

**Э. С. ОСТЕРНИК**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ГП завод  
Электротяжмаш, Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕКРЕМЕНТА КОЛЕБАНИЙ В МАГНИТОПРОВОДЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

Заблаговременно определено скалярное поле затухания в магнитопроводе турбогенератора. При накоплении статистических данных это позволит дать оценку его надежности с помощью кумулятивной модели отказов.

**Ключевые слова:** скалярное поле, затухание, магнитопровод, турбогенератор, надежность.

**Введение, цель и постановка задачи.** Ранее для оценки надежности турбогенератора рассматривались такие его механические характеристики, которые можно определить по окончании производства, в процессе стендовых и эксплуатационных исследований [1]. Сюда относятся механические напряжения и перемещения с их производными.

Вместе с этим целесообразно определить параметры, позволяющие оценить надежность основных узлов турбогенератора еще в процессе производства. Тогда можно при необходимости заблаговременно скорректировать состояние этих узлов, например магнитопровода статора.

Магнитопровод длиной до 5800 мм состоит из спрессованных сегментов листовой электротехнической ортотропной стали толщиной 0,5 или 0,35 мм. Эти кольцевые сегменты изолированы лаковой пленкой. Они имеют зубцовую зону и образуют продольные пазы, в которых помещаются токоведущие стержни статорной обмотки турбогенератора. Активная сталь статора совершает радиальные и тангенциальные, а в торцевых зонах – также аксиальные колебания [1]. В этих зонах возникают также термомеханические нагрузки.

Магнитопровод по длине делится на пакеты толщиной 45 или 50 мм. При радиальной системе его вентиляции эти пакеты отделяются каналами толщиной 10 или 5 мм с вентиляционными распорками, при осевой системе – стеклотекстолитовыми сегментами, аналогичными стальным.

В процессе производства турбогенератора мощностью 500 МВт динамика его магнитопровода была исследована еще до укладки обмотки, с ротором турбогенератора мощностью 300 МВт (свой ротор еще не был готов). Созданные на стенде нагрузки в режиме холостого хода соответствовали реальным. Оказалось, что уровень вибрации магнитопровода не превышает допустимого, и статор был пропущен в дальнейшее производство [2].

Из опыта ряда фирм известно, что в процессе длительной эксплуатации

под действием описанных выше колебаний плотность первоначально спрессованного магнитопровода снижается, особенно в торцевых зонах. Это может привести к пробое статорной обмотки, частичным выгораниям магнитопровода и другим дефектам. Такие аварии приводят к останову на ремонт, а иногда – к выходу турбогенератора из строя [3].

Снижение плотности магнитопровода соответствует росту его демпфирующих свойств, связанных с трением между сегментами. Кроме того, для ферромагнитных материалов, включая электротехническую сталь, существенным видом поглощения энергии является магнитоупругий гистерезис [4]. Как известно, демпфирование характеризуется декрементом колебаний  $\delta$ . Имеющиеся значения  $\delta$ , по данным эксплуатации [5], позволяют сравнить их с аналогичными результатами исследований нового магнитопровода и принять решение о его пропуске в дальнейшее производство или заблаговременной корректировке.

**Методика испытаний.** Ранее контроль плотности магнитопровода выполнялся с помощью ножевых устройств по глубине их забивания в наружную цилиндрическую поверхность. Этому контролю присуща значительная субъективность. Ножи могут повредить лаковую пленку сегментов.

Современный метод исследования плотности разработан ВНИИЭлектроэнергетики для магнитопроводов с радиальной системой вентиляции. Задача сводится к определению скорости ультразвука в осевом направлении для пакетов магнитопровода.

Турбогенераторы серии ТГВ мощностью 300 и 325 МВт имеют магнитопроводы статора с осевой системой вентиляции. Описанный в предыдущем абзаце метод к ним неприменим. Задача исследования плотности такого магнитопровода сводится к определению декремента колебаний  $\delta$ .

Известен достаточно точный метод определения  $\delta$  по ширине частотных характеристик или по частотному годографу, применимый для систем, проходящих хотя бы через первую резонансную частоту  $f_1$  [6]. Однако конструкции статоров предусматривают, чтобы частота вынужденных колебаний 100 Гц была ниже  $f_1$  [1].

Поэтому исследования проводились путем импульсного возбуждения радиальных свободных затухающих колебаний магнитопровода. Это направление колебаний является критериальным при нормировании вибронадежности статора. Колебания возбуждались ударами молотка с резиновым наконечником по зубцам магнитопровода, то есть из его расточки.

После опробования нескольких видов виброаппаратуры был выбран по критерию помехоустойчивости прибор фирмы RFT (Германия) типа SM-211, включающий в себя блок питания 11030, указатель 11025 и усилитель 11013 с пьезоакселерометром типа KD 38.

Обычно значение  $\delta$  определяется по кривым собственных затухающих перемещений. Здесь декремент вычислялся по записи виброускорения [7].

Это позволило не вводить интегрирующие контуры прибора SM, что обеспечило достаточную чувствительность методики. Декремент (логарифмический декремент) вычислялся для малых затуханий по формуле

$$\delta = \frac{1}{i} \ln \frac{\ddot{q}_1}{\ddot{q}_i},$$

где  $\ddot{q}$  – амплитуда виброускорения,  $i$  – число полных периодов, взятых для обработки между  $\ddot{q}_1$  и  $\ddot{q}_i$ .

Одновременно с декрементом  $\delta$  по тем же записям определялась первая собственная частота радиальных колебаний магнитопровода  $f_1$ .

**Данные исследований.** Параметры  $\delta$  и  $f$  определяются на магнитопроводе статора после укладки, закрепления и запечки статорной обмотки. Аналогичные испытания проводились на месте эксплуатации во время ремонтов с целью контроля технического состояния.

Исследования выполнялись в пяти поперечных сечениях на расстояниях соответственно 0; 0,25; 0,50; 0,75 и 1,0 величины промежутка между шестью пакетами основных сегментов, находящимися по обоим торцам магнитопровода.

Данные по декременту колебаний содержатся в следующей таблице.

Таблица – Логарифмический декремент колебаний  $\delta$  (непер)

Сечение	I	II	III	IV	V
$\delta_1$	0,057	0,047	0,037	0,063	0,071
$\delta_2$	0,049	0,041	–	0,055	0,076
$\bar{\delta}$	0,053	0,044	0,037	0,059	0,073

В каждом сечении, кроме III, измерения выполнялись дважды.

По усредненным данным из таблицы  $\bar{\delta} = 0,037 \div 0,073$ .

Значения  $\bar{\delta}$  растут от середины к торцам магнитопровода.

Такие различия в магнитопроводе по  $\delta$  позволяют говорить об эффективных значениях  $\delta$  материала магнитопровода, а не об интегральном значении  $\delta$  для магнитопровода в целом. Можно также говорить о скалярном поле  $\delta$  в магнитопроводе.

Сравним этот результат с данными [5]. По упомянутым данным для турбогенераторов серии ТГВ мощностью 300 МВт  $\delta = 0,023 \div 0,051$ .

Сопоставление данных показывает, что декремент колебаний, то есть уровень затухания в турбогенераторе мощностью 325 МВт, выходит за рамки поля турбогенераторов мощностью 300 МВт.

В работе [5] сообщается также, что статор турбогенератора серии ТВВ мощностью 320 МВт (завод «Электросила» – Силовые машины) с сильным ослаблением плотности пакетов магнитопровода (из-за чего он и был списан) имел в крайних сечениях  $\delta = 0,130 \div 0,140$ . У нового статора такого же турбо-

генератора  $\delta = 0,028 \div 0,049$ .

Измерения параметра  $\delta$  в процессе производства ранее не выполнялись.

Измерения собственной частоты радиальных колебаний магнитопровода показали, что  $f_1 = 141,5$  Гц.

По данным [5], для турбогенераторов серии ТГВ мощностью 300 МВт частота находится в пределах  $f_1 = 128 \div 162$  Гц.

Эти данные показывают, что магнитопроводы работают в дорезонансной области и подтверждают правильность выбора импульсной методики определения  $\delta$ .

Отметим, что известны следующие способы повышения плотности прессовки магнитопровода статора в эксплуатации:

- 1 включение силовых аккумуляторов, имеющихся в турбогенераторе мощностью 325 МВт;
- 2 установка дополнительных стяжных устройств со шпильками с дифференциальной резьбой;
- 3 забивка стеклотекстолитовых клиньев – вставок, покрытых эпоксидным клеящим лаком [8].

По совокупности имеющейся информации было принято решение пропустить статор турбогенератора в дальнейшее производство, а также на монтаж и приемо-сдаточные испытания при условии выполнения следующих работ:

- 1 проводить контроль магнитопровода статора по стационарным вибропреобразователям в среднем и крайних сечениях во время приемо-сдаточных испытаний и в эксплуатации;
- 2 проводить контроль параметра прессовки плотности прессовки магнитопровода  $\delta$  на месте установки;
- 3 при необходимости заблаговременно принимать меры для повышения плотности прессовки магнитопровода, перечисленные ранее, пользуясь данными виброконтроля по пп. 1 и 2.

**О выборе оптимального давления прессовки магнитопровода.** В настоящее время известные энергомашиностроительные фирмы применяют различный уровень удельного давления прессовки  $p$  [3]. Фирма «Альстом» применяет  $p = 1,0 \div 1,2$  МПа, «Дженерал Электрик» –  $1,4 \div 2,1$  МПа, «Крафтверкунион» – до 2,0 МПа. Установлено, что при повышении удельного давления осадка и, следовательно, уровень заполнения магнитопровода увеличиваются незначительно. Но высокие давления могут привести к нарушению целостности лаковой пленки [9].

С целью выбора  $p_{opt}$  решено исследовать образцы пакетов обычной толщины 50 мм, состоящих из квадратов  $100 \times 100$  мм электротехнической стали, покрытой лаковой пленкой по известной технологии. Образцы прессуются в технологическом приспособлении давлениями  $p$  от 0,7 до 3,0 МПа через 0,1 или 0,2 МПа. При необходимости проводятся также предварительные подпрессовки давлениями  $p' < p$  и подогревы пакетов.

На каждом образце определяется декремент колебаний  $\delta$ . Путем тензометрии технологического приспособления с его предварительной тарировкой определяются коэффициент отдачи образца и равномерность распределения усилий отдачи по образцу [1].

Уровень заполнения пакета исследуется путем измерения осадки при прессовке и отдаче пакета. Измерения проводятся с помощью стрелочных индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 или 0,002 мм.

Контролируются также качество изоляции лаковой пленкой и уровень потерь на вихревые токи и гистерезис в пакетах. Эксперименты проводятся на актуальной электротехнической стали, из которой фактически штампуются сегменты магнитопровода. Это позволит учесть реальные допуски на неплоскостность (волнистость) и разнотолщинность стали.

Решение о  $p_{opt}$  принимается по совокупности указанных параметров.

**Выводы.** В процессе производства определяются скалярное поле декремента колебаний в магнитопроводе и первая собственная частота его радиальных колебаний. Это позволяет заблаговременно либо пропустить статор турбогенератора в дальнейшее производство, либо скорректировать его состояние.

Целесообразно в дальнейшем накопить аналогичные статистические данные, включая динамику их изменений в процессе длительной эксплуатации. Это позволит применить к магнитопроводам методы теории надежности с помощью кумулятивной модели отказов [1]. Следует также определить оптимальное давление прессовки магнитопровода.

**Список литературы:** 1. *Остерник Э.С.* О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. тр. Тем. выпуск «Динамика и прочность машин». – № 52. – 2011. – С. 142-156. 2. *Станиславский Л.Я., Гаврилов Л.Г., Остерник Э.С.* Вибрационная надежность турбогенераторов. – М.: 1985. – 240 с. 3. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б.* Научные основы проектирования турбогенераторов. – Л.: 1986. – 184 с. 4. *Филиппов А.П.* Колебания механических систем. – К.: 1965. – 716 с. 5. *Григорьев А.В., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А.* О вибрационном контроле технического состояния статоров турбогенераторов ТГВ-300 // Электрические станции. – 1998. – № 8. – С. 27-35. 6. Вибрации в технике. – М.: 1981. – Т. 5. – 496 с. 7. *Иорши Ю.И.* Виброметрия. – М.: 1963. – 772 с. 8. Руководство по капитальному ремонту турбогенератора ТГВ-300. – М.: 1976. – 227 с. 9. Технология крупного электромашиностроения. В 3-х тт. Т. 1. *Циханович Б.Г., Фомин Б.П.* Турбогенераторы. – Л.: 1989. – 424 с.

*Поступила в редакцию 09.09.2013.*

УДК 539.3:621.313

**Исследование декремента колебаний в магнитопроводе для оценки надежности турбогенератора / Э. С. Остерник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 163-168. – Бібліогр.: 9 назв.**

Завчасно визначено скалярне поле загасання в магнітопроводі турбогенератора. При накопиченні статистичних даних це дозволить дати оцінку його надійності за допомогою кумулятивної моделі відмов.

**Ключові слова:** скалярне поле, загасання, магнітопровід, турбогенератор, надійність.

We are determined the scalar field of damping in magnetic circuit of turbogenerator ahead the time. By accumulation of statistical data it will prevent to let reliability estimate by means of cumulative model of failures.

**Keywords:** scalar field, damping, magnetic circuit, turbogenerator, reliability.

УДК 629.7.05

**Ю. А. ПЛАКСІЙ**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»

## СТЕПЕНЕВІ АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ КВАТЕРНІОНІВ ОРІЄНТАЦІЇ ТА ЇХ ІНТЕРПОЛЯЦІЙНІ МОДИФІКАЦІЇ

На основе разложения частного решения кинематического уравнения в кватернионах в ряд по степеням кажущихся поворотов получены степенные алгоритмы определения ориентации и их интерполяционные модификации. Показано, что учет динамики вращения твердого тела в алгоритмах приводит к повышению точности определения ориентации.

**Ключевые слова:** кватернион, ориентация, бесплатформенная инерциальная система

**Вступ і постановка задачі.** До алгоритмів визначення орієнтації в безплатформених інерціальних навігаційних системах (БІНС) пред'являються жорсткі вимоги по точності визначення параметрів орієнтації і завантаженню автономного обчислювача на такті. Це обумовлено тим, що алгоритм визначення орієнтації в БІНС математично відтворює інерціальну систему координат, тобто виступає в ролі «аналітичної платформи».

Для визначення поточної орієнтації триєдра зв'язаних осей відносно інерціального триєдра осей в БІНС в автономному обчислювачі на кожному такті  $[t_{n-1}, t_n]$  реалізується алгоритм визначення кватерніонів орієнтації, який використовує первинну інформацію про обертання твердого тіла на такті у вигляді приростів інтегралів від проекцій вектора абсолютної кутової швидкості тіла  $\vec{\omega}$  на зв'язані осі (позірні повороти) [1]:

$$\theta_{n,i}^* = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i dt, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Повна орієнтація при цьому обчислюється за формулою додавання поворотів

$$A_n^* = A_{n-1}^* \circ \Delta A_n^*, \quad (2)$$

де  $A_n^* = A^*(t_n)$ ,  $A_{n-1}^* = A^*(t_{n-1})$  – обчислені кватерніони орієнтації в момен-

© Ю. А. Плаксіє, 2013