

УДК 539.3

Н.Е.Блохина (асп., каф. МПУ), А.И.Боровков, к.т.н., проф.

## СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СЕРДЕЧНИКА И ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ СТАТОРОВ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Лобовые части обмотки статора турбогенератора работают в сложных условиях, характеризующихся действием значительных переменных электромагнитных сил и непрерывным изменением жесткости крепления, связанным с ползучестью и релаксацией напряжений в изоляции и неметаллических деталях. При наличии жесткого крепления лобовых частей обмотки сердечник и лобовые части представляют собой единую систему.

Основным источником вибрации статора является сердечник, причем при нормальной работе генератора главную роль играют изгибные колебания сердечника, вызванные силами магнитного тяжения полюсов ротора. Это колебания сердечника по эллиптической (четырёхузловой по окружности сердечника) форме с двойной оборотной частотой (т.е. с частотой 100 Гц для двухполюсных генераторов).

Проведено конечно-элементное (КЭ) исследование собственных колебаний сердечников статоров мощных турбогенераторов и системы «сердечник – лобовые части обмотки» и выполнен анализ полученных ранее на ОАО «Электросила» [1] экспериментальных и расчетных оценок. КЭ расчеты выполнены в программной системе КЭ анализа ANSYS.

**Радиальные колебания сердечника статора.** Традиционные расчетные методики определения первой собственной частоты радиальных колебаний по четырёхузловой форме ( $f_0$ ) основаны на представлениях о сердечнике как о цилиндре конечной длины, все поперечные сечения которого деформируются одинаково в своей плоскости [2]. Задача о колебаниях сердечника заменяется линейной задачей о плоских колебаниях кольца (либо тонкого, по модели стержня Бернулли-Эйлера, либо с учетом сдвига), материал которого считается изотропным, а шихтованная структура учитывается введением «эффективного» модуля упругости  $E_{эф}$ .

Были получены собственные частоты, соответствующие четырёхузловой форме, для различных значений эффективного тангенциального модуля упругости  $E_{эф}$ , при помощи стержневой модели (с учетом и без учета сдвига), и при помощи двумерной конечно-элементной модели. Собственная частота колебаний по четырёхузловой форме  $f_0$ , полученная при помощи КЭ анализа, оказалась несколько ниже, чем определенная при помощи стержневой модели, и составила от 170 до 190 Гц для различных значений  $E_{эф}$ .

**Аксиальные колебания сердечника статора.** Измерения вибрации сердечников турбогенераторов на испытательном стенде завода и электростанциях показывают, что наряду с основными (радиальными) вибрациями имеют место и значительные аксиальные вибрации с двойной оборотной частотой 100 Гц, размах которых иногда составляет до 50 % размаха радиальных вибраций. Причинами аксиальной вибрации сердечников являются трехмерный характер деформаций, взаимодействие торцов с магнитными полями лобовых частей обмоток статора и ротора, магнитострикция.

Расчетные и экспериментальные исследования выявили наличие множественных резонансов аксиальных колебаний сердечников генераторов различных типов в рабочем диапазоне. Сильная зависимость значений собственных частот от аксиального модуля упругости, который для турбогенераторов одного и того же исполнения может иметь значительные разбросы, затрудняет надежную отстройку от резонанса.

**Собственные частоты системы «сердечник – лобовые части обмотки».** Трудность схематизации конструкции корзины лобовых частей и системы крепления заключается в неопределенности целого ряда характеристик входящих в нее элементов. При разработке системы крепления лобовых частей обмотки было выполнено экспериментальное определение основной собственной частоты [1]. Определенная при помощи анализа частотных характеристик радиальных вибраций лобовых частей обмотки статора турбогенератора ТЗВ-800 на испытательном стенде ОАО «Электросила» при установленном трехфазном КЗ составила 135 – 150 Гц.

Была разработана конечно-элементная модель системы «сердечник – лобовые части обмотки статора» турбогенератора ТЗВ-800-2 (рис. 1), при помощи которой были определены собственные частоты системы в диапазоне от 0 до 200 Гц для трех значений аксиального модуля упругости сердечника  $E_z$ .

Анализ собственных частот и форм показал, что рассматриваемая система имеет 10 – 15 собственных частот по четырехузловой форме в указанном диапазоне для турбогенераторов различных типов.

Формы колебаний имеют сложный трехмерный характер, спектр сгущается вблизи первой собственной частоты радиальных колебаний сердечника  $f_0$ .

Для низших собственных форм (с частотой, меньшей  $0,7 f_0$ ), в сердечнике преобладает аксиальная составляющая перемещений, лобовые части обмотки при этом поворачиваются, что подтверждается экспериментальными данными. На рис. 2 представлена форма радиальных перемещений сердечника с газовым охлаждением, соответствующая собственной частоте 97,7 Гц; на рис. 3 – частоте 189,9 Гц ( $f_0$ ).

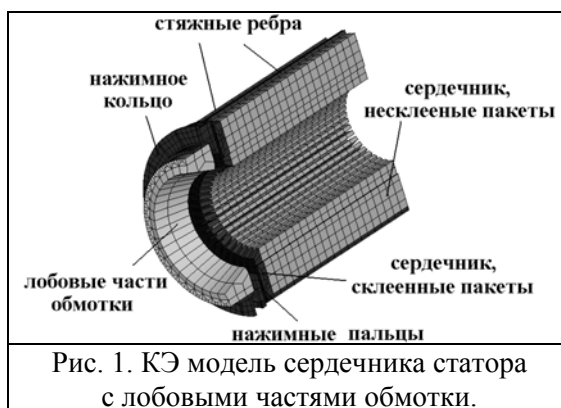


Рис. 1. КЭ модель сердечника статора с лобовыми частями обмотки.

Результаты численного определения собственных частот и форм колебаний сердечника с

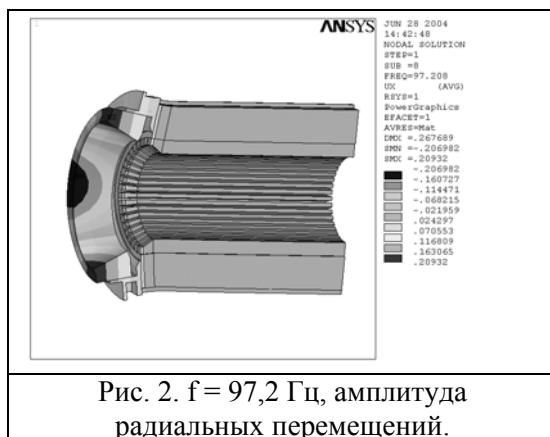


Рис. 2.  $f = 97,2$  Гц, амплитуда радиальных перемещений.

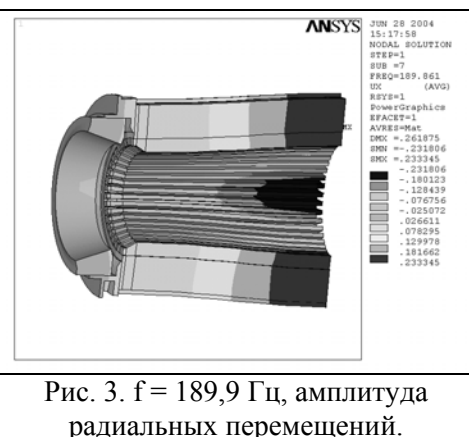


Рис. 3.  $f = 189,9$  Гц, амплитуда радиальных перемещений.

лобовыми частями обмотки статора турбогенератора ТЗВ-800-2 с использованием конечно-элементной модели указывают на множественность собственных частот и пространственных четырехузловых по окружности форм колебаний с изгибом и сдвигом сечений. Спектр собственных частот имеет высокую плотность и не исключает возникновения резонансов по четырехузловой форме на основной частоте возмущающего воздействия (100 Гц). Результаты численного исследования достаточно хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Иогансен В.И. Исследования и разработка решений по усовершенствованию конструкции и повышению эксплуатационных показателей мощных турбогенераторов – дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук, СПб.: АО “Электросила”, 2001.
2. Детинко С.М., Загородная Г.А., Фастовский В.М. Прочность и колебания электрических машин. – Л.: Энергия, 1969.