

УДК 620.179.14
ОТСТРОЙКА ОТ ФОРМЫ ДЕФЕКТА В ТЕПЛООБМЕННОЙ ТРУБЕ ПРИ
ОЦЕНКЕ ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

П. А. БАРАБАНОВ, В. П. ЛУНИН
НАЦИОНАЛЬНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Москва, Россия

На настоящий момент доля электроэнергии, полученной на атомных электростанциях (АЭС) в России, составляет порядка 16 % от всей производимой электроэнергии. Атомная энергетика играет важную роль в обеспечении энергией потребителей и является одной из приоритетных областей развития энергетического комплекса.

Один из важнейших узлов ядерного реактора – парогенератор (ПГ). Теплообменные трубы ПГ являются границей между первым и вторым контурами атомных электростанций, и, в связи с этим, играют важную роль в их безопасной эксплуатации.

В настоящее время на планово-предупредительных работах по проверке состояния труб ПГ одним из основных методов неразрушающего контроля (НК) является вихретоковый метод. Результатом контроля является большой объем данных, достоверная оценка которых в короткие сроки и определение геометрических параметров обнаруженных дефектов представляет собой сложную задачу даже для хорошо подготовленного специалиста-эксперта. Поэтому актуальной и перспективной задачей является создание автоматизированных систем анализа вихретоковых сигналов и параметризации обнаруженных дефектов [1].

Основной целью представленной работы является анализ влияния как геометрических параметров дефекта, так и его формы на вихретоковый сигнал, а также создание алгоритма автоматизированной интерпретации вихретоковых сигналов, то есть решение обратной задачи неразрушающего контроля (НК).

Для решения поставленной задачи необходимо иметь определенный набор сигналов от дефектов с различными геометрическими параметрами. Следовательно, прежде чем решать обратную задачу НК, необходимо получить решение прямой задачи и создать базу сигналов [2].

Прямая задача вихретокового контроля – получение сигналов от ВТП. Так как провести необходимое количество экспериментов не представляется возможным, было принято решение использовать для получения данных результаты моделирования процесса контроля методом конечных элементов [3]. В пакете *Comsol Multiphysics* была создана двумерная модель процесса контроля, позволившая получить базу модельных сигналов.

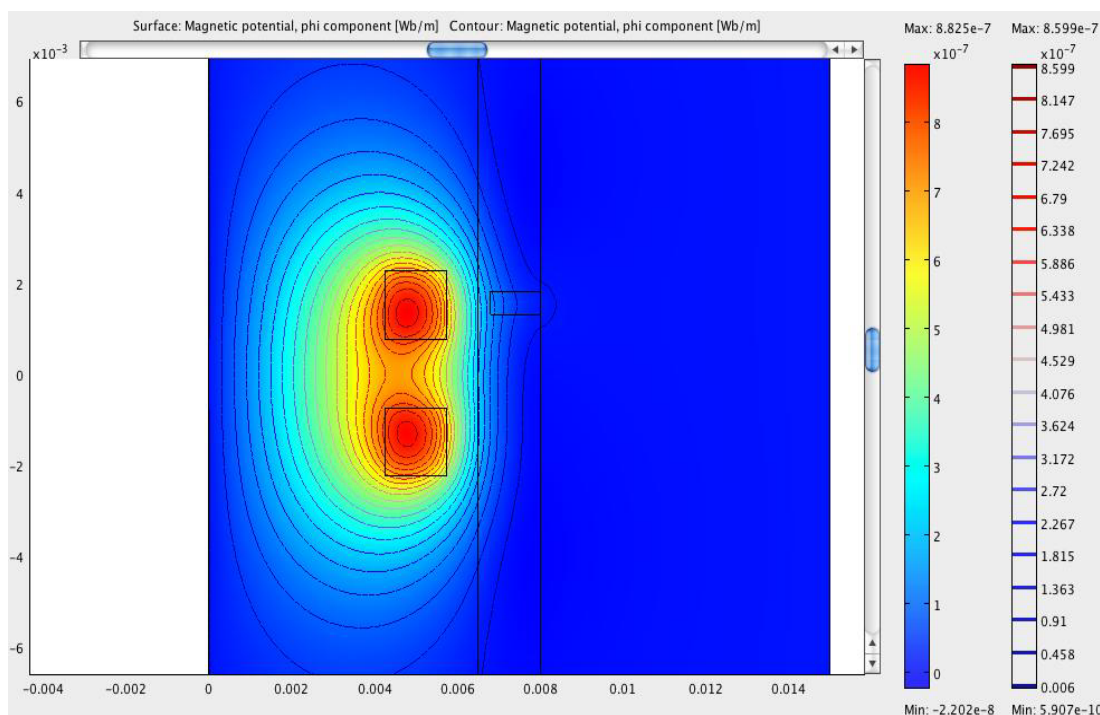


Рис. 1. Результат моделирования процесса контроля; распределение магнитного потенциала, составляющая A_ϕ

С целью анализа влияния геометрических параметров дефекта на сигнал, была составлена база данных, содержащая смоделированные сигналы от 155 дефектов на трех рабочих частотах. Все рассмотренные дефекты – круговые проточки с различными глубиной, осевой протяженностью и формой сечения (рассмотрены прямоугольная, треугольная и трапециевидная формы).

В анализируемых сигналах было выделено 16 информативных параметров, среди них: фаза, амплитуда, максимумы активной и реактивной составляющей, максимум спектра, длина годографа и другие. Затем был проведен корреляционный анализ значений признаков и интересующих нас геометрических параметров с целью выявить степень их влияния на сигнал.

Основная сложность заключается в том, что каждый из геометрических параметров в той или иной степени влияет на сигнал, так как изменение каждого из них по сути является изменением объема дефекта. Этот факт значительно усложняет задачу отдельного определения глубины, протяженности и, тем более, формы сечения дефекта, так как необходимо реализовывать отстройку от влияния не интересующих в данный момент параметров дефекта.

Однако в результате анализа данных было установлено, что по произведению фазы сигнала на его амплитуду можно однозначно оценить объем дефекта. С этой целью построена линейная регрессионная модель. Затем по фазе сигнала (коррелированной с глубиной дефекта и менее всего подверженной влиянию других геометрических параметров) можно определить

глубину дефекта, обучив для решения этой задачи искусственную нейронную сеть (ИНС) [4]. С помощью ИНС удалось достичь лучшего результата в сравнении с регрессионной моделью и обеспечить отстройку от влияния формы на определение глубины.

Определение протяженности проточки осложняется тем, что наиболее коррелированный с ней признак – амплитуда сигнала, в значительной степени зависит и от глубины дефекта. Чтобы учесть это влияние, была обучена еще одна нейронная сеть, на вход которой, помимо признаков сигнала, подается определенная ранее глубина дефекта. Такая структура сети позволяет лучше отстроиться от взаимного влияния протяженности и глубины на амплитуду сигнала, а также учесть влияние формы дефекта на сигнал.

Теперь, когда известны объем, глубина и протяженность сигнала, с помощью простых расчетов можно сделать вывод о форме сечения дефекта, что может быть важной информацией при принятии решения о возможности дальнейшей эксплуатации объекта контроля. Однако точность оценки формы дефекта невысокая, так как напрямую зависит от погрешности определения глубины, протяженности и объема.

Таким образом, в работе реализовано численное моделирование процесса вихретокового контроля теплообменных труб методом конечных элементов, создана база сигналов, выявлены информативные признаки сигналов, проанализировано влияние геометрических параметров (глубины, протяженности, формы) на сигнал и предложен алгоритм для автоматизированной интерпретации сигналов.

В заключении нужно отметить, что надежное решение поставленной задачи при обеспечении низкой погрешности позволит в перспективе существенно улучшить качественные показатели контроля теплообменных труб парогенераторов и повысить точность интерпретации полученных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Song, S. J.** Model-based interpretation of experimental eddy current signals obtained from steam generator tubes by bobbin probe. / S. J. Song // *Insight*. – 2003. – № 5.
2. **Герасимов, В. Г.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Электромагнитный контроль: практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – М. : Высшая школа, 1992. – Кн. 3.
3. **Лунин, В. П.** Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Лунин. – М. : Изд-во МЭИ, 1996.
4. **Уоссермен, Ф.** Нейрокомпьютерная техника: теория и практика / Ф. Уоссермен. – 1992.

E-mail: barabanov.pa@gmail.com