

**Д.М. Косьмин¹, И.В. Котельников¹, В.Н. Осадчий¹,
А.Л. Некрасов², Е.А. Ненашева³, А.Б. Козырев¹**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²ОАО «Силовые машины»

³ОАО Научно-исследовательский институт "Гириконд"

Комплекс для динамического мониторинга механических смещений и вибраций элементов турбинных установок.

В статье описывается СВЧ комплекс динамического контроля отклонений, вибраций и биений элементов турбин промышленных и транспортных (авиационных, морских и автомобильных) энергетических установок с целью повышения надежности их эксплуатации (предотвращение и минимизация возможности техногенных катастроф). В основе работы системы лежит измерение фазового сдвига СВЧ сигнала отраженного от движущихся элементов турбины. Приведены результаты электродинамического моделирования датчика и результаты его испытаний.

Ключевые слова: СВЧ, датчик, механические смещения, турбинные установки, безопасность эксплуатации

Усталостные поломки рабочих элементов мощных турбин промышленных и транспортных (авиационных, морских и автомобильных) энергетических силовых установок в эксплуатационных условиях приводят к катастрофическим последствиям.

В настоящей работе предлагается устройство, обеспечивающее постоянный мониторинг поведения элементов работающей турбины (турбинных лопаток, ротора и т.д.) в ходе её эксплуатации. Устройство обеспечивает фиксацию процессов вибрации каждой лопатки турбины с возможностью определения временной зависимости изменения дистанции движущихся элементов от неподвижных частей турбины и определения полного частотного спектра колебаний, как отдельных элементов, так и всей турбины в целом в любом динамическом режиме.

Высокая точность определения дистанции и частотного спектра позволяет предупреждать отклонения работы турбины от штатного режима на ранних стадиях развития дефектности. Кроме того, в отличие от обычно используемых индуктивных датчиков, рассматриваемое устройство позволяет проведение контроля вибронапряженного состояния элементов турбины при пуско-наладочных работах, т.е. в стационарном режиме.

На рис.1 показана структурная схема предлагаемого многоканального комплекса динамического мониторинга турбинных установок.

Метод определения положения в каждом канале основан на принципе измерения фазового сдвига СВЧ сигнала отраженного от движущихся элементов турбины. Изменение фазового сдвига СВЧ сигнала фиксирует изменение емкости, определяемое изменением расстояния между неподвижными элементами датчика и подвижными элементами турбины (d'). Сигнал от датчика поступает в канал обработки, содержащий быстродействующий АЦП, что в результате позволяет наблюдать в реальном времени

частотный спектр и амплитуды колебаний. Расположение датчиков в различных частях статора турбины позволяет создание ряда независимых каналов, что позволяет получить обобщенную информацию о волновых механических колебаниях турбины.

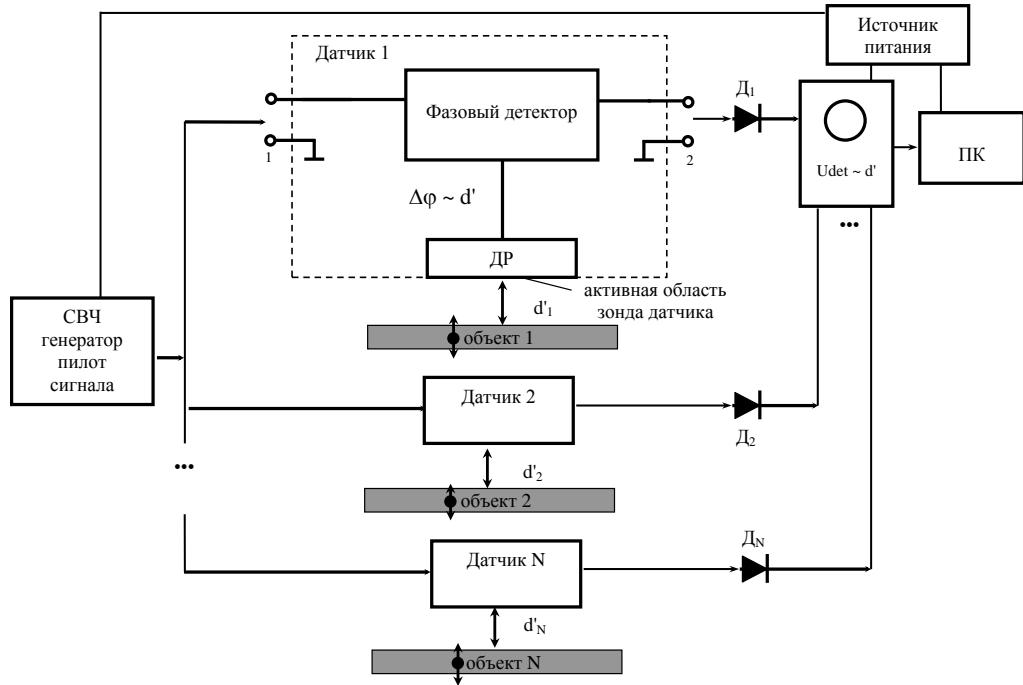


Рис.1.

В качестве зонда датчика используется кольцевой металлодиэлектрический (МДР) резонатор. Особенность низших типов колебаний МДР [1] состоит в ориентации вектора электрического поля перпендикулярно торцевой плоскости резонатора, что позволяет эффективно менять их резонансную частоту при изменении зазора между ДР и движущимися металлическими или диэлектрическими элементами турбины ("объект" на рис.1). Неоднородность (изменение емкости воздушного зазора) создается при перемещении движущегося элемента турбины относительно МДР, что обеспечивает перестройку частоты резонатора до 100% и более при перемещении движущейся части на десятки, сотни микрометров в сантиметровом диапазоне длин волн.

В работе [2] приведена электродинамическая модель и основные соотношения для расчета резонансных частот низших мод электромагнитных колебаний открытых кольцевых диэлектрических резонаторов, на основе которых были получены варианты исполнения диэлектрических резонаторов для выбранных резонансных частот и диэлектрической проницаемости $\epsilon \approx 10$ материала Д10, описанного в [3].

Было проведено электродинамическое моделирование зонда датчика в программе электродинамического анализа сверхвысокочастотных устройств. Моделирование разбивалось на решение двух задач:

- задача на собственные моды (определялись спектр собственных частот резонатора и их зависимость от зазора между резонатором и неоднородностью в виде металлической плоскости и осуществлялся выбор основного типа колебаний);
- задача на возбуждение основного типа колебаний в резонаторе (определялись оптимальные положение и размер возбуждающего штыря в корпусе датчика).

На рис. 2 представлено решение задачи на собственные моды для диэлектрического резонатора из керамики Д10 [3]. Основным типом колебаний рассматриваемой системы является НЕМ-мода, особенностью которой является рост резонансной частоты с увеличением расстояния между резонатором и неоднородностью. Расстояние между резонатором и неоднородностью d' задавался как параметр и варьировался от 1мм до 10мм.

Решение задачи на возбуждение показало, что при изменении параметра d' от 1мм до 10мм в резонансе S_{11} не хуже 15дБ, что говорит о достаточной связи возбуждающих штырей и резонатора. На рис. 3 представлено изменение резонансной кривой ДР в зависимости от расстояния d' . Как видно, динамический диапазон изменения сигнала на частоте 2.96ГГц составляет 25дБ, а перестройка резонансной частоты при изменении расстояния между резонатором и неоднородностью от 1 мм до 10мм превышает 200МГц, что достаточно при использовании фазового детектирования для измерения расстояния до неоднородности.

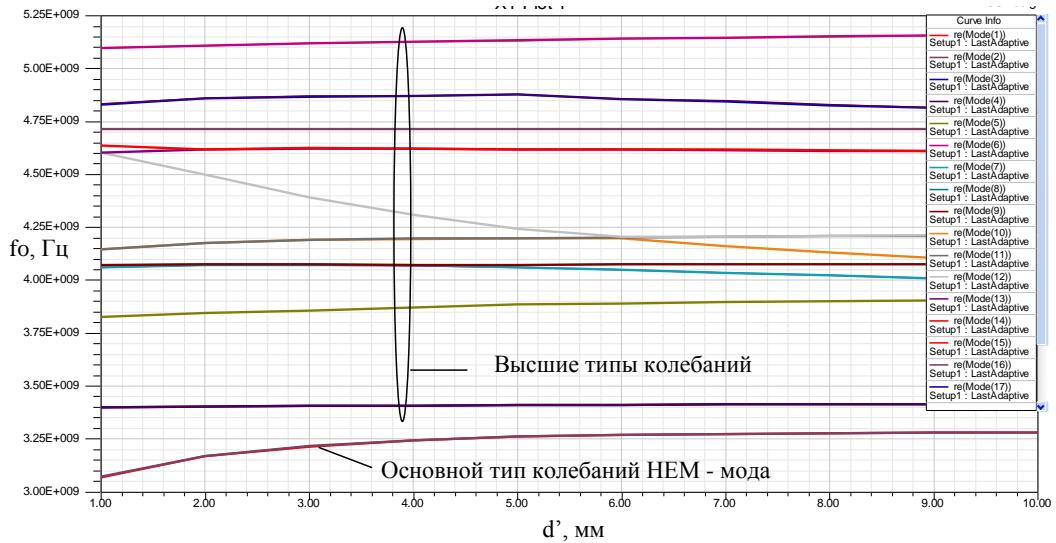
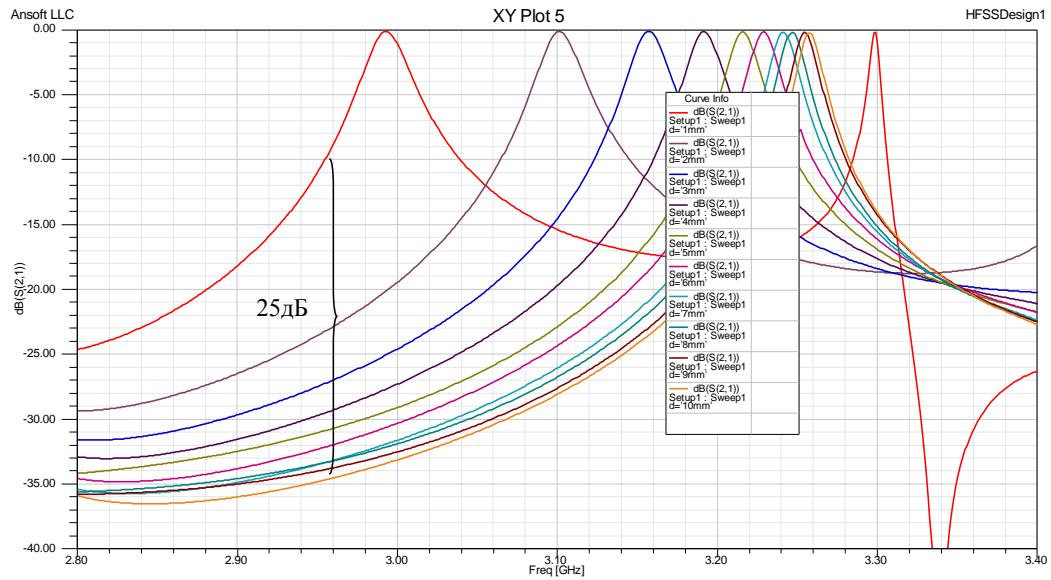


Рис.2.

По результатам моделирования были изготовлены образцы СВЧ керамических резонаторов из керамики Д10(рис.4-а.) и зонд датчика. Зонд датчика в составе канала измерительного комплекса показан на рис.4-б.

На рис.5. показана детекторная характеристика зонда датчика (зависимость $\Delta|S_{21}| = f(d')$ датчика). Как видно, экспериментальная кривая хорошо согласуется с результатами моделирования.

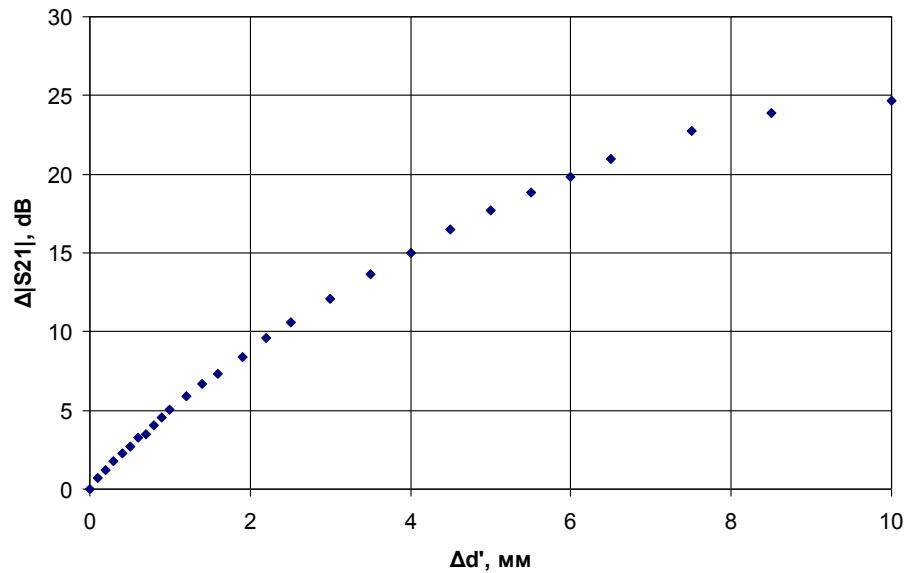
Опытный образец датчика был испытан на испытательном стенде Ленинградского Механического Завода (рис.6). На рис.7. Показан "рельеф" лопаток турбины (92 лопатки) за один оборот ротора, измеренный с помощью рассматриваемого датчика. Максимальное биение (отклонение) лопатки турбины составило ~ 5мм.



Puc.3.



Puc.4.



Puc.5.



Рис.6.

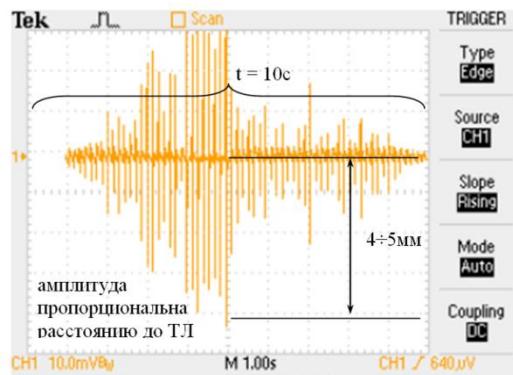


Рис.7.

Параметры диэлектрических резонаторов:

- материал: СВЧ керамика $\epsilon=10$;
- диэлектрические потери $\operatorname{tg}\delta (9.4\text{ГГц}) < 0.0001$;
- температурный коэффициент диэлектрической проницаемости не более $0.01\%/\text{°C}$.

Характеристики зонда датчика:

- Высокая чувствительность к виброперемещениям металлических и (или) диэлектрических элементов турбинных установок, не зависящая от скорости вращения турбин;
- диапазон регистрируемых механических смещений: 10 мкм – 10 см с относительной погрешностью измерений не более 10%;
- время срабатывания (разрешение по времени регистрации процесса) – не более 10 нс;
- полоса пропускания для фиксации механических вибраций – вплоть до частот 100 МГц.
- измерение амплитуд осевых и радиальных биений вращающихся роторов турбин в режиме реального времени;
- наличие режима калибровки и поверки турбин в статическом режиме.

Библиографический список

1. Прасюк Б.Б., Волошин А.А., Прокопенко Ю.В. Перестраиваемый кольцевой металлодиэлектрический резонатор // Электроника и связь 3' Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». 2010. С.42-45.
2. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятышев, Л.Г. Гасанов и др.; Под ред. М.Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989.
3. Е.А.Ненашева. Керамические материалы и микроволновые диэлектрические резонаторы для техники СВЧ. Труды научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты -2011» Н.-Новгород,13-15 апреля,2011,стр.60-64