совершают вынужденные колебания на частотах 100, 200, 300 и других частотах, кратных 100 Гц (рис. 4, 5).

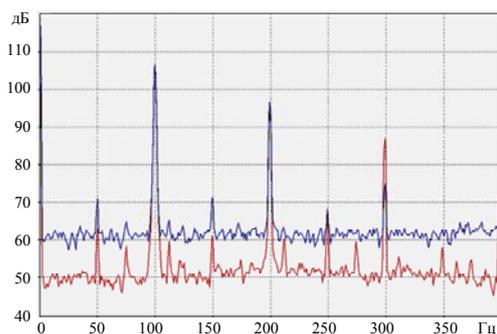


Рис. 4. Фрагмент спектрограммы вибрации соединительной шины обмотки статора ТГ ТБВ 1000-2У3 в начале набора активной мощности

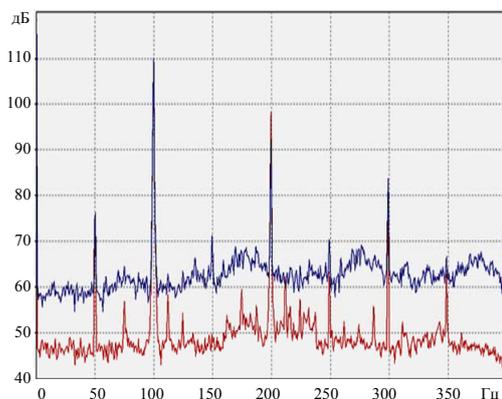


Рис. 5. Спектры вибраций шин через 10 час. 30 мин от начала набора мощности ТГ (шум, в основном, в области 50 – 400 Гц)

Наиболее интенсивные колебания, кроме частоты 100 Гц, происходят на частоте 200 Гц. Было установлено, что количество шин, имеющих собственные частоты, близкие к частоте 200 Гц, весьма велико, а это означает, что эти шины статора постоянно вибрируют в условиях, близких к резонансу на частоте 200 Гц, что и обуславливает их высокую повреждаемость [2].

Поэтому существенным резервом снижения повреждаемости соединительных шин являются:

- дополнительная подпрессовка сердечника статора, а также изменение конструкции и способа крепления лобовых частей и соединительных шин обмотки статора;
- установка вибродатчиков на опорных колоннах, на нажимных фланцах и пальцах сердечника статора для фиксации нежелательной виброактивности сердечника статора;

- существующие технические условия на отстройку от резонансов только лишь для 100 Гц не являются достаточными. Необходимо считаться с наличием существенных уровней вибраций как на высших гармониках, так и субгармониках;
- наиболее радикальным средством явилась замена обмотки статора производства ОАО "Электросила" на обмотку статора компании "Альстом".

В условиях исчерпания эксплуатационного ресурса необходим переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактической необходимости. Реализация такого перехода предъявляет качественно новое требование к системе мониторинга и диагностики: Необходимо работать на упреждение отказов, на ранней стадии выявляя источники потенциально опасных явлений;

- необходимо увеличивать количество и чувствительность датчиков; методы и разрешающая способность анализа должны становиться более адекватными.

При исчерпании эксплуатационного ресурса всё большую роль играют "внезапные" отказы, на которые традиционные системы не реагируют или реагируют слишком поздно. В действительности отказы не случайны. Их причиной могли быть ошибки проектирования, технология изготовления и монтажа, а также несоблюдение правил эксплуатации. Длительный период развития частых отказов, скрытых для грубых методов наблюдения, приводит к тому, что лавинообразное развитие дефектов на конечной стадии приводит в лучшем случае к отказу системы, а в худшем - к аварии. Поэтому внедрение автоматизированной системы вибромониторинга и вибродиагностики, предназначенных для поддержания технического состояния турбогенератора как элемента турбоагрегата атомных электростанций, является необходимой [1, 5, 7].

## ВЫВОДЫ

1. Приводятся результаты системного анализа причин отказов турбогенератора ТВВ-1000-2У3 вследствие повышенной вибрации статора, вызванной осевыми электромагнитными силами.
2. Наиболее уязвимыми элементами конструкции являются стяжные призмы (хвостовики стяжных призм) и зубцы крайних пакетов сердечника статора.
3. При оценке виброактивности выводных и соединительных шин обмотки статора необходимо считаться с тем, что вынужденные колебания наблюдаются на частоте 100 Гц и частотах, кратных 100 Гц. Наиболее заметны колебания на частоте 200 Гц. Принятая в настоящее время отстройка собственных частот выводных шин от 100 Гц не является достаточной.
4. Наиболее радикальным средством снижения последствий интенсивных вибраций элементов обмотки статора явился переход на обмотку статора компании "Альстом".
5. Рекомендуются внедрить вибромониторинг и вибродиагностику в качестве эффективных средств предотвращения отказов и аварийных остановок турбоблоков АЭС Украины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шумилов Ю.А., Демидюк Б.М., Штогрин А.В. Вибродиагностика как составляющая часть мониторинга технического состояния силовых агрегатов электростанций // Праці ІЕД НАН України. – 2008. – № 1. – С. 76-80.
2. Шумилов Ю.А., Демидюк Б.М., Штогрин А.В. Результаты экспериментальных исследований вибраций турбогенератора ТВВ-1000-2У3 энергоблока № 3 ЮУ АЭС // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 5. – С. 32-36.
3. Васьковський Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Мо-

делирование процесса усталостного разрушения зубцов крайних пакетов сердечника статора мощных турбогенераторов // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – № 41. – С. 22-27.

4. Васьковський Ю.Н., Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Аналіз вібровозмущаючих осевих сил в сердечнику статора потужного турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 21-26.
5. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Чумак В.В., Штогрин А.В. Вибродіагностика і моніторинг турбогенераторів атомних електростанцій // Гідроенергетика України. – 2009. – №1. С. – 28-31.
6. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Штогрин А.В. Вибровозмущаючі осеві сили і механіка руйнування елементів конструкції статора потужного турбогенератора // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Севастополь, 2009. – С. 77-78.
7. Шумилов Ю.А., Васьковський Ю.Н., Штогрин А.В. Системний моніторинг і діагностика турбоагрегатів на АЕС // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Севастополь, 2010. – С. 5-7.
8. Гайдєнко Ю.А., Вишневіський Т.С., Штогрин О.В. 3D-моделювання для визначення осевих сил, діючих на елементи торцевої зони потужного турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 6. – С. 73-78.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shumilov Yu.A., Demidjuk B.M., Shtogrin A.V. Vibrodiagnostika kak sostavl'jajushhaja chast' monitoringa tehničeskogo sostojanija silovyh agregatov jelektrostancij. *Pratsi IED NAS Ukraine*, 2008, no.1, pp. 76-80. 2. Results of experimental research on THUKr nuclear power station power plant № 3 turbogenerator TVV-1000-2U3 vibrations *Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.5, pp. 32-36. 3. Vas'kovsky Y.N., Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Simulation of the tooth fatigue destruction process in the end packets of powerful turbogenerator stator core. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2009, no.41, pp. 22-27. 4. Vas'kovsky Y.N., Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Analysis of vibration-exciting axial forces in a powerful turbogenerator stator core. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.2, pp. 21-26. 5. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Chumak V.V., Shtogrin A.V. Vibrodiagnostika i monitoring turbogeneratorov atomnyh jelektrostancij. *Gidrojenergetika Ukrainy*, 2009, no.1, pp. 28-31. 6. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Shtogrin A.V. Vibrovomushhajushhie oseyve sily i mehanika razrusheniya jelementov konstrukcii statora moshhnogo turbogeneratora. *Materijali mezhdunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii. Sevastopol'*, 2009, pp. 77-78. 7. Shumilov Yu.A., Vas'kovsky Y.N., Shtogrin A.V. Sistemnyj monitoring i diagnostika turboagregatov na AES. *Materijali mezhdunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii. Sevastopol'*, 2010, pp. 5-7. 8. Gaydenko Y.A., Vishnevskiy T.S., Shtogrin A.V. 3D-modeling for determination of axial forces acting in elements of the end zone of power turbogenerators. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.6, pp. 73-78.

Поступила (received) 10.10.2013

Шумилов Юрий Андреевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Штогрин Александр Валерьевич<sup>2</sup>, инженер,  
<sup>1</sup> ЗАО "Укратомэнергострой",  
03035, Киев, ул. Урицкого, 45, оф. 606,  
тел/phone: +38 044 2460989, e-mail: yuri2007@voliacable.com  
<sup>2</sup> ОП "Хмельницька АЕС",  
30100, Хмельницька обл., Нетешин,  
тел/phone: +38 098 2253293

Yu.A. Shumilov<sup>1</sup>, A.V. Shtogrin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ZAT Ukratomenergobud,  
45, Urytskogo Str., office 606, Kyiv, 03035, Ukraine  
<sup>2</sup> Khmelnytskyi Nuclear Power Plant  
Netishyn, Khmelnytskyi region, 30100, Ukraine

### Decrease in the damage of powerful turbogenerator stator caused by vibration in the end zones (analysis, hypotheses, experiment).

The analysis of the turbogenerators' TVB-1000-2Y3 failure has shown that the most vulnerable link in the stator is such of their elements as tightening prisms, the teeth of the end packet core, lead-out and connecting buses of the stator winding. The basic reason for the destruction of the elements mentioned is metal fatigue caused by excessive vibration under the influence of variable axial forces of electromagnetic origin. Preventing the destruction of the structural elements may be achieved by vibration monitoring and diagnostics. **Key words – turbogenerator, tightening prisms, the teeth, axial forces, monitoring and diagnostics.**