



## Optimization of Analysis Time of Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing Signals

Yurii KUTS<sup>1</sup>, Anatoliy PROTASOV<sup>1</sup>, Iuliia LYSENKO<sup>1</sup>,  
Alexander ALEXIEV<sup>2</sup>, Oleksandr DUGIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine  
Phone: +38 044 2049547, Fax: +38 044 4068501; e-mail: [j.lysenko@kpi.ua](mailto:j.lysenko@kpi.ua)

<sup>2</sup>Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria, e-mail: [AL68@abv.bg](mailto:AL68@abv.bg)

### Abstract

The purpose of this paper has been to study the influence of the choice of time interval for analysis of the eddy current transducer signal in a pulsed mode on the signal decrement error. A method for minimizing the transducer signal decrement error was developed and presented. It included nonlinear regression analysis for estimating the signal amplitude characteristic. The confidence intervals of the transducer signal amplitude characteristics were obtained and analyzed. The obtained results of model experiments which are given in the paper confirmed the effectiveness of using the proposed method to improve the accuracy of determining the signal decrement.

**Keywords:** eddy current, transducer pulsed excitation mode, signal characteristics, amplitude value, signal decrement, error.

## Оптимизация времени анализа сигналов импульсного вихретокового неразрушающего контроля

Юрий КУЦ, Анатолий ПРОТАСОВ, Юлия ЛЫСЕНКО,  
Александр АЛЕКСИЕВ, Олександр ДУГИН

### 1. Введение

Ускоренные темпы развития информационно-измерительных технологий и методов цифровой обработки сигналов создают условия для усовершенствования методов и средств обработки информационных сигналов неразрушающего контроля. Эта общая тенденция имеет место и в вихретоковом контроле (ВТК). К числу ключевых задач последнего относятся повышение информативности и реализация режима многопараметрового контроля [1, 2]. Один из актуальных методов решения этих задач связан с использованием импульсного режима возбуждения вихревых токов [3, 4]. Его суть заключается в воздействии через вихретоковый преобразователь (ВТП) импульсным токовым сигналом на объект контроля (ОК), формировании реакции системы ВТП – ОК в виде затухающего гармонического колебания и последующей оценке параметров ОК и характеристик его материала по таким информативным параметрам сигнала ВТП, как декремент и частота собственных колебаний. Применение метода обработки сигнала ВТП на основе дискретного преобразования Гильберта позволяет получать амплитудные и фазовые характеристики этого сигнала (АХС и ФХС), что существенно упрощает последующее оценивание их информативных параметров. Процесс оценивания параметров сигналов ВТП по причине особенностей вычислительных эффектов, а также действия шумов и помех различной природы

сопровождается возникновением погрешности. Методическая составляющая погрешности определяется особенностями применяемых цифровых методов обработки сигналов и режимов получения данных [5].

## 2. Цель и задачи исследования

В работе [6] рассмотрена возможность повышения точности определения декремента сигналов импульсного ВТК в виде затухающих гармонических колебаний за счет выбора оптимального интервала времени анализа этого сигнала. Однако полный анализ влияния этого фактора не проведен. Целью работы является исследование влияния времени анализа сигнала импульсного ВТК в виде затухающего гармонического колебания на погрешность определения декремента этого сигнала.

Для рассматриваемой постановки задачи модель сигнала ВТП в общем виде может быть представлена аддитивной смесью затухающих гармонических колебаний и гауссовского шума:

$$u_{\text{ВТП}}(t) = A \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cos(2\pi f t) + u_{\text{ш}}(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (1)$$

где  $A$  – амплитудное значение сигнала ВТП,  $\alpha$  – декремент сигнала,  $f$  – частота собственных колебаний,  $t$  – текущее время,  $(t_1, t_2)$  – интервал времени анализа сигнала ВТП,  $u_{\text{ш}}(t)$  – шумовая составляющая сигнала, которая рассматривалась как реализация гауссовского случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ .

Необходимо определить декремент  $\alpha$  сигнала ВТП с использованием методов регрессионного анализа, а также оценить точность его оценивания.

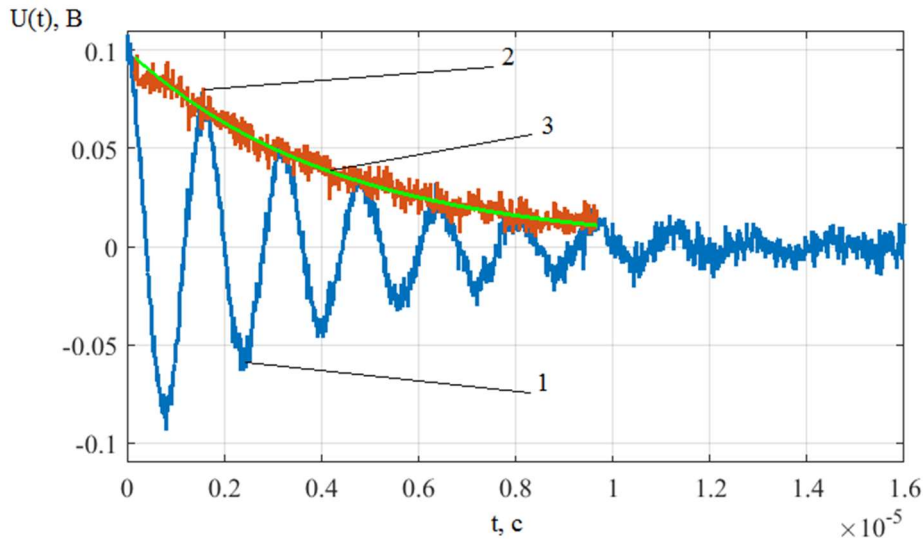
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) применить нелинейный регрессионный анализ к задаче оценивания АХС ВТП и доверительного интервала ее значений;
- 2) определить декремент сигнала ВТП с учетом оптимального времени анализа этого сигнала;
- 3) оценить погрешность определения декремента сигнала ВТП с учетом применения методов регрессионного анализа и оптимизации времени анализа сигналов ВТП.

## 3. Проведение исследования

### 3.1 Методика решения поставленной задачи

Поставленная задача решается методом моделирования, в основе которого лежит определение декремента сигнала ВТП по АХС. Для этого был сформирован сигнал вида (1) со следующими параметрами:  $A = 0.5\text{В}$ ,  $f = 620\text{ кГц}$ ,  $\alpha = 2.3 \cdot 10^5\text{ с}^{-1}$ . Период дискретизации выбран равным  $T_d = 16 \cdot 10^{-9}\text{ с}$ . В качестве шума был использован гауссовский шум. На временном интервале анализа соотношение сигнал/шум ( $A/\sigma$ ) изменялось в диапазоне от 0,5% (соответствует 60 дБ) до 10%. Фрагмент смоделированного сигнала ВТП приведен на рис. 1 (кривая 1).



**Рис. 1 – Фрагмент сигнала ВТП и его амплитудной характеристики: 1 – сигнал ВТП, 2, 3 – амплитудная характеристика сигнала и ее тренд соответственно**

Методику обработки сигнала ВТП иллюстрирует рис. 2. Она включает следующие этапы:

- 1) получение дискретной амплитудной характеристики сигнала ВТП и применение к АХС методов нелинейного регрессионного анализа (рис.1, кривые 2,3);
- 2) определение доверительных интервалов значений линии регрессии АХС и оценка границ погрешности;
- 3) определение декремента затухания сигнала ВТП в импульсном режиме по линии регрессии АХС;
- 4) определение оптимального временного интервала анализа сигнала ВТП для минимизации погрешности определения декремента затухания;
- 5) определение декремента затухания сигнала ВТП с учетом оптимального временного интервала анализа этого сигнала по линии регрессии АХС;
- 6) анализ полученных результатов.

### **3.2 Алгоритм обработки сигналов вихретокового преобразователя**

Порядок обработки информационных сигналов ВТП преобразователя с импульсным возбуждением предусматривал формирование выборки сигнала  $u_{\text{ВТП}}[j]$  и использование дискретного преобразования Гильберта для получения гильберт-образа и огибающей этого сигнала:

$$u_H[j] = \mathbf{H}[u_{\text{ВТП}}[j]]u_H[j, D, \gamma] = \mathbf{H}[u_{\text{ВСП}}[j, D, \gamma]], \quad (2)$$

$$\hat{U}[j] = \sqrt{u_{\text{ВТП}}^2[j] + u_H^2[j]}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{H}\mathbf{H}$  – оператор дискретного преобразования Гильберта;  $\hat{U}[j]$  – дискретная амплитудная характеристика сигнала.

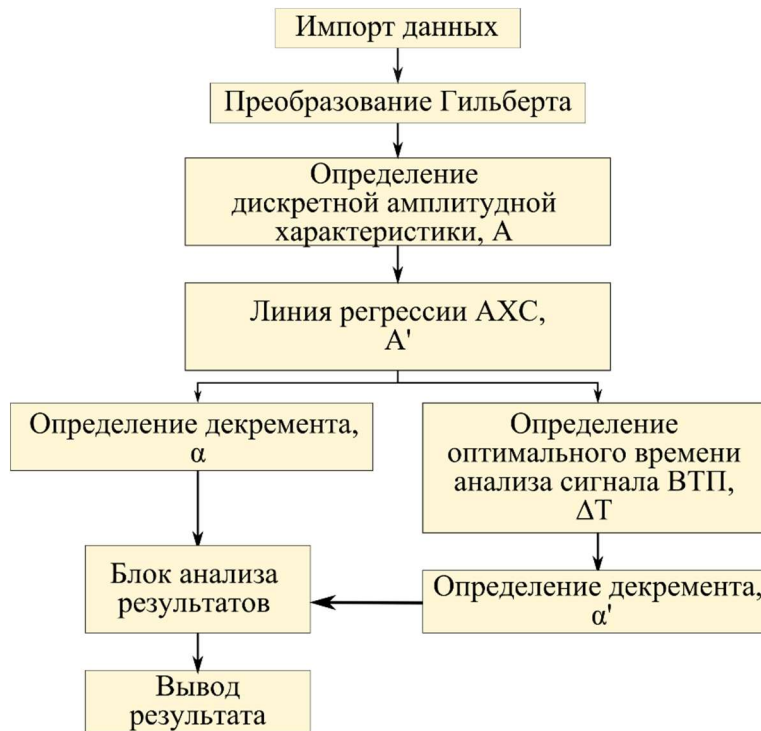


Рис. 2 – Графическое отображение методики обработки сигнала ВТП

С целью устранения влияния шумов на АХС было рассмотрено использование методов нелинейного регрессионного анализа. Принимая во внимание нелинейность АХС, и возможность ее представления экспоненциальной функцией вида  $ke^{\alpha t}$ , задача определения линии регрессии сводилась к определению линейной регрессии логарифмической функции от АХС, то есть к определению линейной регрессии функции вида [7]:

$$\ln(\hat{U}[j]) = \ln(ke^{\alpha j T_d}) = \ln(k) + \alpha j T_d. \quad (4)$$

Проведя замену и обозначив  $\ln(k) = b$ , уравнение (4) сводится к линейной функции  $y(t) = \alpha t + b$ , где текущее время  $t = t_j = j T_d$ .

Для определения линейной регрессии был выбран метод Бартлетта-Кенуя. Данный метод относительно прост и может использоваться для анализа небольших по объему выборок. В основе метода лежит упорядочивание данных по времени  $t$  и разделение полезной части выборки  $\hat{U}[j]$ ,  $j = \overline{50 \dots 600}$ , на три группы одинакового объема  $M$ . В каждой группе вычисляются суммы вида  $\sum \hat{U}[j] \sum \hat{\Phi}[j, D, \gamma] \sum \hat{\Phi}[j, D, \gamma] y_i$  и  $\sum t_j$ . Обозначим их соответственно  $\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_3, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, Y_1$  и  $t_1, t_2, t_3$ . Тогда коэффициенты линейной регрессии оцениваются соотношениями:

$$\alpha = \frac{\hat{U}_3 - \hat{U}_1}{t_3 - t_1} \tilde{\mathbf{b}} = \frac{Y_3 - Y_1}{X_3 - X_1}, \quad \text{и} \quad b = \frac{\hat{U}_2}{M} - \alpha \cdot \frac{t_2}{M}. \quad (5, 6)$$

С учетом полученных результатов было проведено оценивание погрешности определения функции  $\hat{U}(t)$  по формулам:

$$\hat{U}(t) \pm \Delta_{\hat{U}.cp}(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лин.}y}(t)} \tilde{\mathbf{b}} = \frac{Y_3 - Y_1}{X_3 - X_1} \quad \text{и} \quad \hat{U}(t) \pm \Delta_{\hat{U}}(t) = e^{y(t) \pm \Delta_{\text{лин.}y}(t)} \tilde{\mathbf{b}} = \frac{Y_3 - Y_1}{X_3 - X_1}, \quad (7, 8)$$

где  $\Delta_{\hat{U}_{cp}}(t)$  и  $\Delta_{\hat{U}}(t)$  – границы погрешности средних и индивидуальных значений огибающей, соответственно;  $\Delta_{лин.\bar{y}}(t)$  и  $\Delta_{лин.y}(t)$  – границы погрешности средних и индивидуальных значений линеаризованной функции  $y(t)$ , соответственно.

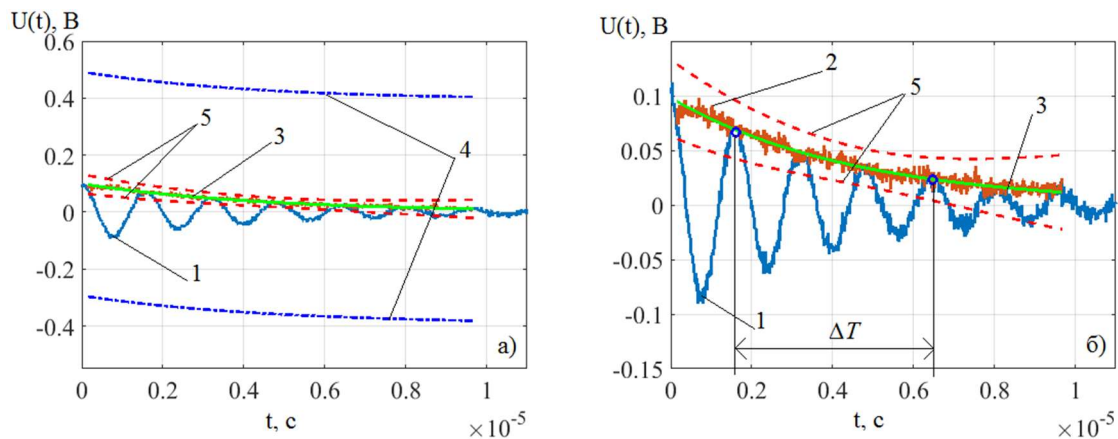
Согласно выполненным ранее исследованиям [6] установлено, что для минимизации погрешности определения информативных параметров сигнала ВСП (1) в условиях импульсного возбуждения, необходимо выбирать интервал времени анализа сигнала из условия:

$$\alpha \Delta T \approx 1,10889. \quad (9)$$

Определив время анализа сигнала ВСП  $\Delta T$ , был сделан перерасчет декремента  $\alpha'$  по формуле (5).

#### 4. Результаты и их обсуждение

Полученные результаты определения параметров нелинейной регрессии проиллюстрированы на рис. 3 (кривая 3).



**Рис. 3 – Фрагмент сигнала ВСП и графики доверительных областей регрессии для значений огибающей (1 – сигнал преобразователя, 2 – амплитудная характеристика, 3 – ее тренд, 4 – доверительная область регрессии для индивидуальных значений декремента сигнала, 5 – для средних значений декремента сигнала)**

На рис. 3 приведены графики доверительных областей регрессии для рассчитанных коэффициентов декремента сигнала ВСП с использованием тренда АХС с заданной вероятностью  $P = 0.95$ .

Из графиков видно, что с целью минимизации погрешности определения декремента сигнала ВСП целесообразно выбирать для анализа среднюю часть этого сигнала с наименьшим значением дисперсии.

Была проведена серия из 100 модельных экспериментов. Отклонение в значении декремента  $\alpha$  сигнала преобразователя, полученному по линии регрессии АХС, от заданного при моделировании не превышало 2,5%. В случае определения декремента  $\alpha$  с учетом оптимального времени анализа, погрешность не превышала 1,5 %.

## 5. Заключение

В данной работе приведены результаты исследования влияния времени анализа затухающего гармонического сигнала импульсного ВТК на погрешность определения декремента этого сигнала. По результатам моделирования установлено, что время анализа сигнала целесообразно выбирать равным или близким оптимальному времени и в средней области существования затухающего колебания. Это позволяет минимизировать погрешность определения декремента сигнала ВСП, которая при определении предложенным способом, для заданных параметров модели не превышала 1,5 %.

Полученные результаты подтверждают эффективность использования предложенного метода повышения точности определения декремента сигнала ВТП на основе определения нелинейного тренда АХС. Следует отметить, что значение декремента сигнала является очень чувствительными к воздействию помех и шумов, поэтому предложенный метод повышения точности определения декремента сигнала ВТП может быть применен для сигналов с низким уровнем отношения сигнал/шум.

## Литература

1. Тетерко А.Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А.Я. Тетерко, З.Т. Назарчук; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Львов, 2004. – 247 с.
2. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.М. Учанін; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268.
3. Adewale I. Decoupling the Influence of Permeability and Conductivity in Pulsed Eddy-Current Measurements / I.D. Adewale, G.Y. Tian// IEEE Trans. Magn. – 2013. – vol. 49, no. 3. – pp. 1119-1127.
4. Lysenko I. Pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin // Ж-л «Научные известия на НТСМ». – Болгария, 2017. – №216. – С. 114–117.
5. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: First edition. — JCGM, Switzerland, 1993. – 120 p.
6. Kuts Yu. Analysis of the signal parameters measurement uncertainty at pulsed eddy current non-destructive testing / Yu. Kuts, A. Protasov, Iu. Lysenko, O. Dugin // International Journal “NDT Days” – 2018. – Vol. 1, Iss. 4. –pp. 461-468.
7. Куц Ю. В. Статична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак – Тернопіль: Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя, 2009. – 383с.