

ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИХРЕТОКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ВВЭР

Лунин В.П., Жданов А.Г., Кулагина Е.Г.
МЭИ (ТУ), Москва

Успешное решение задачи выявления, классификации и оценки геометрических размеров дефектов труб парогенераторов ВВЭР с помощью эксплуатируемых вихретоковых систем (с проходных дифференциальными датчиками) и заложенных в них алгоритмов обработки экспериментальных сигналов затрудняется из-за наличия множества мешающих факторов и помех. Эти мешающие факторы обусловлены рядом структурных неоднородностей объекта контроля (наличием дистанционирующих и антивибрационных решеток, гибов, трубной доски коллектора), отложениями продуктов коррозии. Кроме того, определенное влияние на сигналы от дефектов оказывают особенности конструкции используемого датчика, а также шумы в измерительном тракте вихретоковой аппаратуры [1].

Для повышения достоверности вихретокового контроля при проектировании системы обработки сигналов PIRATE (Program for Identification & Recognition of defects through signal Analysis in Testing by Eddy currents) были исследованы и внедрены эффективные алгоритмы отстройки сигналов от мешающих факторов.

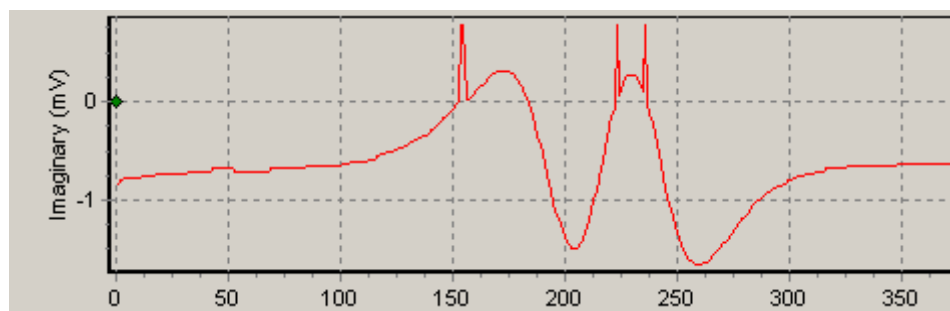
ВВЕДЕНИЕ

Задача предварительной обработки сигналов – отстроиться от влияния основных мешающих факторов и свести экспериментальные данные к сигналу, обусловленному непосредственно дефектом. На практике применение традиционной (на основе преобразования Фурье) фильтрации сигнала усложняется в этом случае тем, что при низком отношении сигнал/шум при удалении шума оказывается потерянной часть полезного сигнала, а также искажается форма импульсов, характеризующих дефекты. Альтернативой традиционной фильтрации является вейвлет-фильтрация (вейвлет-декомпозиция) сигнала, а также адаптивная (по Винеру) и медианная фильтрация.

1. БИБЛИОТЕКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ

1.1 Медианная фильтрация

Для отстройки от случайных всплесков в данных вихретокового контроля в программу предварительной обработки сигналов включен алгоритм медианной фильтрации (рисунок 1).



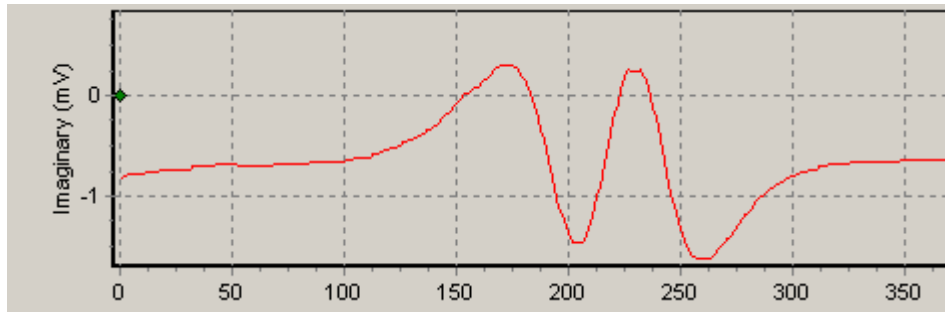


Рис. 1. Фрагмент сигнала до медианной фильтрации и после нее

1.2 Вейвлет-фильтрация

Для подавления высокочастотных шумов, а также низкочастотных квазипериодических искажений, обусловленных так называемым пильгер-шумом, можно воспользоваться алгоритмом вейвлет-фильтрации. В результате работы этого фильтра (с подобранным базовым вейвлетом) можно получить очищенный от шумов сигнал. На рисунке 2 представлены фрагменты вихретокового сигнала до и после операции вейвлет-фильтрации с базовым вейвлетом типа первой производной функции Гаусса.

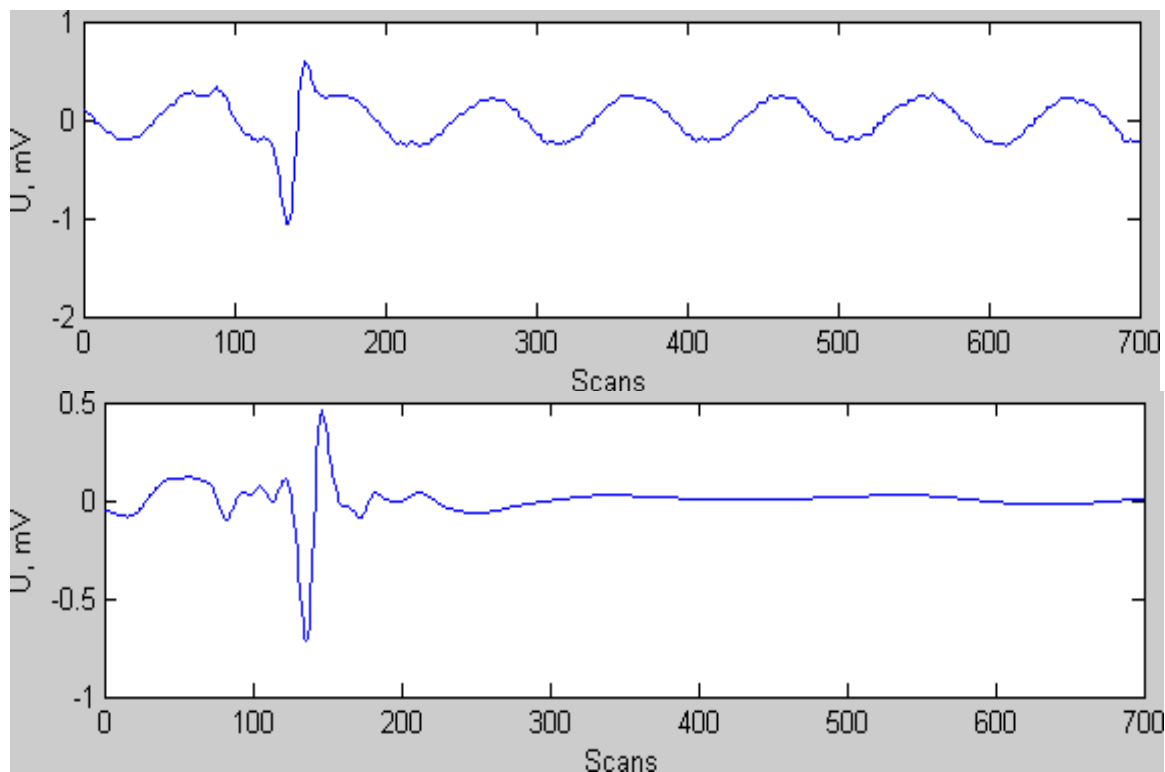


Рис. 2. Фрагмент сигнала до вейвлет-фильтрации (вверху, присутствует пильгер-шум) и после нее

1.3 Устранение тренда

Для подавления низкочастотного тренда может быть применен алгоритм, предполагающий построение полиномиальной аппроксимирующей функции сигнала невысокого порядка с последующим вычитанием ее из исходного сигнала. Пример использования функции аппроксимации 6-ого порядка показан на рисунке 3.

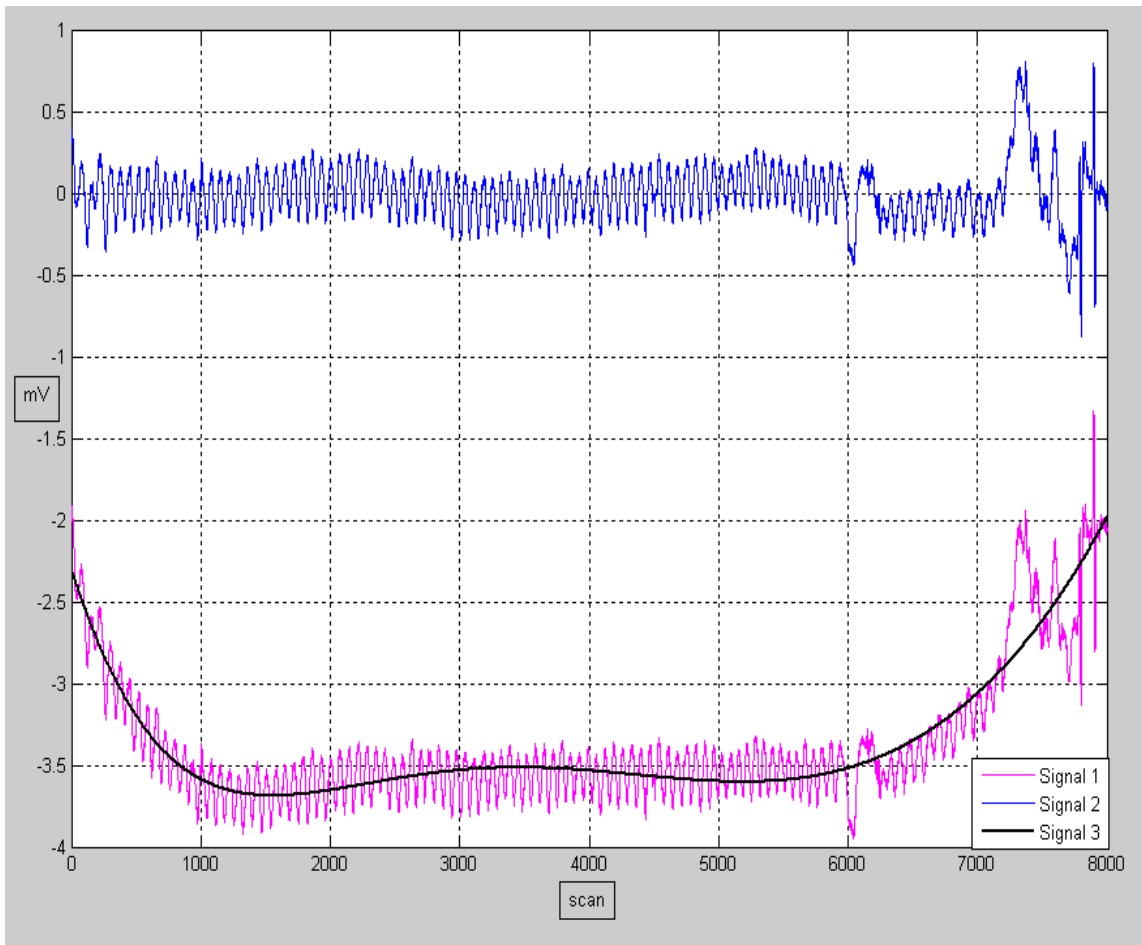


Рис. 3. Пример устранения тренда сигнала с помощью полиномиальной аппроксимации 6-го порядка (внизу – исходный сигнал, вверху – результат обработки)

1.4 Фильтр Винера

В ряде случаев на практике может быть успешно применен адаптивный фильтр Винера [2], настраивающийся на фильтрацию шума с известными локальными спектральными и энергетическими характеристиками. Одним из параметров фильтра является длина окна. Для сглаживания без существенного изменения значений основных информативных параметров сигнала (в первую очередь, амплитуды) используется окно длиной от 4-х до 8-и отсчетов. Выделение сигналов от конструктивных элементов проводится окном длиной не менее 30-и отсчетов.

На рисунке 4 показан результат применения адаптивного фильтра Винера. Отношение сигнала/шум значительно увеличилось, однако при этом исказилась форма сигнала и уменьшилась величина размаха сигнала (разница между максимумом и минимумом), что может сказаться на точности определения параметров дефектов. Фильтр Винера с окном больше 30 отсчетов можно рекомендовать использовать для существенного сглаживания сигнала и визуального контроля.

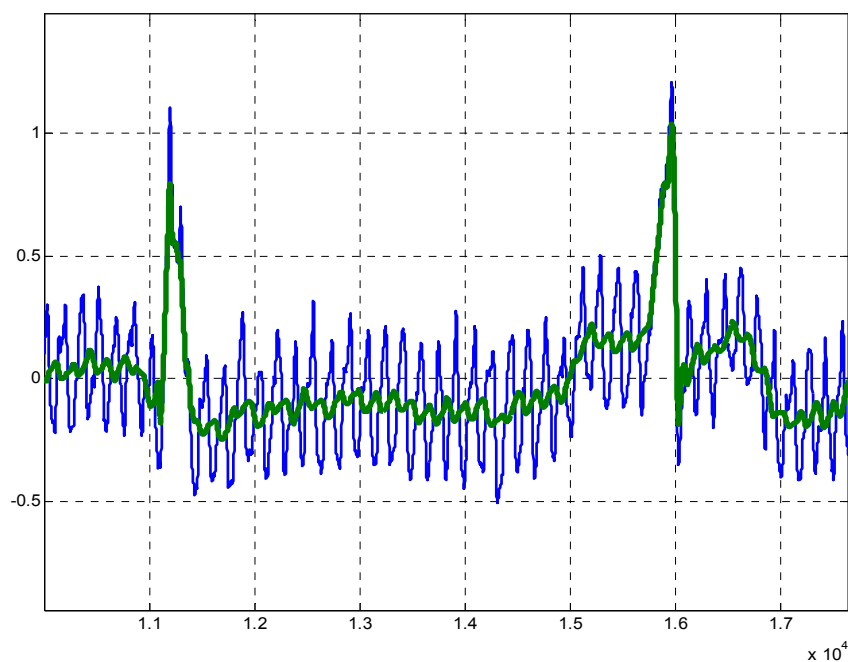


Рис. 4. Результат фильтрации с помощью адаптивного фильтра Винера

2. УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИЛЬГЕР-ШУМА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗЫ СИГНАЛА

Фаза вихретокового сигнала является основным информативным параметром при выделении сигналов от дефектов и их параметризации (в первую очередь, определении глубины). В условии значительного уровня пильгер-шума погрешность определения фазы может возрасти.

С целью снижения погрешности определения фазы разработан и испытан алгоритм отстройки. Для исследования алгоритма были созданы модели сигнала пильгер-шума и сигнала от дефекта. Для создания модели сигнала от дефекта была использована первая производная функции Гаусса, которая близка по форме экспериментальному сигналу от дефекта. Модель пильгер-шума представляла собой сигнал, сформированный случайной суперпозицией частотных составляющих таким образом, чтобы его спектральный состав был близок к спектральному составу экспериментальных сигналов на бездефектных участках труб.

“Реальный” сигнал моделировался суммированием сигнала пильгер-шума и сигнала от дефекта (рисунок 5), параметры которого задавались. При добавлении шума фаза сигнала от дефекта может искажаться в зависимости от осевой координаты дефекта. Устранить возможность искажения фазы информативного сигнала предлагается построением локальной аппроксимирующей функции шума в области дефекта (рисунок 6) и последующим вычитанием этой функции из зашумленного сигнала, чтобы получить “чистый” сигнал от дефекта (рисунок 7).

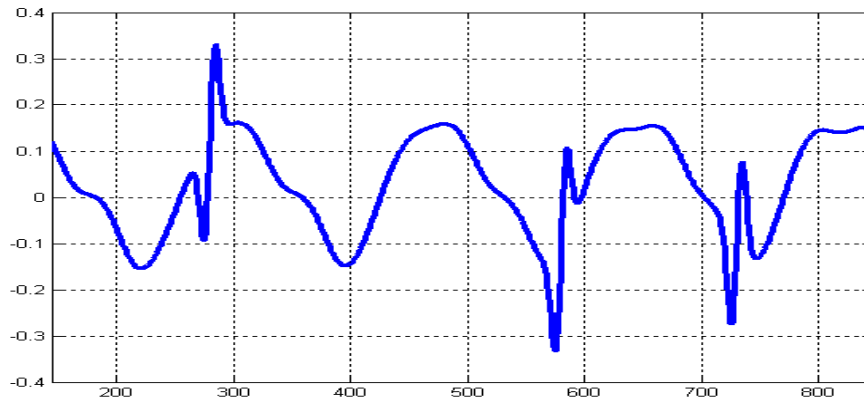


Рис. 5. Суммарный сигнал от пильгер-шума и трех дефектов с разными координатами

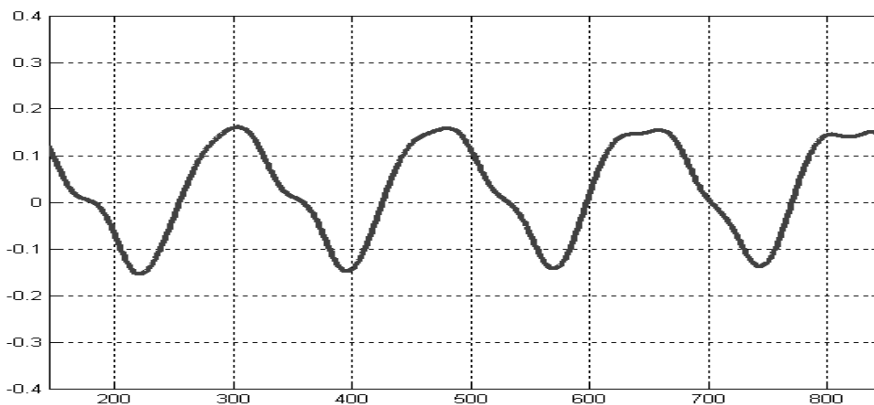


Рис. 6. Модель сигнала пильгер-шума

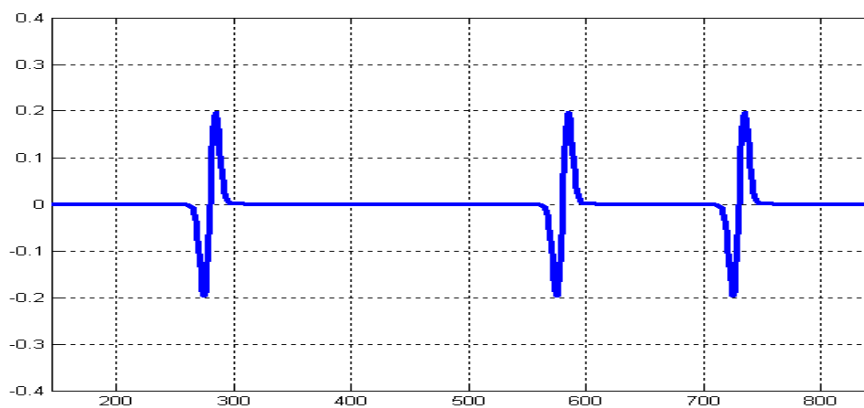


Рис. 7. Результат устранения пильгер-шума

Численные эксперименты показали, что чем больше амплитуда дефекта, тем меньше погрешность определения фазы сигнала. Для дефектов, амплитуда сигналов которых больше 0,4мВ, погрешность не превышает 3-х градусов, а в среднем составляет один градус. Для небольших дефектов (с амплитудой меньше 0,2мВ) максимальная погрешность составляет 15 градусов. Для дефектов с амплитудой от 0,2мВ до 0,3мВ максимальная погрешность 4,5 градуса, а средняя погрешность 1,7 градуса. Алгоритм включен в программное обеспечение.

3. ОТСТРОЙКА ОТ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Возможность отстройки от влияния основных конструктивных элементов (дистанционирующих и антивибрационных решеток) обусловлена постоянством их геометрических и электрофизических характеристик. Следовательно, и сигнал проходного преобразователя от этих особенностей достаточно стабилен по форме и параметрам (рисунок 8).

В большинстве случаев дефекты теплообменных труб парогенераторов АЭС развиваются не на свободных участках, а в области их контакта с дистанционирующими и антивибрационными решетками, а также в зоне развальцовки. Предложен алгоритм отстройки от влияния на вихретоковый сигнал дистанционирующих и антивибрационных решеток с целью надежного выявления возможных дефектов под ними [3].

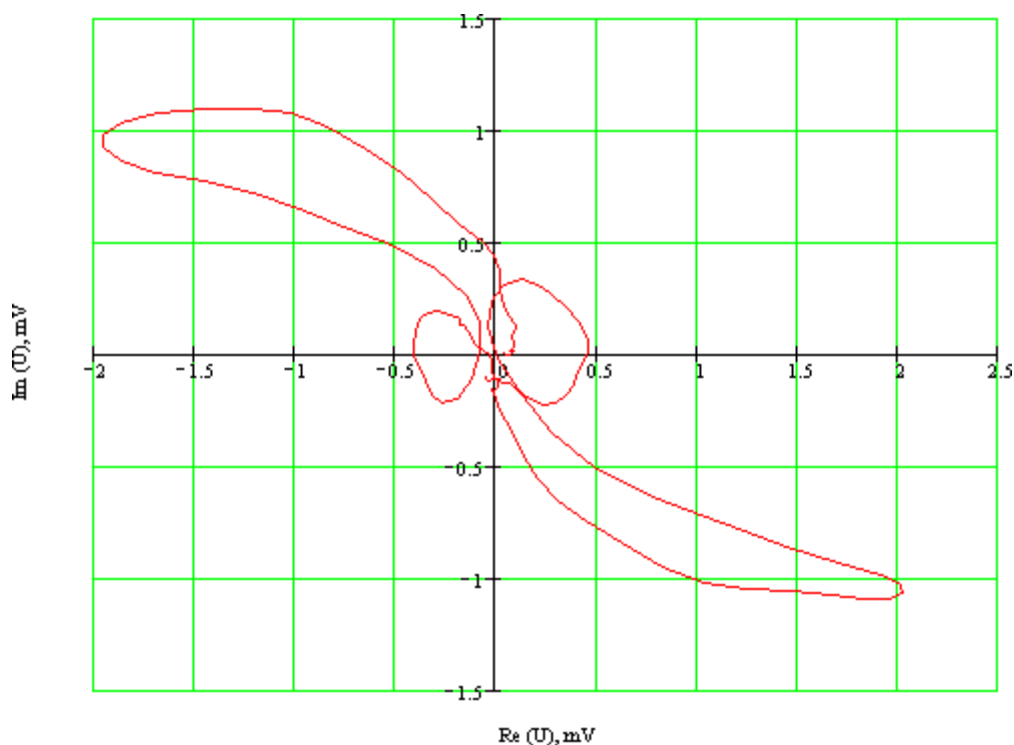


Рис. 8. Характерный сигнал от бездефектной дистанционирующей решетки

Для подавления влияния решетки строится параметрическая аппроксимирующая функция, описывающая сигнал от бездефектной решетки. При этом свободные параметры аппроксимирующей функции подбираются для каждой решетки индивидуально с помощью оптимизационного алгоритма.

В качестве аппроксимирующей выбирается функция, состоящая из простейших локализованных в пространстве функций – таких, как функция Гаусса и ее первая производная. Окончательно параметрическая функция выглядит следующим образом:

$$\dot{F}(t, x_0) = F_{re}(t, x_0) + j \cdot F_{im}(t, x_0) \quad (1)$$

$$\Psi(X_0, kw, A, \phi) = A \cdot \dot{F}\left(\frac{t}{kw}, \frac{X_0}{kw}\right) \cdot \exp(j \cdot \phi) \quad (2)$$

Здесь Ψ – комплексная параметрическая функция, аппроксимирующая сигнал от решетки; X_0 , k_w , A , ϕ – параметры аппроксимирующей функции. Подбор этих параметров проводится с помощью симплекс-метода поиска минимума целевой функции. В качестве целевой функции в данном случае выступает сумма модулей разности исходного сигнала и аппроксимирующей функции в каждой точке.

На рисунке 9 приведено сравнение действительной и мнимой компонент экспериментального сигнала и комбинации аппроксимирующих функций. Красным цветом отмечены действительные компоненты, синим – мнимые, сплошной линией построена аппроксимирующая функция, штриховой – экспериментальный сигнал.

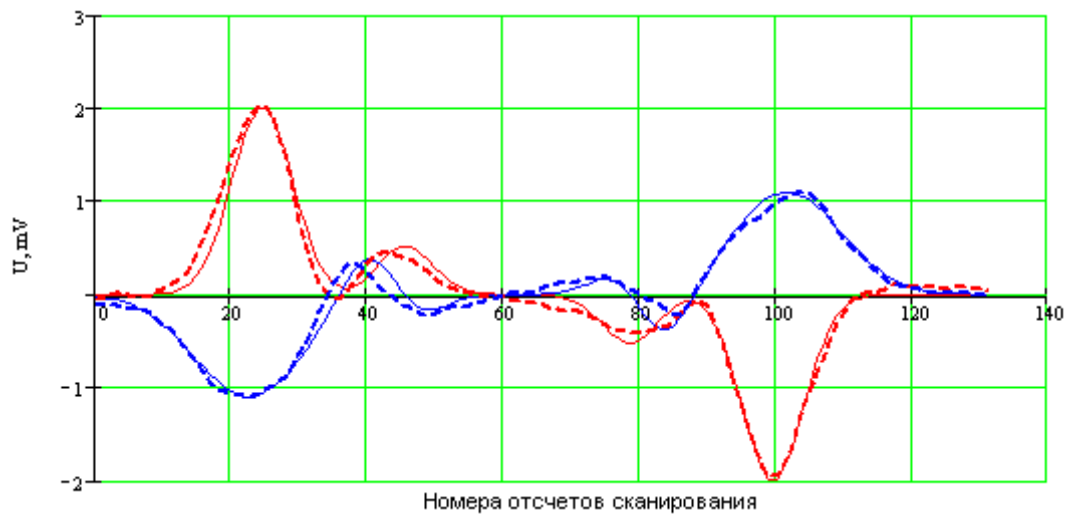


Рис. 9. Сравнение компонент экспериментального сигнала и аппроксимирующих функций

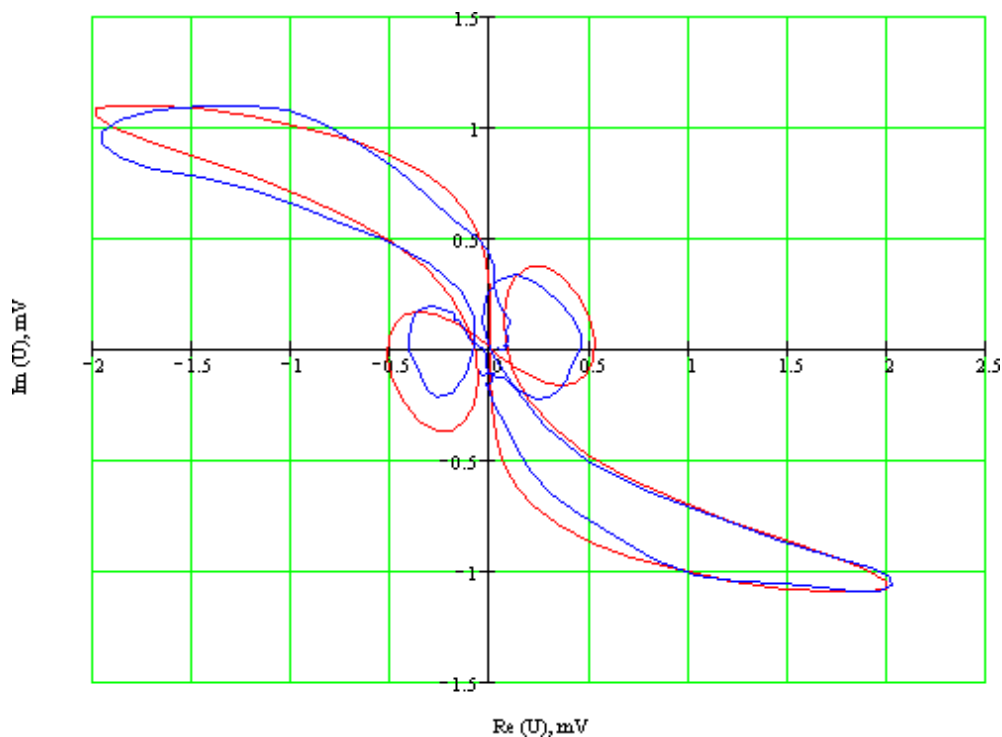


Рис. 10. Лиссажу-диаграммы экспериментального сигнала и аппроксимирующей функции

На рисунке 10 красным цветом построен годограф аппроксимирующего сигнала, синим – экспериментального.

Проверка алгоритма проводилась на экспериментальных сигналах, полученных при контроле реальных трубок парогенератора. Исследования показали, что в большинстве случаев предлагаемый метод позволяет произвести отстройку от сигнала решетки и выявить наличие дефектов. На рис.11-21 приведены результаты компенсации экспериментальных сигналов от дистанционирующих решеток как без дефектов, так и с дефектами.

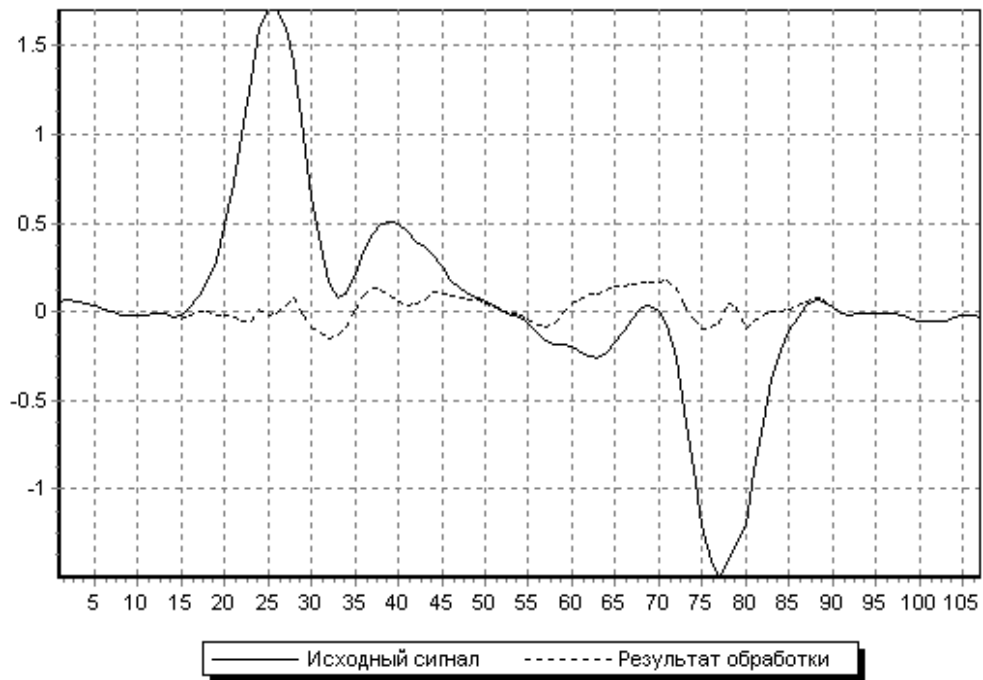


Рис. 11. Результат компенсации сигнала от решетки (без дефекта)

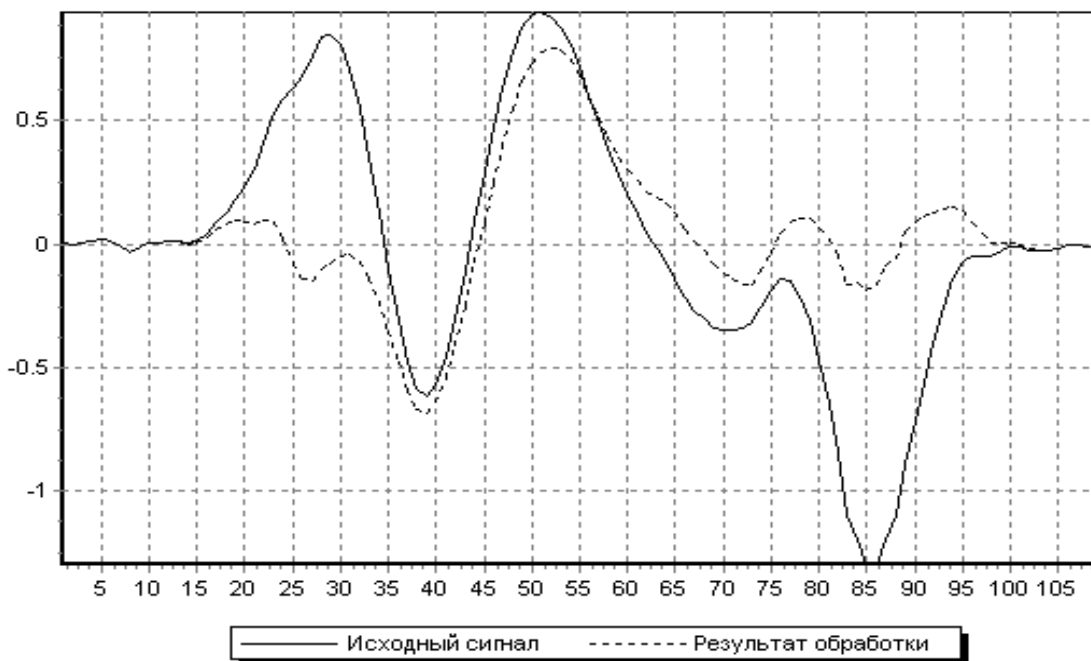


Рис. 12. Результат компенсации сигнала от решетки с дефектом

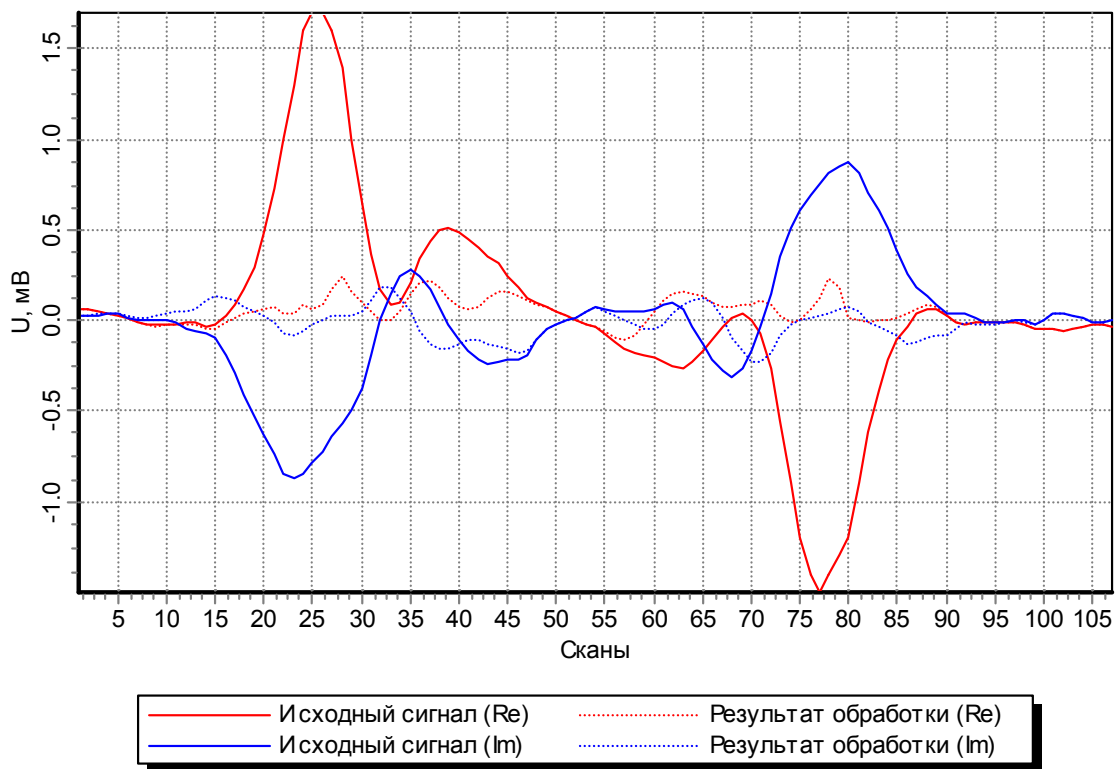


Рис. 15. Результат компенсации сигнала от решетки без дефекта

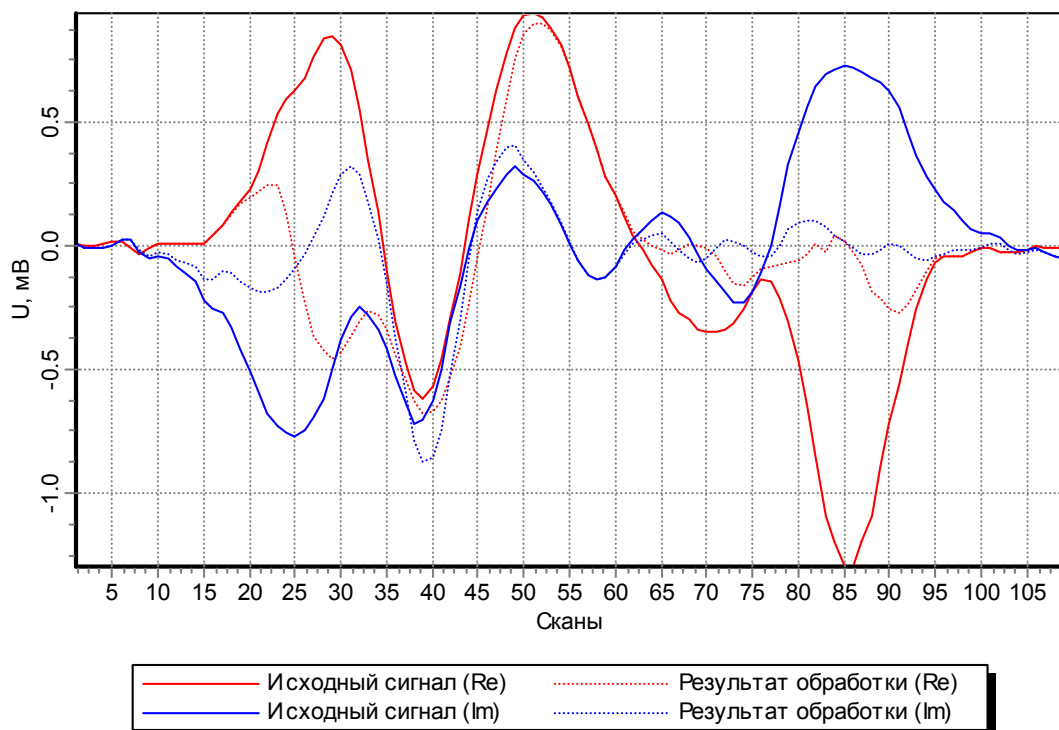


Рис. 16. Результат компенсации сигнала от решетки с дефектом

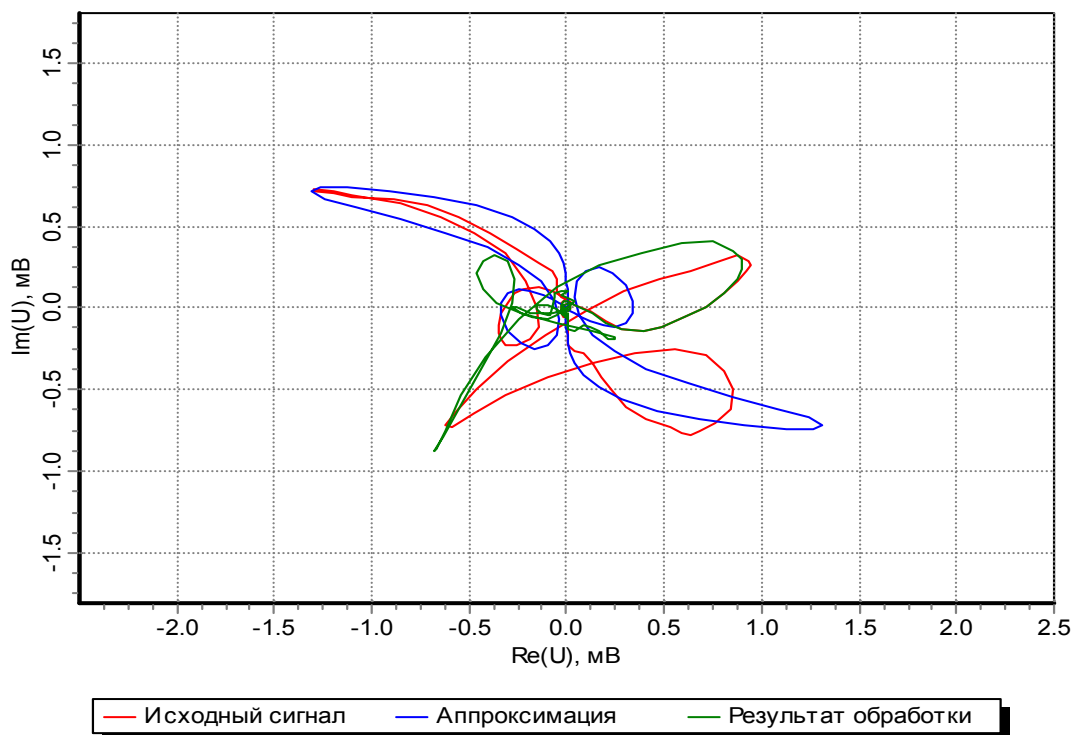


Рис. 17. Годографы экспериментального и аппроксимирующего сигналов от дистанционирующей решетки с дефектом

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты проводились на экспериментальных сигналах, полученных при контроле реальных трубок парогенератора. Исследования показали, что в большинстве случаев предложенные алгоритмы предварительной обработки вихретоковых сигналов позволяют успешно произвести отстройку от пильгершума, случайных всплесков, низкочастотного тренда, а также от сигнала дистанционирующей решетки и выявить наличие дефектов. Были проанализированы экспериментальные сигналы от 32 трубок (более 450 решеток) и выявлено 140 дефектов под решетками, из них 20 опасных (глубина которых более 70% от толщины стенки трубы), а 38 дефектов имели глубину от 40% до 70% от толщины стенки. Результаты работы алгоритмов хорошо согласуются с оценками экспертов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Siegel, "Detecting SG tube cracks in difficult places," *Inspection*, pp. 18-19, January 1996
2. M. Das, P. Ramuhalli, L. Udpa, and S. Udpa, "An Adaptive Wiener Filter Based Technique for Automated Detection of Defect Locations From Bobbin Coil Eddy Current Data", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds, Vol. 21, American Institute of Physics, pp. 639-646, 2002
3. A.G.Zhdanov, V.P.Lunin "Approximating function for suppression of unwanted signals in eddy current data", Summer School "Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering", Sozopol, Bulgary, 2005, pp. 145-150