



PULSED EDDY CURRENT NON-DESTRUCTIVE TESTING

ИМПУЛЬСНАЯ ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Yurii Kuts, e-mail: y.kuts@ukr.net, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
 Anatoliy Protasov, e-mail: a.g.protasov@gmail.com, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
 Iuliia Lysenko, e-mail: j.lysenko@kpi.ua, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
 Oleksandr Dugin, e-mail: duginos@gmail.com, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract: The article is devoted to the development of an experimental model of the information-diagnostic system of eddy current flaw detection and analysis of its work. A technique for processing experimental data and presenting the results obtained is considered. It is shown that the use of eddy current flaw detection with transducer pulsed excitation mode in combination with digital processing of information signals based on the discrete Hilbert transform can substantially supplement the known eddy current method of NDT by analyzing such signal parameters as the frequency of natural oscillations, peak amplitude value, signal decrement. The proposed technique for processing the signals of an eddy current transducer has been tested using the example of processing the eddy current flaw detection signals in problems of testing an aluminum plate with cracks of different depths.

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

1. Введение

Высокая эффективность и надежность результатов вихретокового неразрушающего контроля (ВТНК) способствует его широкому применению в различных областях науки и техники для решения задач дефектоскопии, контроля качества материалов и изделий, мониторинга характеристик объектов контроля (ОК) различного назначения. На сегодня развитие ВТНК сосредоточено на решении задач усовершенствования вихретоковых преобразователей (ВТП) [1], способов возбуждения вихревых токов в ОК [2], разработки новых методов обработки информационных сигналов ВТП [3], включая методы многопараметрового контроля.

Традиционно вихретоковая дефектоскопия (ВТД) реализуется путем возбуждения вихревых токов гармоническими сигналами одной или нескольких частот. В этом случае электрофизические характеристики материалов и геометрические параметры ОК определяются через их влияние на амплитуду и фазовый сдвиг сигнала ВТП относительно сигналов возбуждения вихревых токов [4]. Анализ информационных сигналов ВТП и интерпретация результатов контроля усложняется вследствие действия ряда мешающих факторов, среди которых наиболее опасными и трудно устранимыми являются зазор между ВТП и ОК, вариация электромагнитных свойств материала ОК, кривизна и шероховатость поверхности ОК, внешние и аппаратурные шумы, помехи различной физической природы [3].

Для расширения функциональных возможностей ВТД применяют и другие режимы возбуждения вихревых токов в ОК. Одно из направлений исследования связано с использованием импульсного режима работы ВТП и возбуждением в ОК импульсных вихревых токов [5, 6, 7]. Преимуществом такого способа реализации ВТНК является возможность существенного увеличения мощности сигнала возбуждения в импульсе и увеличения на этой основе глубины зоны контроля и чувствительности средств контроля. В известных работах был использован аperiodический режим – сигнал ВТП получали в виде

одиночного импульса, а измерению подлежали его характерные точки – амплитуда, временные интервалы, определяемые моментами пересечения сигналом ВТП некоторых выбранных уровней и т.п.

Одно из первых применений импульсных вихревых токов было связано с необходимостью повышения чувствительности ВТНК и упрощения обработки результатов контроля. В частности эксперименты с импульсным возбуждением ВТП были направлены на анализ применения этого режима работы для контроля толщины металлического покрытия на металлической основе [8, 9].

Несмотря на проведенные исследования, информационный ресурс ВТНК с импульсным возбуждением еще далеко не исчерпан. Проведенные авторами предварительные исследования показали, что перспективным направлением является исследование импульсного ВТНК с возбуждением в ОК периодических затухающих вихревых токов. В этом случае информативными параметрами сигналов ВСП являются собственная частота и декремент, которые более устойчивы к действию шумов и помех. Это обусловлено тем, что они могут быть получены на основе анализа массивов данных значительного объема, что допускает использование статистических методов их обработки.

Целью статьи является разработка и анализ экспериментального макета информационно-диагностической системы ВТД, а также разработка методики обработки экспериментальных данных и представления полученных результатов.

2. Математическая модель процессов в системе ВТП - ОК

Анализ системы ВТП - ОК с импульсным возбуждением вихревых токов показал, что в такой системе возможно возникновение собственных затухающих колебаний в контуре, образованном индуктивностью электрической катушки, ее паразитной межвитковой емкостью и активным сопротивлением [10]. С учетом этого,

система «параметрический ВТП - ОК» представляется эквивалентной схемой изображенной на рис. 1.

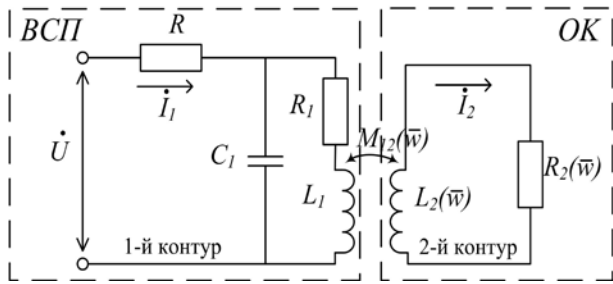


Рис. 1 – Эквивалентная схема системы «ВТП – ОК»

В этой схеме ОК представлен эквивалентным контуром $L_2(\bar{w})$ $R_2(\bar{w})$, в котором индуктивность $L_2(\bar{w})$ связана через взаимную индуктивность $M_{12}(\bar{w})$ с элементом L_1 . В приведенных обозначения \bar{w} – вектор геометрических параметров ОК и электрофизических параметров материалов ОК; сопротивление и индуктивность катушки 1-го контура обозначены соответственно R_1 , L_1 ; R – активное сопротивление схемы; \dot{U} – импульсное напряжение возбуждения преобразователя; \dot{I}_1 , \dot{I}_2 – контурные токи. Используя законы электротехники, для указанных контуров составлена система уравнений в комплексной форме:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 R + \dot{I}_1 \frac{R_1 + j\omega L_1}{1 + j\omega C_1 R_1 - \omega^2 L_1 C_1} - \dot{I}_2 j\omega M_{12}(\bar{w}) = \dot{U}, \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12}(\bar{w}) - \dot{I}_2 R_2(\bar{w}) - \dot{I}_2 j\omega L_2(\bar{w}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В случае работы ВТП в импульсном режиме необходимо учитывать переходные процессы в цепях преобразователя. Один из вариантов анализа переходных процессов основан на решении характеристического уравнения, которое для схемы на рис. 1 имеет вид [11]:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC_1} \pm \sqrt{\frac{1}{4R^2 C_1^2} - \frac{1}{L_{екв} C_1}}, \quad (2)$$

где эквивалентная индуктивность $L_{екв}$ зависит от индуктивности катушки ВТП и параметров ОК. Периодический режим работы ВТП возникает при выполнении неравенства:

$$R < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_1}}, \quad (3)$$

Из анализа корней характеристического уравнения, частота собственных колебаний ω_0 и затухание α сигнала ВТП определяются выражениями:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{екв} C_1} - \frac{1}{4R^2 C_1^2}}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC_1}. \quad (5)$$

Математическая модель информационного сигнала ВТП при этом имеет вид (рис. 2):

$$u_{ВТП}(t, \bar{w}) = U_m e^{-\alpha(\bar{w}) \cdot t} \cdot \sin[2\pi \cdot f(\bar{w}) \cdot t + v] + u_{ш}(t), \quad t \in (t_1, t_2), \quad (6)$$

где U_m – амплитудное значение сигнала ВТП, $\alpha(\bar{w})$ – декремент сигнала, $f(\bar{w})$ – частота собственных колебаний, t – текущее время, (t_1, t_2) – интервал времени анализа сигнала ВТП, $u_{ш}(t)$ – шумовая составляющая сигнала, v – начальная фаза, $v = \arctg(\alpha/\omega_0)$.

3. Разработка системы и методики обработки экспериментальных данных

3.1 Описание системы

На рис. 3 приведена структура разработанной информационно-диагностической системы импульсной ВТД. Система включает накладной трансформаторный ВТП, на первичную катушку которого поступает возбуждающий импульсный сигнал от генератора (Г), входное устройство (Вх.У.), усилитель, фильтр нижних частот (ФНЧ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровой интерфейс (ЦИ), персональный компьютер (ПК) с программно-алгоритмическим обеспечением (ПО). Синхронизация работы основных элементов системы обеспечивается ПК через ЦИ.

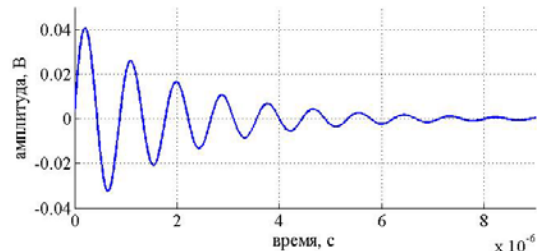


Рис. 2 – График участка сигнала ВТП

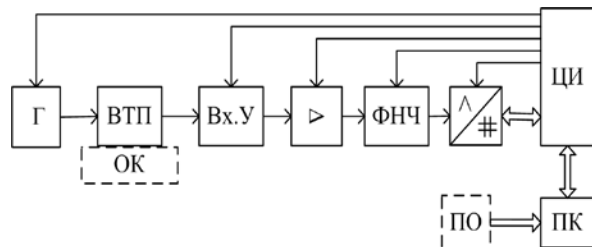


Рис. 3 – Структура ИДС ВТД

Фото экспериментального макета информационно-диагностической системы ВТД представлено на рис. 4. Разработанная система ВТД обеспечивает импульсный ($U_m \leq 30В$) и непрерывный ($U_m \leq 5В$) режимы работы ВТП параметрического, трансформаторного или мультидифференциального типов, усиление сигнала ВТП до 60дБ, фильтрацию с частотой среза до 1МГц, аналого-цифровое преобразование (АЦП 8 бит) с частотой дискретизации до 200МГц, подключение системы к ПК через USB интерфейс.

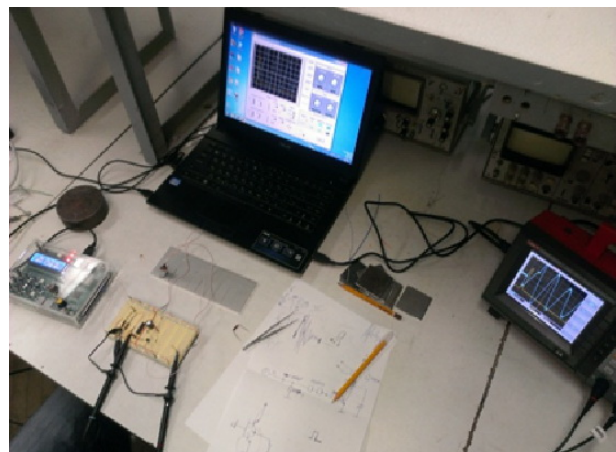


Рис. 4 – Экспериментальный макет ИДС ВТД

3.2 Методика обработки сигналов ВТП

В процессе обработки и анализа характеристик информативных сигналов ВТП для каждой выборки информативных сигналов ВТП для каждой выборки $u_{ВТП}[j, \bar{w}]$ – цифрового образа сигнала (6), $j = \overline{1, N}$,

$N = \frac{t_2 - t_1}{T_\Delta}$, T_Δ – период дискретизации сигнала в АЦП,

определяются Гильберт - образы этих выборок:

$$u_H[j, \bar{w}] = \mathbf{H}[u_{\text{втт}}[j, \bar{w}]] \quad (7)$$

где \mathbf{H} - оператор дискретного преобразования Гильберта. После этого оцениваются дискретные фазовая и амплитудная характеристики информативных сигналов (6) [12]:

$$\hat{\Phi}[j, \bar{w}] = \arctg \frac{u_H[j, \bar{w}]}{u_{\text{втт}}[j, \bar{w}]} + \mathbf{L}(u_H[j, \bar{w}], u_{\text{втт}}[j, \bar{w}]), \quad (8)$$

$$\hat{U}[j, \bar{w}] = \sqrt{u_{\text{втт}}^2[j, \bar{w}] + u_H^2[j, \bar{w}]}, \quad (9)$$

где \mathbf{L} – оператор развертывания ФХС за границы интервала однозначности функции \arctg .

Для анализа влияния характеристик ОК на сигнал ВТП, в качестве информативных параметров оценивались частота $f(\bar{w})$ и декремент $\alpha(\bar{w})$ этих сигналов. По ФХС определялась средняя частота информативных сигналов ВТП согласно формуле:

$$f(\bar{w}) = \frac{\Delta \hat{\Phi}[\bar{w}]}{2\pi \Delta T} = \frac{\Phi[N, \bar{w}] - \Phi[1, \bar{w}]}{2\pi \Delta T}, \quad (10)$$

где $\Delta \hat{\Phi}[\bar{w}]$ – накопленная за время $\Delta T = NT_\Delta$ фаза сигнала ВТП.

Использование гипотезы о линейном изменении во времени функции $\hat{\Phi}[j, \bar{w}]$ позволяет применить для ее сглаживания один из методов определения линейной регрессии, например, метод Бартлетта-Кенюя. Данный метод относительно прост и может использоваться для анализа выборок небольшого объема. В основе метода лежит упорядочивание экспериментальных данных по времени t и разделение анализируемого участка выборки $\hat{\Phi}[j, \bar{w}]$ на три примерно равные по величине группы. Для каждой группы находятся суммы вида $\sum \hat{\Phi}[j, \bar{w}]$ и $\sum t_j$.

Обозначим их соответственно Φ_1, Φ_2, Φ_3 и t_1, t_2, t_3 . Тогда коэффициенты линейной регрессии оцениваются соотношениями:

$$k = \frac{\Phi_3 - \Phi_1}{t_3 - t_1}, \quad (11)$$

$$b = \frac{\Phi_2}{M} - k \cdot \frac{t_2}{M}. \quad (12)$$

На рис. 5 приведены фрагменты фазовой характеристики сигнала ВТП (кривая 1) и ее линейный тренд (кривая 2). Как видно, применение функции сглаживания позволяет существенно снизить погрешность вычисления частоты сигнала ВТП.

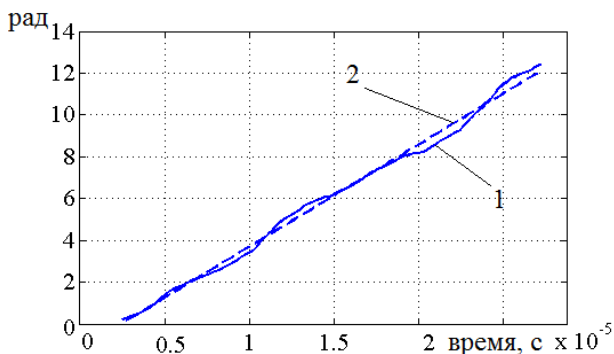


Рис. 5 – Фрагмент фазовой характеристики сигнала ВТП

Определение собственной частоты сигналов ВТП проводилось по линейному тренду функции $\hat{\Phi}[j, \bar{w}]$:

$$f_L(\bar{w}) = \frac{\Delta \hat{\Phi}_L[\bar{w}]}{2\pi \Delta T}, \quad (13)$$

где $\Delta \hat{\Phi}_L[\bar{w}]$ – накопленная за время ΔT фаза сигнала ВТП, полученная по функции линейной регрессии.

Декремент информативного сигнала ВТП определялся согласно выражению:

$$\alpha(\bar{w}) = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{\hat{U}(t_1', \bar{w})}{\hat{U}(t_2', \bar{w})}. \quad (14)$$

где $\hat{U}(t_1', \bar{w})$, $\hat{U}(t_2', \bar{w})$ – значения АХС в моменты времени t_1' и t_2' , соответственно, $t_1', t_2' \in (t_1, t_2)$. Для повышения точности определения декремента сигнала проводилась экспоненциальная аппроксимация АХС ВТП. На рис. 6 приведены фрагменты сигнала ВТП (кривая 1), его амплитудная характеристика (кривая 2) и аппроксимационная кривая (кривая 3).

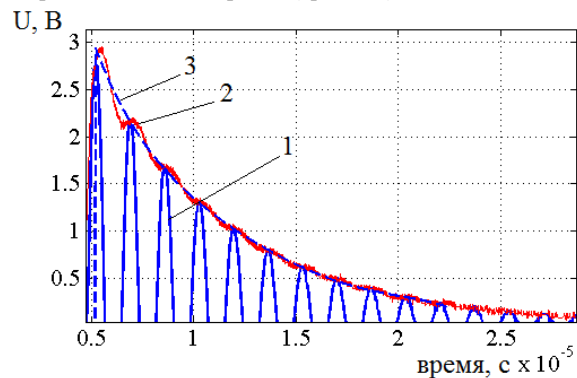


Рис. 6 – Фрагмент амплитудной характеристики сигнала ВТП

4. Обсуждение экспериментальных результатов

4.1 Описание объекта исследования

Для проверки работоспособности системы ВТД был использован контрольный образец в виде пластины из алюминиевого сплава АД31Е5. На одной из поверхностей пластины с равным интервалом методом фрезерования нанесены искусственные дефекты, имитирующие поверхностные трещины различной глубины (от 0.1 мм до 3 мм) и одинаковой ширины раскрытия (рис. 7). В процессе проверки осуществлялось сканирование пластины с шагом 1 мм.

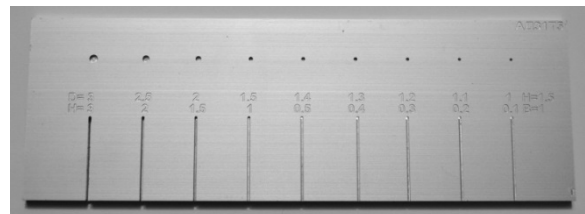


Рис. 7 – Объект исследования

4.2 Полученные зависимости

По результатам сканирования ОК получен набор сигналов ВТП, из которых были выделены максимальные пиковые значения амплитуды. Распределение пиковых значений напряжения по координатам на поверхности ОК представлено на рис. 8. Из анализа этого распределения видно, что наличие трещины в ОК приводит к существенному увеличению амплитуды напряжения в ее окрестности и уменьшению над центром трещины.

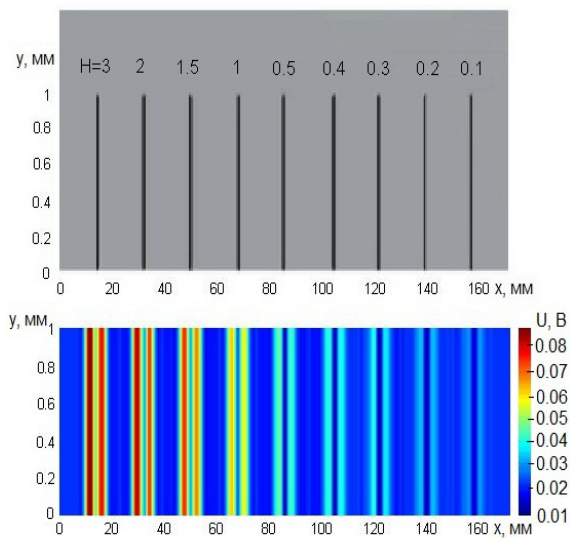


Рис. 8 – ОК (а) та розподіл на його поверхні пікових значень напруги ВСП (б)

Графики распределения пиковых значений амплитуды и частоты собственных колебаний сигнала ВТП, рис. 9 и 10, иллюстрируют зависимости этих величин от глубины поверхностных трещин.

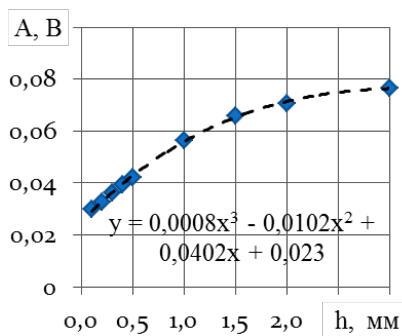


Рис. 9 – Зависимость амплитуды сигналов ВТП от глубины трещин

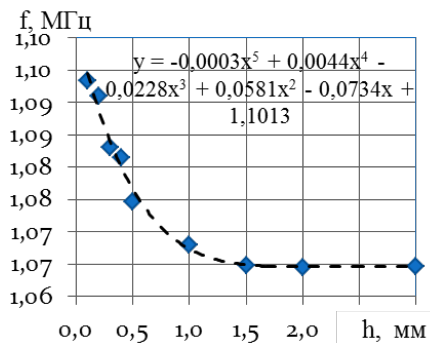


Рис. 10 – Зависимость частоты сигналов ВТП от глубины трещин

Графики на рис. 9, 10 свидетельствуют о возможности использования зависимостей $A(h)$ и $f(h)$ для оценки глубины поверхностных трещин.

7. Заключение

ВТД с импульсным возбуждением в сочетании с цифровой обработкой информационных сигналов на основе дискретного преобразования Гильберта может существенно дополнить известные методы ВТНК за счет анализа таких параметров сигналов как частота собственных колебаний, пиковое значение амплитуды, декремент сигнала.

Используя зависимость амплитуды сигналов ВТП от глубины трещины можно в некоторых случаях расширить функциональные возможности дефектоскопии за счет оценки глубины трещин. Применение методов аппроксимации амплитудной и фазовой характеристик сигналов позволяет уменьшить погрешность вычисления частоты сигнала ВТП и соответственно повысить точность оценки параметров ОК и достоверность контроля. Так, в задаче оценивания диаметра ОК предложенная методика с выделением линейного тренда ФХС позволяет уменьшить погрешность в 2 раза.

Предложенная методика обработки сигналов ВТП проверена на примере обработки сигналов ВТД в задачах контроля алюминиевой пластины с трещинами различной глубины.

8. Литература

1. Учанин В.Н. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання: [монографія] / В.Н. Учанин; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. - Львов: СПОЛОМ, 2013. - 268.
2. Johnson M. J. Pulsed eddy-current measurements for materials characterization and flaw detection. The University of Surrey, Guildford, Surrey, UK, 1997 – 153p.
3. 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.
4. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник в 2 т. / В.В. Ключев. – М.: Машиностроение, 2003. Т. 2: Вихретоковый контроль. – 2003. – 688с.
5. Cadeau T. Pulsed eddy current probe desing based on transient circuit analysis / T.J. Cadeau, T.W. Krause // Review of Quantitative NDE. – 2009. – vol. 28. – pp. 327-334.
6. Yang G. Pulsed Eddy-Current Based Giant Magnetoresistive System for the Inspection of Aircraft Structures / G. Yang, A. Tamburrino, L. Udpa, S. Udpa // IEEE Trans. Magn. – 2010. – vol. 46, no. 3. – pp. 910-917.
7. Лысенко Ю.Ю. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумовому контролі / Лысенко Ю. Ю., Куц Ю. В., Протасов А.Г., Дугин А.Л. // Вестник НТУУ «КПІ». Приборостроение : сборник научн. работ. – 2016. – Вып. 51. – С. 58–63.
8. Waidelich D.L., Coating Thickness Measurement Using Pulsed Eddy Currents. Proc. nat. Electron. Conf., 10, 500-507 (1954)
9. Методы неразрушающих испытаний. / Под ред. Р. Шарпа. М.: Мир, 1972. - 496с.
10. Lysenko I. Improvement of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing with Pulsed Mode Excitation [Electronic resource] / I. Lysenko, Y. Kuts, O. Dugin, A. Protasov // The e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – № 7, Vol. 21. – Access mode: <http://www.ndt.net>.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А.Бессонов. – М.: Высшая школа, 1966. – 776с.
12. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Ю.В. Куц, Л.М. Щербак. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383 с.