

УДК 620.179.14

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков
І.В. ТЮПА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков
А.А. ТИЩЕНКО, стажер-преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков
В.Г. ЛЕВЧЕНКО, аспірант, НТУ "ХПИ", Харьков
В.В. СКОПЕНКО, соискатель, НТУ "ХПИ", Харьков

**ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ**

Methods for estimation of parameters reliability in objects of electromagnetic not destroying control are offered taking into account regular and casual errors of computation and measurement signals in eddycurrent converter. It is shown, that the approach is applicable for defectology problems, depth control in strengthened layers and quality of welded connections.

Запропоновано методи оцінки достовірності контролю різних параметрів об'єктів електромагнітного неруйнівного контролю з урахуванням систематичних і випадкових похибок розрахунку і вимірювання вихідних сигналів перетворювача. Показано, що даний підхід можна застосувати для задач дефектометрії, контролю глибини зміцненого шару, якості зварних з'єднань.

Предложены методы оценки достоверности контроля различных параметров объектов электромагнитного неразрушающего контроля с учетом систематических и случайных погрешностей расчета и измерения выходных сигналов вихретокового преобразователя. Показано, что данный подход применим для задач дефектометрии, контроля глубины упрочненного слоя, качества сварных соединений.

Введение. При допусковом контроле качества электропроводящих изделий электромагнитным методом, объектом которого является обнаружение и идентификация дефектов, определение глубины упрочненного слоя, механической прочности сварного соединения и т.п. в результате измерения информативных параметров (амплитуды и фазы выходного сигнала вихретокового преобразователя) принимают решение о годности или негодности ОК в зависимости от того, находится ли контролируемый параметр (размер дефекта, глубина упрочненного слоя, предел прочности) в допустимых пределах. Ограничен-

ная точность измерений выходных сигналов ВТП и невозможность обеспечения идеальных условий проведения контроля зачастую приводит к ошибочным принятым решениям, т.е. к признанию годного к эксплуатации объекта негодным и наоборот. В подавляющем большинстве случаев, принятие решения возлагается на оператора, который в процессе контроля производит сравнение сигнала вихретокового преобразователя ВТП с набором эталонных сигналов (дефекты стандартных образцов, образец с установленным упрочненным слоем, сварной шов с известными механическими характеристиками) [1]. В данном случае, правильность принятого решения в основном будет зависеть от квалификации оператора и возможностью изготовления стандартных образцов. В работе [2] показано, что в качестве стандартного сигнала ВТП можно использовать семейство специально сгенерированных теоретических зависимостей амплитуды и фазы сигнала, для различных моделей контроля (дефект, упрочненный слой, качество сварного шва), большого количества контролируемых материалов и геометрии объекта контроля. В этом случае, есть возможность сравнивать реальные и модельные сигналы ВТП, оценить метрологические параметры сигналов и ввести математическое обоснование принятия решения по результатам контроля с оценкой достоверности контроля, ошибок первого и второго рода.

Цель работы – разработка метода оценки достоверности контроля параметров объекта контроля (дефект, упрочненный слой, непровар) на основании оценки погрешностей моделирования и погрешностей измерения сигнала ВТП, а также ошибок, возникающих в процессе сравнения стандартного и измеренных сигналов.

Оценка погрешности моделирования. Для оценки достоверности принятия решения по результатам контроля проведем оценку погрешностей моделирования и погрешностей измерения амплитуды и фазы сигнала ВТП. Расчет величин относительных погрешностей информационных параметров выходного сигнала ВТП в общем случае (дефект, упрочненный слой, непровар) определим с использованием методики оценки результата косвенных измерений с учетом функциональной зависимости сигналов ВТП от контролируемого параметра:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{Y'(X_1)}{Y} \Delta X_1 + \frac{Y'(X_2)}{Y} \Delta X_2 + \frac{Y'(X_3)}{Y} \Delta X_3 + \dots + \frac{Y'(X_i)}{Y} \Delta X_i \quad (1)$$

где Y – функциональная зависимость информационного параметра (активные сопротивления, индуктивности и взаимной индуктивности); $Y'(X_i)$ – частные производные по соответствующей входной величине; ΔX_i – абсолютная погрешность задания конкретного входного параметра.

Выражения для определения результирующих абсолютных погрешностей моделирования амплитуды ΔE_p и фазы $\Delta \varphi_p$ выходного сигнала ВТП согласно при доверительной вероятности 0,95 примут вид:

$$\Delta E_p = \pm E_p 1,1 \sqrt{A_1^2 \gamma_l^2 + A_2^2 \gamma_f^2 + A_3^2 \gamma_a^2 + A_4^2 \gamma_\mu^2 + A_5^2 \gamma_\sigma^2 + A_6^2 \gamma_l^2}, \quad (2)$$

$$\Delta \varphi_p = \pm \varphi_p 1,1 \sqrt{B_1^2 \gamma_l^2 + B_2^2 \gamma_f^2 + B_3^2 \gamma_a^2 + B_4^2 \gamma_\mu^2 + B_5^2 \gamma_\sigma^2 + B_6^2 \gamma_l^2}, \quad (3)$$

где $\gamma_l, \gamma_f, \gamma_a, \gamma_\mu, \gamma_\sigma, \gamma_l$ – классы точности приборов, которыми измеряют соответствующие параметры; A_1-A_6, B_1-B_6 – коэффициенты влияния при составляющих погрешностей измерения.

В процессе экспериментального контроля искомого параметра, будут возникать случайные погрешности, оценку которых будем проводить по методике обработки многократных наблюдений. В предположении о нормальном законе распределения случайных значений ЭДС и фазы выходного сигнала ВТП при контроле искомого параметра объекта контроля находится среднеарифметическое значение результата контроля амплитуды и фазы по формулам:

$$E_{p\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{pi} \quad (4)$$

$$\varphi_{p\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{pi} \quad (5)$$

Среднеквадратическое отклонение искомого параметра:

$$\sigma_E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - E_{p\text{ср}})^2 / (n-1)} \quad (6)$$

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varphi_{pi} - \varphi_{p\text{ср}})^2 / (n-1)} \quad (7)$$

Рассмотрим случай идентификации ширины дефекта по результатам сравнения теоретического и измеренного сигналов ВТП [2]. Задавшись характерными значениями классов точности приборов $\gamma_l = 0,2\%$; $\gamma_f = 0,2\%$; $\gamma_a = 0,1\%$; $\gamma_\mu = 3\%$; $\gamma_\sigma = 1\%$; $\gamma_l = 0,5\%$, проведем оценку погрешности результата моделирования выходного сигнала ВТП от дефекта шириной 1мм. Оценка абсолютных погрешностей определения амплитуды ΔE_p и фазы $\Delta \varphi_p$ выходного сигнала ВТП в данном конкретном случае составляет 1,8 мВ и 0,04 град, т.е. 9 % и 8 % по амплитуде и фазе

соответственно. Следует отметить, что неточность определения электрических и магнитных параметров ОК оказывает наибольшее влияние на результат моделирования сигнала ВТП как для бездефектной, так и для дефектной области. Для оценки случайных погрешностей контроля ширины дефекта 1 мм по измеренным значениям амплитуды и фазы выходного сигнала ВТП были проведены многократные испытания (30 опытов) образцового дефекта и выполнена соответствующая обработка, в результате которых были получены следующие значения амплитуды $E_{p\text{cp}}=19,59$ мВ, $\sigma_E=0,62$ мВ и фазы $\varphi_{p\text{cp}}=0,38$ град, $\sigma_\varphi=0,04$ град выходного сигнала ВТП.

Наличие данных погрешностей, в процессе идентификации дефектов, сравниваются смоделированные сигналы ВТП-ОК с экспериментальными значениями, то будут существовать взаимно пересекающиеся зоны неопределенности. В нашем случае разброс значений моделированного и экспериментального сигналов ВТП от одного и того же размера дефекта находится по амплитуде в зоне $\delta E = |\Delta E_p| + |\sigma E| = 2,5$ мВ и по фазе в зоне $\delta \varphi = |\Delta \varphi_p| + |\sigma \varphi| = 0,1$ град. Воспользовавшись результатами экспериментальных исследований поведения выходных сигналов вихретокового преобразователя от различных типов и размеров дефекта [2], а также с учетом метода идентификации и метрологических характеристик ВТП, построим картину распознавания размера дефекта на примере контроля ширины дефекта амплитудным и фазовым методом. На рис. 1 показаны области допустимых значений амплитуды и фазы выходного сигнала ВТП при контроле ширины дефекта (0,5; 1; 1,5 мм) при фиксированной глубине 1 мм и перпендикулярном расположении продольной оси дефекта относительно оси образца.

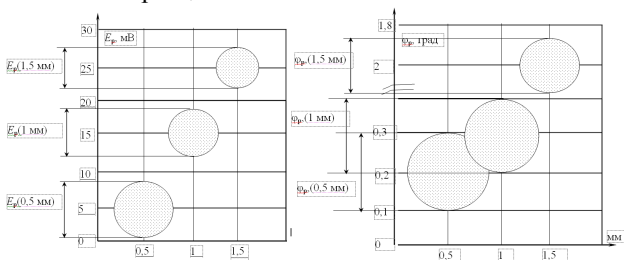


Рис 1. Область сигналов ВТП при контроле ширины дефекта.

Поскольку амплитуда и фаза выходного сигнала ВТП являются функциями от параметра дефекта, то решение о попадании дефекта в заданные границы допуска принимаются на основании:

$$E(b_{гр1}) \leq E(b_i) \leq E(b_{гр2}) ; \quad (8)$$

где $b_{гр1}$, $b_{гр2}$ – нижняя и верхняя границы допуска параметра.

$$\varphi(b_{гр1}) \leq \varphi(b_i) \leq \varphi(b_{гр2}) . \quad (9)$$

На рис. 2,а показана область $S=S1+S2$ возможных значений амплитуды сигнала ВТП для дефекта шириной 1мм. На рис. 2,б показана процедура вычисления ошибки второго рода (площадь $S2$) для случая пересекающихся зон возможных значений сигнала от двух разных дефектов.

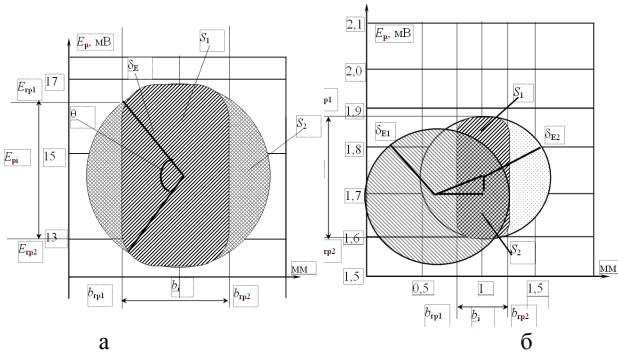


Рис. 2. Вычисление достоверности и ошибок контроля размера дефекта.

В случае контроля глубины упроченного слоя, абсолютная погрешность определения амплитуды ΔE_p и фазы $\Delta \varphi_p$ выходного сигнала ВТП в рабочей точке контроля толщины упроченного слоя образца выполненного, из материала Ст. 45 и прошедшего процесс закалки составляет 34 мВ и 4,2 град. Экспериментальные значения составляют $E_{p\text{ ср}} = 0,35$ В, $\sigma_E = 0,050$ В; $\varphi_{p\text{ ср}} = 125,3$ град, $\sigma_{\varphi} = 5,5$ град. На рис. 3 показан пример определения достоверности контроля, ошибок первого и второго рода для случая контроля глубины упроченного слоя.

Вероятность попадания искомого параметра в заданные границы допуска будет определяться соотношением:

$$P\{b_{гр1} \leq b_i \leq b_{гр2}\} = \frac{S_1}{S} P(0,95) . \quad (10)$$

Ошибка первого рода α или вероятность принятия решения о попадании искомого параметра в заданные границы допуска:

$$\alpha = 1 - P\{b_{гр1} \leq b_i \leq b_{гр2}\} = \frac{S_2}{S} P(0,95) , \quad (11)$$

где S_2 – площадь фигуры (рис. 2,а).

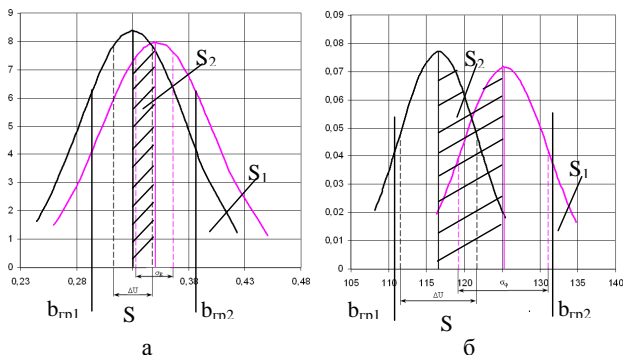


Рис. 3. Достоверность и ошибки контроля глубины упрочненного слоя.

В случае пересекающихся областей (для дефектов) рис. 2,б или неправильного выбора рабочей точки рис. 3, будет появляться ошибка второго рода β , которая вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{S_2}{S_1} P(0,95). \quad (12)$$

Вывод. Для принятия решения в задачах электромагнитного неразрушающего контроля в работе предложен метод оценки достоверности контроля различных параметров объекта контроля (дефект, упрочненный слой), основанный на сравнении результатов моделирования и эксперимента, с учетом оценки систематических и случайных погрешностей расчета и измерения. Метод позволяет оценивать достоверность попадания искомого контролируемого параметра в заданные границы допуска, и вычислять ошибки первого и второго рода.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн.: Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 2. Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Скопенко В.В., Шахин И.Х. Вероятностные подходы к определению размеров дефектов вихретоковым методом // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2011. – Ч. 2. – С. 231-234.

*Поступила в редколлегию 24.02.2012
Рецензент д.т.н., проф. Сучков Г.М.*