

УДК 620.171.2

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПО СПЕКТРУ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

© А. Л. Назолин¹*Статья поступила 8 декабря 2015 г.*

Описан метод оценки спектров виброускорения элементов конструкции статора работающего турбогенератора с дефектами ослабления узлов креплений по результатам имитационного моделирования. Разработана методика и представлены результаты экспериментального определения частотных характеристик ускоряемости конструкции статора мощного турбогенератора от мест возникновения дефектов ослабления креплений до обшивки корпуса статора. Методика предназначена для применения на выведенных в капитальный ремонт турбогенераторах электростанций и (или) на стендах заводов-изготовителей, использует метод ударного возбуждения возбудителем, не прикрепленным к конструкции. Приведен состав измерительной аппаратуры и дана оценка погрешности определения частотной характеристики калибровочного блока. Проведен сравнительный анализ частотных характеристик, полученных на четырех статорах турбогенераторов типа ТВВ-320-2 с разными техническими состояниями узлов креплений и сроками службы. Приведены оценки параметров контроля правильности измерений. Показана возможность оценки частотных характеристик статора на одном турбогенераторе каждого типа. Обоснована схема установки датчиков на обшивке корпуса статора, позволяющая проводить локацию местонахождения дефекта с точностью до сектора окружности статора с центральным углом в 90°. Полученные оценки частотных характеристик статора могут быть использованы для имитационного моделирования виброакустических колебаний обшивки корпуса статора работающего турбогенератора с дефектами ослабления креплений. Цель — оценка возможности обнаружения дефектов статора и определение спектральных диагностических признаков неисправностей. Показаны недостатки модели мгновенного удара, приведены примеры и даны рекомендации по построению динамических моделей дефектов статора.

Ключевые слова: конструкция статора; дефекты ослабления креплений; ударные испытания; сигнал силы; сигнал реакции; частотная характеристика ускоряемости; контроль правильности измерений; динамическая жесткость; динамическая податливость; диагностические признаки; обнаружение дефектов.

Статор крупного турбогенератора серии ТВВ мощностью от 165 до 1200 МВт представляет собой сложную сборную конструкцию длиной более 6 м, диаметром более 4 м и массой более 150 т. Сложность такой конструкции заключается в том, что корпус состоит из нескольких однотипных отсеков, каждый из которых представляет собой коробчатую систему с резкими изменениями сечений, обусловленными наличием окон в поперечных стенках, а также тем, что шихтованный сердечник, набранный из листов электротехнической стали, закрепляется в корпусе с помощью упругих элементов.

В силу сложности конструкции статора, неопределенности многочисленных связей и механических свойств некоторых его элементов точно теоретически описать его динамические свойства в широком диапазоне частот крайне затруднительно. В низкочастотной области эти свойства изучены давно и в литературе представлены достаточно полно [1, 2]. Их используют для расчета вынужденных колебаний исправного

статора под действием вращающегося магнитного поля с частотой 100 Гц. В диапазоне частот выше 200 – 300 Гц, имеющем практическое значение для решения задач виброакустической диагностики, эти свойства остаются до сих пор малоизученными.

Временной метод исследования прохождения импульсов сил и ускорений через сборную конструкцию статора, обладающую большим числом степеней свободы, не позволяет получить достаточно простые и точные аналитические зависимости, поэтому целесообразно использовать частотный метод исследования [3]. Достоинством частотного метода является то, что механическая подвижность конструкции в форме, например, частотных характеристик ускоряемости может быть определена экспериментально в ходе динамических испытаний. Ограниченность метода состоит в том, что он применим лишь к конкретным объектам, а поэтому его результаты не могут быть без проверки применены к статорам турбогенераторов других типов и серий.

В условиях электростанций наиболее простым, удобным, а в ряде случаев и единственно возможным

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия;
e-mail: nazolin72@mail.ru

методом определения частотных характеристик конструкций статоров в широком диапазоне частот является метод ударного возбуждения возбудителем, не прикрепленным к конструкции. Необходимость их определения возникает при решении задач виброакустической диагностики статора работающего турбогенератора с дефектами ослабления узлов креплений формализованным методом.

По данным заводов-изготовителей и исследовательских инженерных центров [4, 5] дефекты ослабления креплений являются одной из основных причин повреждений мощных турбогенераторов, определяющих их надежность и ресурс. Это дефект ослабления креплений сердечника в корпусе статора, обмотки в пазовой и лобовой частях, дефект распушения листов крайних пакетов активной стали. Все они характеризуются величиной зазора и длиной ослабленного участка, носят локальный характер, развиваются во время работы генератора под нагрузкой. На работающем генераторе дефекты представляют собой виброударные системы, возбуждающие виброакустические колебания конструкции статора. Во время ремонта их обнаруживают по продуктам износа и разрушения элементов статора, изменению собственных частот колебаний элементов статора.

В данной работе проведен анализ результатов экспериментального определения частотных характеристик ускоряемости конструкций статоров четырех турбогенераторов типа ТВВ-320-2 и дана оценка возможности их использования для решения задач виброакустической диагностики.

Методика ударных испытаний статоров

Методика ударных испытаний статоров турбогенераторов серии ТВВ разработана с учетом рекомендаций ГОСТ ИСО 7626-5-99 [6]. Она включает в себя экспериментальное определение передаточных частотных характеристик ускоряемости конструкции статора от мест возникновения дефектов до обшивки корпуса статора и точечных частотных характеристик ускоряемости элементов статора.

Схема ударных испытаний статоров турбогенераторов типа ТВВ представлена на рис. 1. Здесь жирными точками с номерами обозначены места ударного возбуждения и измерения реакций, индексами x, y, z — направление возбуждения и измерения реакции. Точки расположены на основных конструктивных элементах статора, в которых возникают дефекты, а именно: расточке сердечника (точка 6х), крайних пакетах зубцов сердечника (точка 7у), торцевой зоне сердечника (точки 8х, 9у, 10х, 11з, 12у) и стяжных ребрах сердечника (точки 13х, 14х). Все внутренние точки расположены на минимальном расстоянии от точки 1.

При ударном возбуждении внутренних элементов статора измеряли сигнал ударной силы в точках 6х, 8х, ..., 14х и сигналы реакций на обшивке корпуса

в точках 1х, 2х, ..., 5х, которые также использовали для оценки затухания по длине и окружности корпуса статора. При ударном возбуждении обшивки корпуса измеряли сигнал ударной силы в точке 1х и сигналы реакций в точках 6х, 8х, ..., 14х.

При ударных испытаниях наилучшее отношение сигнал/шум дает оценка частотной характеристики вида [6, 7]

$$\hat{H}_{i,j}(f) = \frac{\hat{G}_{F_j X_i}(f)}{\hat{G}_{F_j F_j}(f)}, \quad (1)$$

где

$$\hat{G}_{F_j X_i}(f) = \frac{1}{n_d} \sum_{k=1}^{n_d} \hat{F}_{j,k}(f) \hat{X}_{i,k}(f) \quad (2)$$

оценка усредненного взаимного спектра сигналов реакции и силы;

$$\hat{G}_{F_j F_j}(f) = \frac{1}{n_d} \sum_{k=1}^{n_d} \hat{F}_{j,k}(f) \hat{F}_{j,k}^*(f) \quad (3)$$

оценка усредненного взаимного спектра сигнала силы. Здесь: $\hat{F}_{j,k}(f)$ и $\hat{X}_{i,k}(f)$ — оценка комплексного спектра k -й реализации сигнала ударного возбуждения $F_j(t)$ и сигнала реакции системы $x_i(t)$ соответственно; $n_d \geq 3$ — число реализаций (ударов), по которым проводится усреднение. Индекс i используется для указания точки, в которой происходит определение реакции системы, а индекс j — для указания точки возбуждения системы. При измерении сигналов реакций в форме виброускорения модуль оценки (1) — это амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ускоряемости конструкции статора.

В качестве измерительной аппаратуры использовали ударный молоток AU01 со встроенным пьезоэлектрическим датчиком силы AC21 и бойком из стали, семь вибропреобразователей AP-40 (ООО «Глобал Тест»); 8-канальный виброанализатор MIC-300M с усилителями заряда MP-07 (НПП «Мера»). Обработку сигналов проводили в пакете «WinПОС» НПП «Мера». Датчики крепили на зачищенные элементы статора с помощью метилцианакрилатного клея. При соблюдении рекомендаций ГОСТ Р ИСО 5348-99 [8] такой способ закрепления аналогичен креплению с помощью шпильки и обеспечивает сохранение рабочего частотного и динамического диапазона измерений. Данный факт подтвержден экспериментально при калибровке измерительных каналов путем оценки измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ускоряемости простейшей конструкции — свободно подвешенного калибровочного блока известной массы. В диапазоне частот от 10 до 7 Гц систематическая погрешность измерения АЧХ ускоряемости калибровочного блока не превышала -2% , $+5\%$,

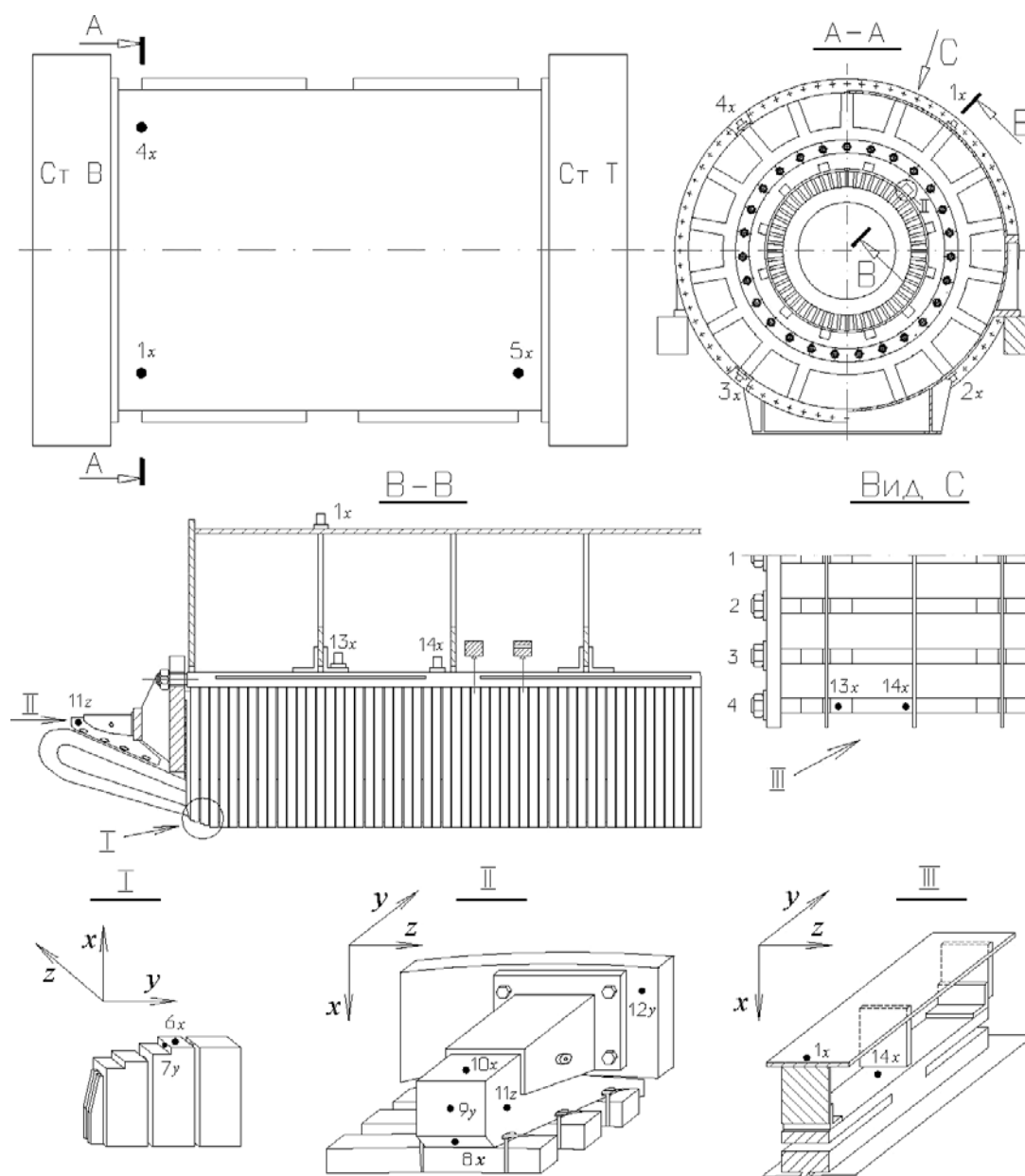


Рис. 1. Схема расположения точек ударного возбуждения и замера реакций конструкции статора турбогенератора серии ТВВ: I — крайние пакеты зубца сердечника; II — фрагмент нажимной плиты с кронштейном крепления лобовых частей обмотки статора; III — фрагмент упругой подвески сердечника в корпусе статора

оценка среднего значения АЧХ по всем семи измерительным каналам отличалась не более чем на 2 %.

При ударных испытаниях проводили контроль правильности измерений, который включал в себя контроль параметров функции когерентности, линейности системы и выполнения принципа взаимности.

Анализ частотных характеристик статора

Рассмотрим результаты экспериментального определения АЧХ ускоряемости конструкций статоров четырех турбогенераторов типа ТВВ-320-2 длиной 8,62 м, диаметром 4,1 м и массой 203 т. Ударные испытания статоров проводили в период проведения их капитальных ремонтов. Срок эксплуатации турбоге-

нераторов — от 1 года до 49 лет. Техническое состояние разное — от удовлетворительного (без дефектов ослабления креплений) до неудовлетворительного (с дефектами ослабления креплений).

Типичные оценки передаточных АЧХ $\hat{H}$ ускоряемости конструкции статора турбогенератора типа ТВВ-320-2 представлены на рис. 2. Разрешение в спектре — 3,9 Гц. Оценки точечных АЧХ (рис. 3) зависят от степени ослабления узлов креплений и позволяют оценить близость собственных частот к частоте вынужденных «магнитных» вибраций статора, равных 100 Гц.

Из вида АЧХ на рис. 2 и 3 следует, что конструкция статора ведет себя как система с распределенными параметрами и характеризуется большим числом

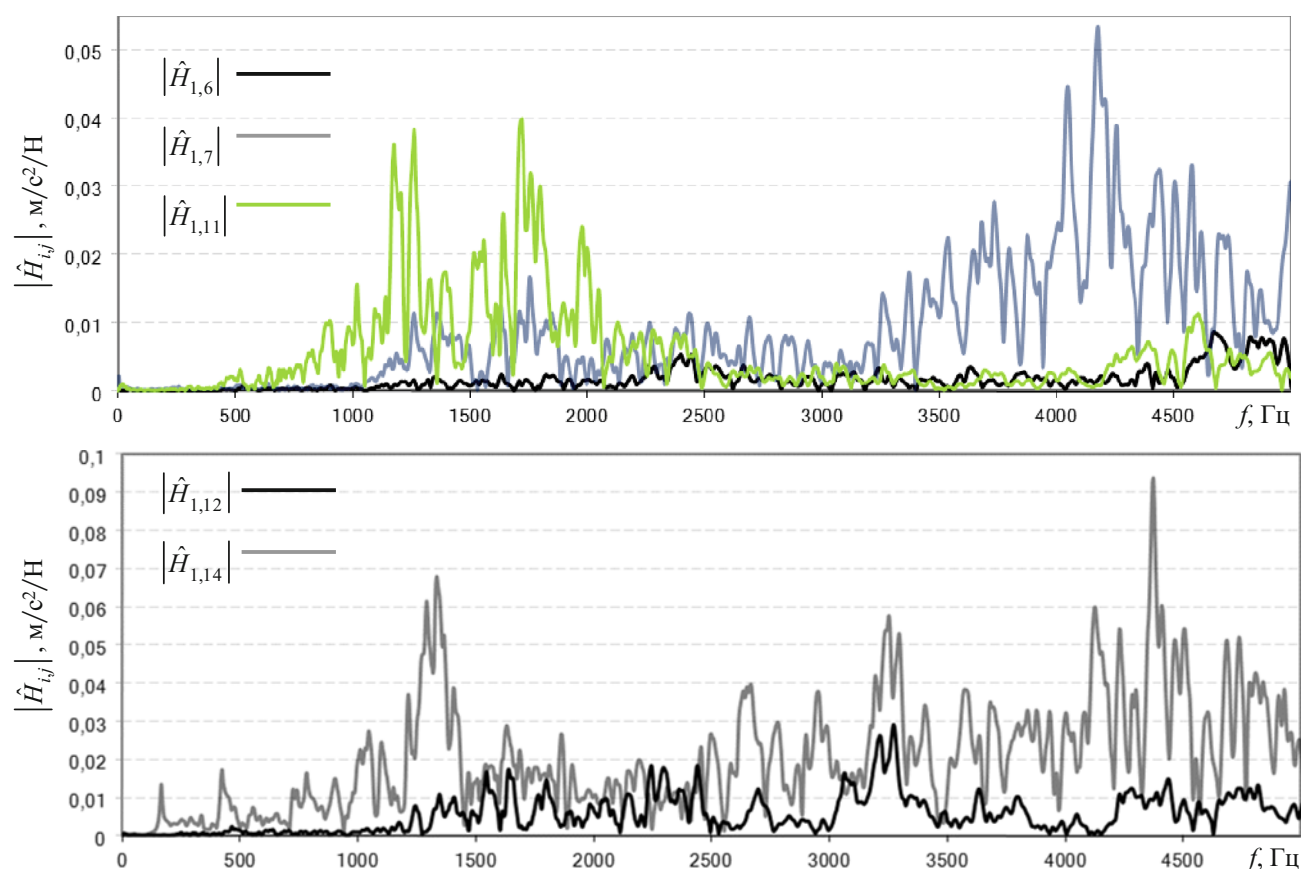


Рис. 2. Оценки передаточных АЧХ ускорения конструкции статора турбогенератора ТВВ-320-2 между его элементами и обшивкой корпуса (см. рис. 1)

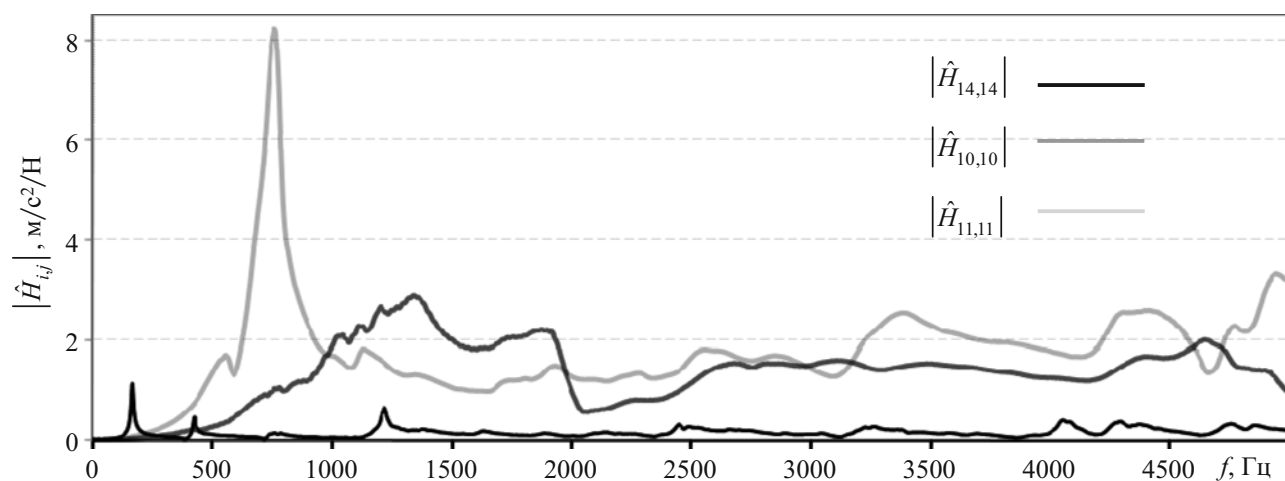


Рис. 3. Оценки точечных АЧХ ускорения элементов конструкции статора турбогенератора ТВВ-320-2 (см. рис. 1)

резонансных и антирезонансных частот. На низких (до 300 Гц) и средних (до 1 кГц) частотах оценки АЧХ $|\hat{H}_{1,11}|$ и $|\hat{H}_{1,6}|$, $|\hat{H}_{1,7}|$, $|\hat{H}_{1,12}|$ — малые величины, определяемые с большой погрешностью. Объясняется это недостаточным отношением сигнал/шум в сигналах реакции из-за большой (сотни тонн) массы статора.

Диапазон достоверного определения $\hat{H}$ определялся по оценкам функции когерентности [6] сигналов реакции и силы, превышающим 0,95. Для передаточ-

ных АЧХ всех точек он лежит от указанных выше частот до 5 кГц. Значения меры сходства [9] оценок АЧХ, определенных в сериях с минимальной (300 Н) и максимальной (5 кН) амплитудами возбуждения, лежат выше 0,95, а значения меры сходства симметричных оценок АЧХ — в интервале [0,85; 0,95]. Согласно ГОСТ ИСО 7626-5-99 [6] полученные оценки являются подтверждением линейности системы и правильности проведения измерений.

Результаты контроля правильности измерений типичны для всех четырех участвовавших в испытаниях статоров турбогенераторов. Объясняется это тем, что при ударном возбуждении освобожденных из закрепления элементов статора происходят их свободные затухающие колебания в пределах зазоров. Спектр таких колебаний содержит интенсивные гармоники свободных колебаний на низких и средних частотах, которые оказывают незначительное влияние на механическую подвижность статора. Нелинейность колебаний ослабленных элементов статора на средних и высоких частотах обнаруживается по незначительному смещению частот небольшого числа резонансных максимумов, зависящему от амплитуды возбуждения. На остальных частотах конструкция статора продолжает проявлять линейные свойства.

Сравнительный анализ оценок АЧХ статоров четырех турбогенераторов типа ТВВ-320-2 позволил установить следующие закономерности.

1. Частотные диапазоны динамических податливостей конструкции от мест возникновения дефектов до обшивки корпуса статора пересекаются (см. рис. 2). Поэтому в спектре виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора необходимо проводить распознавание как простых, так и сложных неисправностей (одновременное присутствие более одного дефекта).

2. Максимальные оценки передаточных АЧХ от разных дефектов (см. рис. 2) соизмеримы между собой. Поэтому при идентичных параметрах широкополосного ударного возбуждения возможность обнаружения этих дефектов в спектре виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора практически одинакова.

3. При идентичных параметрах широкополосного ударного возбуждения среднеквадратическое значение (СКЗ) сигнала реакции на обшивке корпуса статора в диапазоне от 200 Гц до 5 кГц максимально от узлов крепления сердечника. От крайних пакетов и лобовых частей обмотки статора СКЗ сигнала реакции в два и три раза меньше. Разброс СКЗ сигналов реакции четырех статоров турбогенераторов не превышает двух раз. Поэтому параметр СКЗ слабо зависит от технического состояния статора и главным образом определяется параметрами ударного возбуждения.

4. С удалением от точки ударного возбуждения вид оценок АЧХ сохраняется, СКЗ сигналов реакции и возможность обнаружения дефектов уменьшаются. Причем по длине окружности корпуса статора затухание больше, чем по образующей. Чтобы ослабление СКЗ сигнала реакции между датчиками на обшивке корпуса статора не превышало 5 дБ, достаточно установить по четыре датчика (см. рис. 1) в каждой из торцевых зон статора (со стороны турбины и со стороны возбуждателя). При этом затухание сигнала реакции можно использовать для локализации местонахождения

дефектов с точностью до сектора окружности статора с центральным углом в 90° .

По результатам сравнительного анализа и расчета СКЗ можно сделать вывод: для решения задач виброакустической диагностики оценки АЧХ статора могут быть определены экспериментально на одном турбогенераторе каждого типа. Имеющиеся различия не являются существенными по двум причинам. Во-первых, разброс оценок АЧХ является несущественным для решения задач виброакустической диагностики дефектов статора, во-вторых, значения АЧХ статора зависят от расстояния между точками возбуждения и измерения реакций. На работающем генераторе это расстояние заранее неизвестно. Заниженные оценки АЧХ можно рассматривать как оценки, полученные на несколько большем расстоянии между точками возбуждения и измерения реакции.

Таким образом, полученные оценки АЧХ статора позволяют провести имитационное моделирование реакций конструкции статора на известные паразитные динамические воздействия в дефектных узлах креплений для оценки возможности обнаружения дефектов статора в спектре виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора, определение спектральных диагностических признаков неисправностей, обоснование числа и схемы установки датчиков.

Оценка возможности обнаружения дефектов статора на работающем турбогенераторе

Оценим возможность обнаружения в спектре виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора типа ТВВ-320-2 гармоник сигнала реакции от мгновенного соударения элементов в ослабленных узлах креплений с ударной силой

$$F_j(t) = P\delta(t), \quad (4)$$

где P — мгновенный ударный импульс; $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака. Для линейных систем амплитудный спектр сигнала виброускорения в точке i рассчитываем по формуле имитационного моделирования

$$\left| \hat{X}_i(f) \right| = \left| \hat{H}_{i,j}(f) \right| \left| F_j(f) \right|, \quad (5)$$

где $\left| \hat{H}_{i,j}(f) \right|$ — экспериментальная оценка АЧХ (1); $\left| F_j(f) \right|$ — амплитудный спектр сигнала ударной силы (4).

Спектр сигнала (4) равномерный, поэтому оценки спектров виброускорения корпуса статора идентичны оценкам АЧХ статора на рис. 2. Экспериментально определенный порог обнаружения гармоник в амплитудном спектре виброускорения обшивки корпуса исправного статора работающего турбогенератора типа ТВВ-320-2 равен $0,03 \text{ м/с}^2$. Следовательно, при соударениях элементов статора в ослабленных узлах

креплений с силой $|F_j(f)| \geq 2$ Н максимальные значения гармоник виброускорения сигнала реакции (5) превысят пороговый уровень обнаружения.

Такое имитационное моделирование обладает рядом недостатков. Во-первых, модель мгновенной силы удара (4) далека от действительности, так как соударение элементов происходит за конечный промежуток времени. Во-вторых, спектр сигнала силы задается произвольным образом, а не определяется в процессе решения задачи о соударении элементов в ослабленных узлах креплений.

Этих недостатков лишены структурные динамические модели дефектов статора [10–12], в которых процесс соударения элементов описан с учетом местных и общих деформаций. Их использование позволяет получить достоверные оценки спектров сигналов ударных сил, а результаты имитационного моделирования — наиболее достоверные оценки спектральных образов дефектов и диагностических признаков неисправностей [13].

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В диапазоне частот от 1 до 10 кГц динамические свойства конструкции статора в первом приближении могут быть описаны в рамках линейной модели с помощью линейной аппроксимации оценок частотных характеристик ускоряемости.

2. Сложность выделения спектральных диапазонов, присущих только одному дефекту, требует распознавания простых и сложных неисправностей (одновременное присутствие более одного дефекта) в спектре виброускорения обшивки корпуса статора работающего генератора.

3. Затухание сигнала реакции по длине и окружности корпуса статора можно использовать для локализации местонахождения дефекта с точностью до сектора окружности статора с центральным углом в 90°. Для этого достаточно установить по четыре датчика в каждой из торцевых зон статора.

3. При решении задач виброакустической диагностики статоров турбогенераторов оценки АЧХ конструкций статоров могут быть получены на одном турбогенераторе каждого типа.

4. Для оценки возможности обнаружения дефектов статора по спектру виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора и определения диагностических признаков неисправностей необходимы экспериментальные оценки АЧХ статора и расчетные спектры сигналов динамических сил, возбуждающих виброакустические колебания статора. Спектры сигналов динамических сил могут быть получены из структурных динамических моделей дефектов, процесс соударения элементов в которых описан с учетом местных и общих деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титов В. В., Хуторецкий Г. М., Загородная Г. А. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. — Л.: Энергия, 1967. — 895 с.

2. Фридман В. М., Шкода Г. В., Школьник В. Э. Колебания статора турбогенератора, связанные с вращающимся магнитным полем / В сб.: Электросила. 1974. № 30. С. 17–21.
3. Батуев Г. С., Голубков Ю. В., Ефремов А. К. и др. Инженерные методы исследования ударных процессов. — М.: Машиностроение, 1977. — 240 с.
4. Цветков В. А. Диагностика мощных генераторов. — М.: НЦ ЭНАС, 1995. — 235 с.
5. Самородов Ю. Н. Дефекты генераторов. — М.: ЗАО «Энергетические Технологии», 2005. — 350 с.
6. ГОСТ ИСО 7626-5-99. Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепленным к конструкции. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 21 с.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
8. ГОСТ Р ИСО 5348-99. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 19 с.
9. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
10. Назолин А. Л., Поляков В. И. Исследование виброударных режимов движения в системе стержневое ребро — сердечник электрической машины / Электричество. 2007. № 6. С. 26–30.
11. Назолин А. Л. Математическая модель виброударного процесса в крайнем пакете шихтованного сердечника статора электрической машины / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 2. С. 10–17.
12. Назолин А. Л. Динамическая диагностическая модель узла крепления обмотки в пазу сердечника статора мощного турбогенератора / Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 2. 77-30569/310057.
13. Морозов А. Н., Назолин А. Л. Имитационное моделирование виброакустических колебаний корпуса статора турбогенератора с дефектом ослабления крепления упругой подвески / Нелинейный мир. 2009. № 7. С. 556–562.

REFERENCES

1. Titov V. V., Khutoretskii G. M., Zagorodnaya G. A., et al. Turbo-generators. Calculation and design. — Leningrad: Énergiya, 1967. — 895 p. [in Russian].
2. Fridman V. M., Shkoda G. V., Shkol'nik V. É. Turbine generator set stator oscillations caused associated with rotating magnetic field / In: Élektrosila. 1974. N 30. P. 17–21 [in Russian].
3. Batuev G. S., Golubkov Yu. V., Efremov A. K., et al. Engineering methods of research into impact processes. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 240 p. [in Russian].
4. Tsvetkov V. A. Diagnostics of powerful generators. — Moscow: Izd. NTs ÉNAS, 1995. — 235 p. [in Russian].
5. Samorodov Yu. N. Defects of generators. — Moscow: Izd. ZAO «Énergeticheskie Tekhnologii», 2005. — 350 p. [in Russian].
6. RF State Standard GOST ISO 7626-5-99. Vibration and impact. Experimental determination of mechanical mobility. Part 5. Measurements using impact excitation with exciter which is not attached to the structure. — Moscow: Izd. standartov, 2001. — 21 p. [in Russian].
7. Bendat Dzh., Pirsol A. Random data: analysis and measurement procedures. — Moscow: Mir, 1989. — 540 p. [Russian translation].
8. RF State Standard GOST R ISO 5348-99. Vibration and impact. Mechanical attachment of accelerometers. — Moscow: Izd. standartov, 2000. — 19 p. [in Russian].
9. Genkin M. D., Sokolova A. G. Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms. — Moscow: Mashinostroenie, 1987. — 288 p. [in Russian].
10. Nazolin A. L., Polyakov V. I. Research of vibroimpact regimes of motion in the “rib — electric machine core” system / Élektrichestvo. 2007. N 6. P. 26–30 [in Russian].
11. Nazolin A. L. Mathematical model of vibroimpact process in the end stack of a sheet core of electric machine / Probl. Mashinostr. Nadezhn. Mashin. 2005. N 2. P. 10–17.
12. Nazolin A. L. The dynamic diagnostic model of the mount of the winding in slot of the stator core of a powerful turbo-generator / Nauka Obrazov.: Élektron. Nauch.-Tekhn. Izd. 2012. N 2. 77-30569/310057 [in Russian].
13. Morozov A. N., Nazolin A. L. Imitating modeling of vibroacoustic oscillations of the stator turbo-generator housing with defect of easing of stator suspension / Nelin. Mir. 2009. N 7. P. 556–562.