

---

---

# ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

---

---

УДК 621.822—752.3

А. А. БЕЛОУСОВ, А. К. ЯВЛЕНСКИЙ, А. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. С. ВОЛКОВ

## ТЕПЛОВИЗИОННАЯ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются вопросы анализа теплового и вибрационного полей. На примере электрической машины определена степень их корреляции и возможность применения для мониторинга технического состояния и диагностики дефектов исполнительных механизмов. Предложена методика, которая может служить основой для диагностирования электромеханических устройств по параметрам температуры и вибраций.

**Ключевые слова:** тепловизионная диагностика, вибрационная диагностика, силовые машины, исполнительное устройство.

Электромеханические устройства (ЭУ), конструкционные элементы которых совершают стационарные и нестационарные движения, являются источниками вибрационных и тепловых полей. Вызываемые похожими причинами картины этих полей способны служить информационной основой мониторинга и диагностирования, по результатам чего определяются текущее состояние объекта, характер изменения его характеристик с течением времени и алгоритм дальнейших по отношению к нему действий. Эффективный контроль и диагностика как на этапе производства, так и во время эксплуатации способны значительно увеличить надежность и долговечность технических комплексов.

Рассмотрим результаты измерения и анализа виброактивности, а также распределение температуры на поверхности ЭУ с помощью тепловизора. Виброактивность исследуемого ЭУ измеряется в ряде точек (1—6), которые равномерно распределены по поверхности установки (рис. 1). Анализ вибрации осуществляется при работе машины в двух режимах — симметричном и несимметричном. Несимметричный режим используется для моделирования неисправного состояния устройства. Для каждого из режимов получена картина теплового поля. Так, на рис. 1 представлено изображение, характеризующее распределение температуры электрической машины при несимметричном режиме.

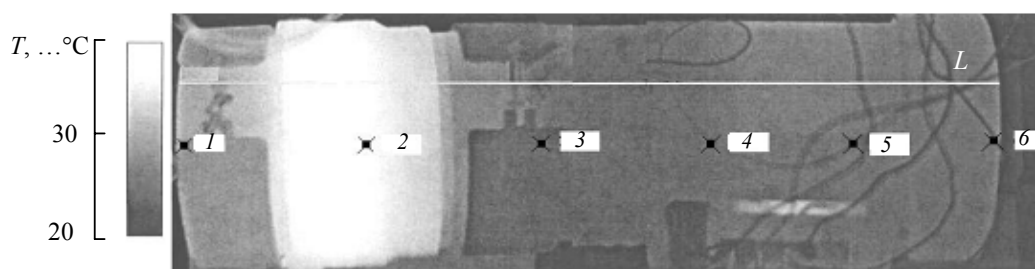


Рис. 1

Для измерения и анализа вибраций разработана система, построенная на „технологии виртуальных приборов“. Синтез специализированного аппаратного и программного обеспечения

позволил добиться универсальности и автоматизировать процесс сбора данных в многоканальном режиме. Алгоритм работы системы создавался в среде программирования LabView. При взаимодействии виртуального прибора с платой сбора сигналов и комплектом пьезопреобразователей был получен лабораторный спектроанализатор. Результаты спектрального анализа могут быть использованы для проведения кластерного, дискриминантного и корреляционного анализа.

В результате измерения и анализа информационного сигнала были получены картины вибрационного поля рассматриваемой машины при работе в симметричном (рис. 2, а), и несимметричном (рис. 2, б) режимах. Уровень шума, соответствующий сигналу с минимальной амплитудой, принят равным нулю. Картина вибрационного поля при несимметричном режиме работы машины, в отличие от картины при симметричном режиме, характеризуется изрезанностью формы и наличием специфических амплитудных выбросов.

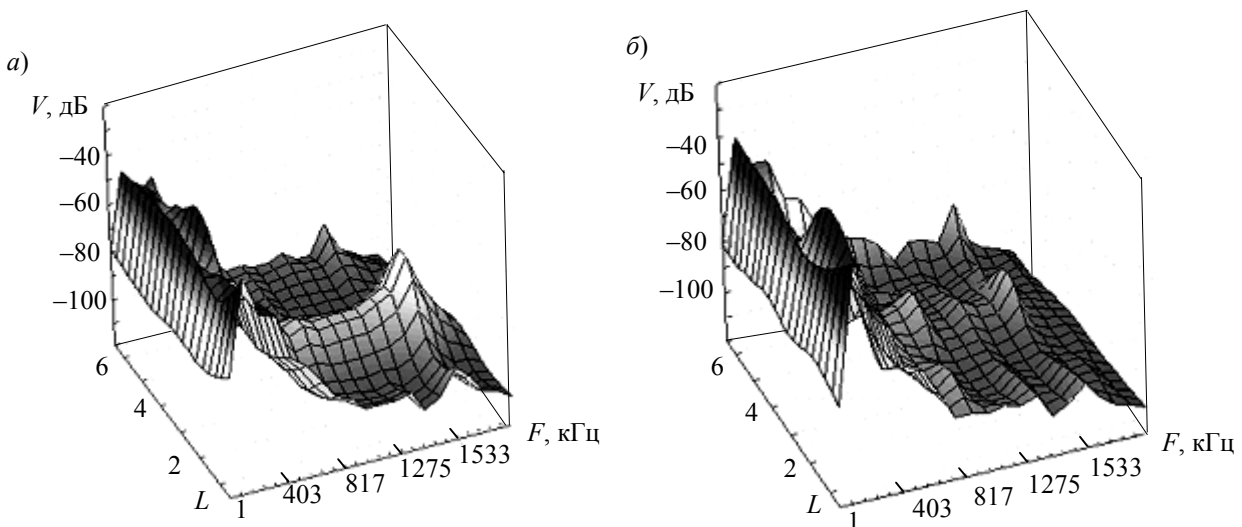


Рис. 2

Графики зависимости ( $T(L)$ ) температуры, измеренной на линии расположения первичных преобразователей вибрации, представлены на рис. 3 (при температуре воздуха  $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Несимметричный режим (кривая 1) характеризуется повышенными значениями температур и изрезанностью формы.

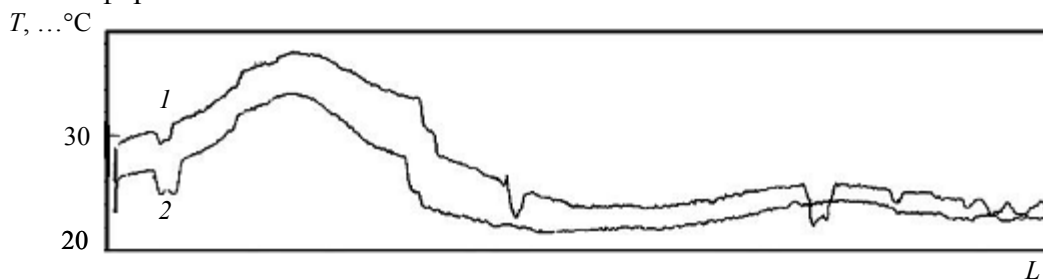


Рис. 3

Вопросу измерения температур электромеханических систем посвящено достаточно большое число работ [1]. Однако в них рассматриваются локальные измерения температур, что не позволяет идентифицировать характеристики источников аномальных изменений. Анализ же измеренных параметров тепловых полей и последующее сравнение с моделируемыми полями обеспечивает возможность проведения такой идентификации.

Моделирование и исследование вибрационных и тепловых полей может осуществляться методами цифровой обработки изображений с помощью программы MathLab. Рассмотрим поле как функцию  $v = f(x, y, t)$ , где  $x$  и  $y$  — пространственные координаты развертки поверхности измерения,  $t$  — время. Параметр  $v$  характеризует вибрацию или температуру

в точке измерения. Плотность измерения параметров вибрации определяется размерами датчиков, а температурных полей — разрешающей способностью измерителя, что обуславливает дискретность представления этих полей. Функция  $v = f(x, y, t)$  после дискретизации может быть представлена в виде матрицы:

$$v(t) = \begin{bmatrix} f(1, 1, t) & f(1, 2, t) & \dots & f(1, N, t) \\ f(2, 1, t) & f(2, 2, t) & \dots & f(2, N, t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M, 1, t) & f(M, 2, t) & \dots & f(M, N, t) \end{bmatrix},$$

где  $N$  и  $M$  — число измерений по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

В пакете ИРТ (Image Processing Toolbox) имеются функции, позволяющие проводить анализ рассматриваемых процессов. Каждый элемент матрицы можно рассматривать как пиксел. Отличительной особенностью исследуемых полей является зависимость элемента поля от времени  $t$ . Используются следующие типы полей:

- поля, матрицы которых характеризуются усредненными характеристиками элементов;
- поля уровней или двоичного представления;
- спектральные поля: каждый элемент матрицы представляется спектром.

Используя слабую зависимость характеристик поля по одной из координат, можно ограничиться анализом вектор-столбца или вектор-строки:

$$v(t) = (f(M, 1, t) \quad f(M, 2, t) \quad \dots \quad f(M, N, t)).$$

Перейдем к усредненным характеристикам — уровням мощности вибросигналов. Распределение уровней мощности спектра сигналов, в децибелах, для несимметричного ( $P'_W$ ) и симметричного ( $P''_W$ ) режимов имеет следующий вид:

$$P'_W = (-16, 4; -19, 6; -19, 5; -20, 3; -26, 6; -26, 7),$$

$$P''_W = (-17, 1; -23, 5; -22, 0; -23, 1; -28, 2; -26, 0).$$

Результаты корреляционного анализа параметров теплового и вибрационного полей (см. рис. 2, 3) показали, что при симметричном режиме коэффициент корреляции составил 0,62, при несимметричном — 0,5. Эти результаты могут быть объяснены следующими соображениями:

- наличие единых источников идентифицируемых полей температуры и вибрации способствует корреляции между диагностическими признаками;
- полезная информация сравниваемых сигналов различается (вибрационные сигналы более информативны), что отрицательно сказывается на корреляции между диагностическими признаками.

На основе матриц или векторов изображений полей проводится кластерный анализ, позволяющий выявить частотные особенности, в частности, вибрационных полей. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты кластеризации для вектора

$$V(t) = (V(M, 1, t) \quad V(M, 2, t) \quad \dots \quad V(M, 6, t)),$$

где  $V(m, k, t)$  — вибрация в  $k$ -й точке измерения.

В результате анализа выявлены частотные диапазоны, для которых различия минимальны:  $[0, 01 \dots 0, 2]$ ,  $[4 \dots 5]$ ,  $[15 \dots 20]$  кГц. Эти частоты могут использоваться для модального анализа. Частоты  $[0, 2 \dots 4]$ ,  $[5 \dots 10]$  кГц, где различия существенны, позволяют диагностировать возмущения, связанные с определенными дефектами.

Несмотря на простоту измерения картины теплового поля, его информативность значительно ниже информативности вибрационного поля, что может использоваться только для оперативной диагностики общего состояния объекта. Для более глубокой оценки технического состояния объекта контроля должен применяться виброакустический метод.

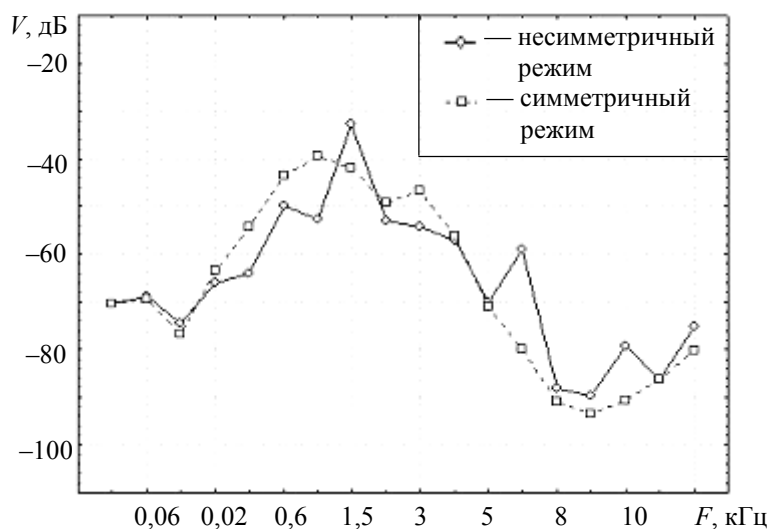


Рис. 4

Предложенная методика может служить основой для экспертного анализа вибрации. При этом можно не только распознать локализацию дефекта, техническое состояние которого изменилось (путем сравнения текущих виброакустических полей с эталонными), но и по спектральным характеристикам сигнала диагностировать виды дефектов [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котеленец Н. Ф., Акимова Н. А., Антонов М. В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. для вузов. М.: Изд. центр „Академия“, 2003. 384 с.
2. Явленский К. Н., Явленский А. К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 239 с.

## Сведения об авторах

**Александр Антонович Белоусов**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, ректор;  
E-mail: rektorat@Liki.spb.ru

**Александр Константинович Явленский**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения, кафедра физики и оптики; зав. кафедрой; E-mail: conpi@peterlink.ru

**Антон Александрович Севастьянов**

— аспирант; ООО „Промкомплект-Инжиниринг“, Санкт-Петербург, нач. отдела;  
E-mail: sevastyanov@e-automatica.ru

**Александр Сергеевич Волков**

— Федеральное агентство по культуре и кинематографии, Москва, зам. нач. отдела; E-mail: volkov@fakk.ru

Рекомендована кафедрой физики и оптики СПбГУ КиТ

Поступила в редакцию 27.09.07 г.