

УДК 621.317, 681.586

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0021

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

© 2021

**Ворох Дмитрий Александрович**, старший преподаватель кафедры «Радиотехники»  
*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева*  
(443086 г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34, e-mail: i235385@yandex.ru)

**Аннотация.** Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, является твердость и микротвердость поверхностных слоев. При этом существует потребность в методе и устройствах, которые позволяют количественно оценивать механические характеристики металла и в частности его поверхностных слоев неразрушающими и бесконтактными методами. Одно из развивающихся направлений в области неразрушающего контроля является применение вихревых токов. Вихретоковые преобразователи (ВТП) обладают рядом достоинств, которые позволяют им использоваться не только в дефектоскопии, но и в структуроскопии металлических изделий. В рамках статьи автором рассматривается математическая модель вихретокового преобразователя с частотным сканированием, которая позволяет количественно оценить свойства поверхностного слоя упрочненного металлического образца (распределение микротвердости по глубине). Математическая модель состоит из трех структурных блоков: блок, устанавливающий взаимосвязи между механическими параметрами объекта контроля (ОК) и параметрами ВТП, блок, устанавливающий взаимосвязи между параметрами полумостового ВТП и выходными напряжением и фазой, снимаемыми с этого ВТП и блок детектирования, который позволяет выделить из мгновенных значения токов и напряжений присутствующих на обмотках ВТП информационные параметры напряжения  $U$  и фазы  $\varphi$ .

**Ключевые слова:** микротвердость, твердость, вихревые токи, упрочненный слой, магнитная проницаемость, проводимость, преобразователь, датчик, неразрушающий, бесконтактный, контроль, структура.

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE EDDY CURRENT PROBES WITH FREQUENCY SCANNING

© 2021

**Vorokh Dmitry Aleksandrovich**, senior lecturer, department of Radio Engineering  
*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev*  
(443086 Samara, street Moskovskoe shosse, 34, e-mail: i235385@yandex.ru)

**Abstract.** One of the most common characteristics that determine the quality of metals and alloys is the hardness and microhardness of the surface layers. At the same time, there is a need for a method and devices that allow one to quantitatively evaluate the mechanical characteristics of a metal and, in particular, its surface layers by non-destructive and non-contact methods. One of the developing directions in the field of non-destructive testing is the use of eddy currents. Eddy current transducers (ECP) have a number of advantages that allow them to be used not only in flaw detection, but also in structureroscopy of metal products. Within the framework of the article, the author considers a mathematical model of an eddy-current transducer with frequency scanning, which allows one to quantify the properties of the surface layer of a hardened metal sample (distribution of microhardness over depth). The mathematical model consists of three structural blocks: a block that establishes the relationship between the mechanical parameters of the control object (OC) and the parameters of the ECP, a block that establishes the relationship between the parameters of the half-bridge ECP and the output voltage and phase taken from this ECP, and a detection unit that allows to extract from instantaneous values currents and voltages present on the ECP windings information parameters of voltage  $U$  and phase  $\varphi$ .

**Keywords:** microhardness, hardness, eddy currents, hardened layer, magnetic permeability, conductivity, transducer, sensor, non-destructive, non-contact, control, structure.

**Введение.** Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, является твердость [1]. Помимо понятия твердости так же часто используется понятие микротвердости, это твердость очень маленьких объемов материала, т.е. отдельных зерен, фаз, структурных составляющих сплава; поверхностных слоев (слой металла с измененными физико-механическими свойствами, структурой, фазовым и химическим составом), полученных химико-термической обработкой; гальванических покрытий; и пр. [2, 3]. При этом, одним из способов задания необходимого физико-хи-

мического состояния поверхностного слоя является упрочнение [4], причем упрочнение достаточно сильно и неоднозначно влияет на эксплуатационные свойства деталей [5-9].

В результате чего существует необходимость контроля качества упрочненного слоя после процедуры его упрочнения. Характеристики упрочненного слоя можно, в частности, определить по изменению микротвердости  $H_\mu$  по сечению детали. Классически микротвердость измеряется на косых срезах с помощью микротвердомера, но этот метод обладает рядом недостатков, главным из которых является разрушение

детали. В виду вышесказанного необходимы методы неразрушающего и бесконтактного контроля параметров поверхностных слоев. Известен ряд методов определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических [10], но наиболее выигрышным является метод вихревых токов, который основан на способности электромагнитных волн взаимодействовать с металлом и проникать в глубь металла.

Информативным параметром вихретокового метода является напряжение, вносимое в измерительную катушку вихретокового преобразователя (ВТП). Величина вносимого напряжения зависит от состава и структуры материала, частоты переменного электромагнитного поля, возбуждающего вихревые токи, параметров датчика, величины зазора между датчиком и поверхностью материала [11].

Вопросом изучения, разработки и построения датчиков и систем на основе вихревых токов для контроля различных характеристик металлов занимается коллектив авторов из Екатеринбурга [12, 13], зарубежные коллективы [14–16]. Так же необходимо отметить большой коллектив ученых, внесших существенный вклад в развитие магнитного и вихретокового методов неразрушающего контроля: Боровик С.Ю., Васин Н.Н., Дорофеев А.Л., Ключев В.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Шатерников В.Е., Шкарлет Ю.М., и др.

Анализ работ показывает, что существует потребность в методе и устройствах, которые позволяют количественно оценивать механические характеристики металла и в частности его поверхностные слои по выходным параметрам ВТП.

**Целью** статьи является разработка и исследование математической модели вихретокового преобразователя с частотным сканированием.

**Материалы и результаты исследования.** На рисунке 1 представлена разработанная обобщенная структурная схема взаимодействия объекта контроля (ОК) и ВТП, как основа математической модели ВТП с частотным сканированием.

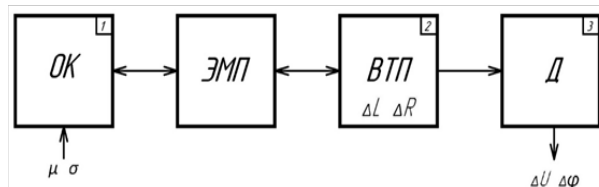


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема взаимодействия ОК и ВТП

Входными механическими параметрами являются величина микротвердости (или, например, напряжения, фазовый состав, размер зерна и т.д.). Входными электромагнитными параметрами являются магнитная проницаемость  $\mu$  и проводимость  $\sigma$  ОК. Выходные параметры системы – это изменения выходного напряжения  $\Delta U$  и изменения фазы выходного напряжения  $\Delta \varphi$ , снимаемые с детектора Д. ОК и ВТП взаимодействуют через электромагнитное поле (ЭМП).

При использовании ВТП нет необходимости в

полном или частичном разрушении ОК, так как ЭМП может проникать в ОК, поэтому достаточно взять один образец из партии и провести его исследование разрушающими и не разрушающими методами, далее внести полученные исходные данные о ОК в математическую модель преобразователя, после чего дальнейший контроль механических свойств остальных образцов из партии проводить бесконтактным неразрушающим способом.

Таким образом, алгоритм измерения микротвердости (или других механических параметров) должен состоять из следующих этапов:

1. Установка и ориентация ВТП напротив исследуемого участка ОК, с заданным зазором  $\Delta l$  между ВТП и ОК.

2. На ВТП подается переменное напряжение заданной частоты, в результате чего поле проникает в ОК на заданную глубину, где происходит интегральное взаимодействие поля ВТП и ОК, что приводит к изменению выходных параметров ВТП, эти изменения фиксируются.

3. Предыдущий пункт повторяется для заранее подготовленного набора частот, и как следствие глубин проникновения поля в структуру ОК. В результате выполнения этого пункта реализуется частотное сканирование ОК по глубине.

4. Используя результаты разрушающего контроля ОК, заранее подготовленный набор частот и результаты частотного сканирования необходимо, на основе математической модели рассчитать распределение микротвердости (или других механических параметров) по глубине ОК.

Опираясь на информацию, представленную выше, математическая модель ВТП микротвердости с частотным сканированием, можно представить следующим образом:

$$HV0, l(h) = F(U, \varphi, f) \quad (1)$$

где,  $HV0, l$  – значение микротвёрдости в Викерсах;  $h$  – глубина, на которой определяется микротвердость, м;  $U$  – амплитуда выходного напряжения преобразователя, В;  $\varphi$  – фаза выходного напряжения преобразователя, градусы;  $f$  – частота питающего напряжения, Гц.

Используя далее обобщенную структурную схему взаимодействия ОК и ВТП (рис. 1), необходимо рассмотреть все этапы нахождения информационных параметров.

Первый этап, это установление взаимосвязи между механическими параметрами ОК и параметрами ВТП. Связь электромагнитных ( $\mu$  и  $\sigma$ ) и механических параметров объекта контроля рассмотрены в [5–9, 12–16], резюмируя которые можно заключить, что электромагнитные и механические параметры ОК связаны между собой, но эта связь не имеет точных аналитических моделей, и носит математическо-эмпирический характер. Так же существует математическая модель [17, 18] связывающая магнитную проницаемость  $\mu_i$  и проводимость  $\sigma_i$   $i$ -го слоя идеально слоистого ОК с электрическими параметрами ВТП. Однако, сами по себе параметры магнитной проницаемости и прово-

димости не являются информационными в практических механических аспектах, поэтому существует необходимость предварительно установить корреляционные связи параметров ВТП с информативными механическими параметрами, например, с микротвёрдостью. При этом разработка точной аналитической модели довольно трудоёмка и сложна [19], поэтому получить искомую зависимость можно на основе экспериментальных исследований и методов статистической обработки полученных данных. Основной задачей, требующей решения при таком подходе, является установление связи между параметрами ОК, а именно микротвёрдостью  $HV0,1$  и параметрами ВТП, то есть индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $R$  [11].

Одним из возможных способов установления связи между микротвёрдостью и параметрами ВТП, является построение регрессионной модели [21-23]. Для идентификации неизвестных параметров множественной регрессии, линейно зависящей от неизвестных параметров, применим метод наименьших квадратов. Оценку адекватности построенной модели по экспериментальным наблюдениям даёт коэффициент детерминации  $R^2$ . Значимость уравнения множественной регрессии в целом оценивается общим  $F$ -критерием Фишера.

При этом необходимо отметить, что получение параметров модели взаимодействия объекта контроля с абсолютным ВТП, обязательно при измерении параметров новой партии ОК, изменении технологических операций при производстве ОК или изменении материала ОК.

Так как основной задачей работы является определение распределения микротвёрдости по глубине, то определить глубину проникновения поля ВТП в ОК можно в соответствии с [18], по формуле:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_{отн} \mu_0 2\pi f}} \quad (2)$$

где,  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость электропроводящего материала;  $\mu_{отн}$  – относительная магнитная проницаемость электропроводящего материала;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $f$  – частота питающего напряжения.

Второй этап, это разработка математической модели ВТП. В простейшем случае ВТП представляет собой одну катушку и содержит  $N$  витков – абсолютный ВТП. Эквивалентная схема замещения [25, 26] такой катушки содержит индуктивность, сопротивление потерь и ёмкость, в результате чего данная система может проявлять выраженные частотно-избирательные свойства. Абсолютные ВТП обладают рядом недостатков, которые устраняются использованием мостовых схем ВТП [27]. Мостовая схема [2, 11, 20, 28] содержит 4 катушки, вследствие чего частотные свойства мостового ВТП становятся еще более выраженными. Поэтому при проектировании ВТП для измерительных систем, где требуется перестройка частоты питающего напряжения ВТП в широких пределах (частотное сканирование), необходимо учитывать, а в некоторых случаях и формировать частотную характеристику самого ВТП.

Далее, для упрощения рассмотрения, целесообразно взять полумостовой вариант ВТП, как частный случай мостового ВТП.

Эквивалентная схема полумостового ВТП изображена на рисунке 2. Каждая катушка ВТП замещается отдельным параллельным колебательным контуром с компонентами  $L$ ,  $R$ ,  $C$  и  $R$ . Резистор  $R_3$  и  $R_4$  имитирует входное сопротивление последующего каскада и т.п. Учет емкости монтажа, межвитковой и других емкостей производится конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ . Резистор  $R_2$  соответствует сумме активного сопротивления катушки  $L_2$  на постоянном и переменном токе и вносимой добавки  $\Delta R$ , которая отражает потери энергии от протекания вихревых токов в поверхности ОК. Значение индуктивности  $L_2$  и некоторой добавки  $\pm \Delta L$ , отражающей влияние ОК на ВТП, учтены в компоненте  $L_2$ .

Комплексный коэффициент передачи эквивалентной схемы замещения полумостового ВТП, составленный на основе эквивалентной схемы обозначим  $K(j\omega)$ . Импеданс параллельного колебательного контура, образованного катушкой  $L_2$ , обозначен в математической модели как  $Z_2(j\omega)$ .

Эквивалентное сопротивление каждой катушки изображены в формулах:

$$Z_1(j\omega) = \frac{j\omega L_1 + R_1}{1 + j\omega(R_1 C_1 + \frac{L_1}{R_3}) - (\omega)^2 L_1 C_1}, \quad (3)$$

$$Z_2(j\omega) = \frac{j\omega L_2 + R_2}{1 + j\omega(R_2 C_2 + \frac{L_2}{R_4}) - (\omega)^2 L_2 C_2} \quad (4)$$

Тогда коэффициент передачи описывается формулой:

$$K(j\omega) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{Z_2(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} = Re + iIm \quad (5)$$

где,  $Re$  – это действительная часть комплексного коэффициента передачи,  $Im$  – это мнимая часть комплексного коэффициента передачи.

Решая уравнение (5) с учетом уравнений (3) и (4), определяется действительная и мнимая части комплексного коэффициента передачи, представленные ниже:

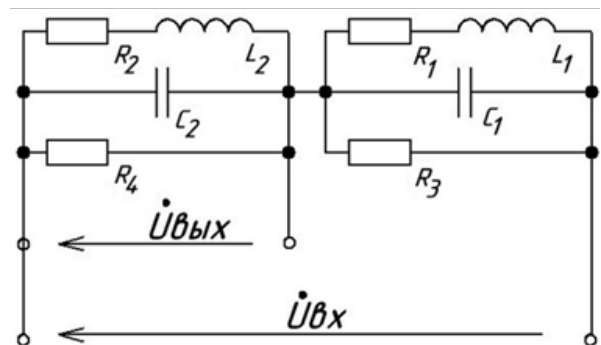


Рисунок 2 – Эквивалентная схема полумостового ВТП

$$Re = \frac{(L_2^2 \omega^2 + R_2^2 + R_4 R_2) \cdot \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)}{R_4 (L_2^2 \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[ \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) + \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right] + \omega (C_2 L_2^2 \omega^2 - L_2 + C_2 R_2^2) \cdot \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right) + (L_2^2 \omega^2 + R_2^2) \cdot \left[ \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) + \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]}$$



$$Im = \frac{\omega(C_2 L_2^2 \omega^2 - L_2 + C_2 R_2^2) \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) + (L_2^2 \omega^2 + R_2^2) \left[ \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]}{(L_2^2 \omega^2 + R_2^2 + R_4 R_2) \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right) + R_4 (L_2^2 \omega^2 + R_2^2) \left[ \left( \frac{R_1}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} + \frac{R_2}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2 + \left( C_1 \omega + C_2 \omega - \frac{L_1 \omega}{L_1^2 \omega^2 + R_1^2} - \frac{L_2 \omega}{L_2^2 \omega^2 + R_2^2} \right)^2 \right]}$$

После этого выходное напряжение  $U$  полумостового ВТП, определяется выражением

$$U = |K(j\omega)| \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad (6)$$

Фаза  $\varphi$  (аргумент) выходного напряжения полумостового ВТП, зная комплексный коэффициент передачи, определяется выражением:

$$\varphi = \arctan \frac{Im}{Re} \quad (7)$$

Для примера, подставляя конечные значения параметров полумостового ВТП ( $L_1 = 5$  мкГн;  $R_1 = 10$  Ом;  $f = \omega/2\pi = 1$  МГц;  $R_2 = 9,5$  Ом;  $R_3 = 100$  кОм;  $R_4 = 10$  кОм;  $C_1 = 6,8$  пФ;  $C_2 = 7$  пФ) в уравнения (6) и (7), получим две функции – напряжение  $U$  и фаза  $\varphi$ , в которых переменными являются 3 параметра: индуктивность измерительной катушки  $L$ , сопротивление измерительной катушки  $R$  и рабочая частота  $f$ . В данном случае рабочая частота  $f$  является постоянной величиной, так как в рамках одного измерения ее значение не меняется.

Трехмерные изображения, построенные в *Math CAD*, приведены на рисунке 3.

Анализируя рисунки 3 и 4, можно сделать несколько выводов:

1) вносимая активная добавка  $\Delta R$  слабо влияет на частотные характеристики эквивалентной схемы;

2) вносимая индуктивная добавка  $\pm \Delta L$  сильно влияет на частотные характеристики эквивалентной схемы. Из рисунка 3 следует, что существует некоторое значение индуктивности  $L_2$ , при которой на любых частотах  $|K(j\omega)|$  равен одному и тому же значению (в рассматриваемом случае он равен 0,5);

3) как следует из результатов моделирования полумостовой ВТП обладает усилительными свойствами, то есть его комплексный коэффициент передачи больше единицы;

4) существует такая частота питающего напряжения ВТП, при которой происходит линейное изменение модуля комплексного коэффициент передачи при изменении индуктивности  $L_2$  и практически отсутствует изменение аргумента. Для рассматриваемой эквивалентной схемы эта частота равна 8 МГц, изменение модуля происходит в пределах (0,1...0,9), а аргумента в пределах (2...8) градусов;

5) манипулируя значениями питающих частот можно управлять как усилительными свойствами ВТП, так и крутизной преобразования индуктивной добавки  $\pm \Delta L$ , вносимой ОК в выходное напряжение ВТП. Причем эти два процесса управления можно проводить независимо друг от друга;

6) существует возможность линеаризации характеристики преобразования зазора между ВТП – ОК в выходное напряжения ВТП при правильном выборе частоты питающего напряжения ВТП.

Таким образом, для решения задач дефектоскопии металлических поверхностей с помощью ВТП необходимо выбрать на АЧХ ВТП участок с необходимой крутизной преобразования.

Для задач структуроскопии необходимо учитывать вид АЧХ ВТП в схеме обработки данных при перестройке рабочих частот по диапазону или иметь набор переключаемых ВТП, настроенных на работу в узком диапазоне частот, где частотные свойства ВТП слабо выражены.

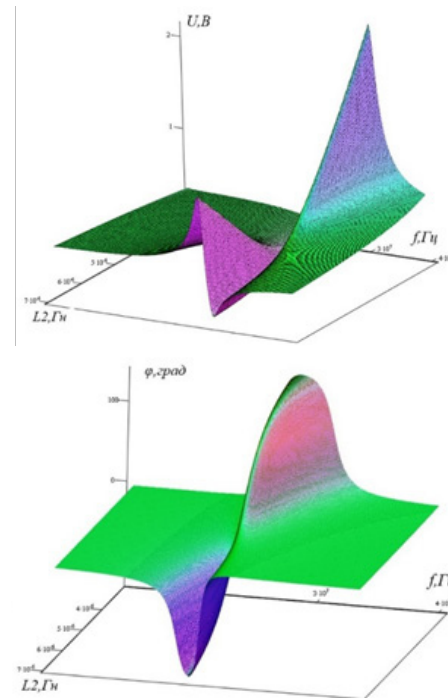


Рисунок 3 – Зависимость модуля и аргумента комплексного коэффициента передачи от индуктивности  $L_2$  и частоты  $f$

**Третий этап, детектирование.** Процедура детектирования позволяет выделить информационные параметры напряжения  $U$ , и фазы  $\varphi$ , так как именно в них и заключена информация о свойствах ОК. Наиболее простая реализация амплитудного детектора представлена в [30], однако она имеет ряд недостатков [11] и автором была предложена схема синхронного детектора [31, 32], выходное напряжение которого, для полумостового ВТП, определяется по формуле.

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{2}{\pi} (U \cos(\varphi) - U_{\text{см}}), \quad (8)$$

где,  $U_{\text{см}}$  – напряжение смещения

На основании моделей, рассмотренных выше разработана методика определения микротвердости с использованием сканирующего ВТП. Методика подразумевает несколько этапов, рассмотрим их поочередно:

1) необходимо определить марку исследуемого ОК и выяснить (экспериментальным путем или используя справочную информацию) его электрические параметры ( $\mu_{\text{отн}}$  и  $\sigma$ );

2) разрушающими методами определить искомые механические параметры ОК (значения микротвердости в упроченном слое определённые на различном расстоянии от поверхности ОК, то есть на разных

глубинах) и выявить их взаимосвязь с электрическими параметрами ВТП, а именно с индуктивностью и сопротивлением;

3) на основе разрушающего контроля определить максимальную толщину упрочненного слоя и значения глубин, на которых производились измерения микротвердости;

4) на основании (2) рассчитать значения частоты питающего напряжения, для каждой из полученных ранее глубин;

5) на основе рекомендаций, представленных в [24, 33] необходимо определить средние геометрические размеры измерительной и опорной катушки ВТП и зазор между измерительной катушкой ВТП и ОК;

6) определив экспериментально параметры ВТП ( $L_p$ ;  $R_p$ ;  $C_2$  и др.), их подставляют в аналитические выражения (6, 7) и определяют попадают ли значения из массива частот полученные в пункте 4, на участок с выраженными частотными свойствами, попавшие значения частоты исключаются из расчетов;

7) изготовленный ВТП размещается над ОК, на заданном расстоянии, которое поддерживается неизменным на протяжении всего процесса измерения;

8) на ВТП подается первое значение частоты из массива частот, и измеряется значение амплитуды выходного напряжения  $U$  (В), фазы выходного напряжения  $\varphi$  (град). Эти измерения повторяются для всех значений из массива частот с учетом рекомендаций этапа 6;

9) значение амплитуды выходного напряжения  $U$  (В), фазы выходного напряжения  $\varphi$  (град) и соответствующей им частоты  $f$  (МГц), а так же остальные параметры модели ВТП подставляются в выражения (5-7). Такие значения индуктивности  $L_2$  и сопротивления  $R_2$ , которые удовлетворяют равенству (5). Вышеуказанные действия повторяются для всего массива значений;

10) на основании данных разрушающего эксперимента (этап 2 и 3), необходимо построить и выбрать регрессионную модель (этап 1);

11) в выбранную регрессионную модель вносятся параметры  $L_p$ ,  $R_p$ , и вычисляется значение микротвердости  $HV0, I_{\text{эсп}}$  полученное на заданной частоте (и как следствие заданной глубине). В результате получается массив значений микротвердости  $HV0, I$ , экспериментально полученный на заданных глубинах.

**Заключение.** Автором статьи предложена методика определения микротвердости с помощью вихрекового преобразователя с частотным сканированием. Разработана математическая модель полумостового ВТП, предназначенного для создания вихрекового преобразователя с частотным сканированием. На основании разработанных математических моделей проведено компьютерное моделирование полумостового ВТП с учетом разработанной для него математической модели. В рамках моделирования определены основные пути влияния объекта контроля, в виде металлического образца, на выходное напряжение ВТП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Методы измерения твердости металлов URL: <http://www.knifehelp.net/media/docs/opredelenieHRC.pdf> (дата обращения: 04.04.2019)
2. Ворох Д.А., Данилин А.И. Мостовой вихрековый преобразователь и анализ его экспериментальных частотных характеристик // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Том 18, № 4 (6). – С. 1268-1271
3. Микротвердость материалов; Методические указания к лабораторной работе / Сост. Паршев С. Н., Положенко Н. Ю. / ВолГТУ, Волгоград, 2004 – 15с
4. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке: Учебное пособие /Митряев, К.Ф. Куйбышев: КуАИ, 1986, 91с.
5. В.Ф. Матюк, З. М. Короткевич, А. А. Осипов влияние структурных изменений в стали у10а при закалке от разных температур на ее квазистатические магнитные характеристики весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі № 1 2012
6. Филатов, И.А. Взаимосвязь магнитных и механических свойств стали 20ГЛ после нормализации/И.А. Филатов, К.В. Макаренко//«Новые материалы и технологии в машиностроении –2006» 5-я Междуна. науч.-техн. конф. – Брянск, 2006. – С. 108-112.
7. В. А. Сандовский, Е. М. Файншмидт Исследование магнитной проницаемости стальных образцов в однородном переменном поле при упругой деформации на растяжение изв. Вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3
8. Влияние структуры и напряженного состояния на магнитные свойства металла в различных зонах сварных труб большого диаметра физика металлов и металловедение, 2014. – том 115 – № 10. – С. 1011–1018
9. Структура и физико-механические свойства спеченных материалов системы Fe-Si, полученных из механически активированных на воздухе порошков. Физика и химия обработки материалов 2011, №5. – С.56-61
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005 г
11. Ворох Д.А., Иванова Я.А. Эквивалентная схема мостового вихрекового преобразователя//Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Самара, 16-18 мая 2017г) Самара: ООО «Офорт», 2017. – С. 58-60
12. Вихрековый контроль твердости и абразивной износостойкости высокопрочного чугуна, подвергнутого лазерной закалке и последующему отпуску / А. В. Макаров, А. Л. Осинцева, Э. С. Горкунов [и др.] // IV Российская научно-техническая конференция "Ресурс и диагностика материалов и конструкций" г. Екатеринбург, 26-28 мая 2009 г. - Екатеринбург, 2009. – С. 107.
13. Вихрековый контроль фазового состава и твердости метастабильной аустенитной стали после различных режимов наноструктурирующей фрикционной обработки А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, П.А. Скорынина и др. Дефектоскопия, № 11, 2016
14. Экспериментальные исследования механических свойств металлических изделий бесконтактным методом. Б.М. Горкунов, С.Г. Львов, А.А. Тищенко, Аббаси Жаббар Вісник НТУ «ХПИ», 2017. – 27(1249)
15. Горкунов Б. М., Тюпа И. В., Тищенко А. А. Выбор рациональных размеров катушек вихрекового преобразователя для контроля металлических изделий // Вестник НТУ ХПИ. – 2008. – №49
16. The Effect of Hardness on Eddy Current Residual Stress Profiling in Shot-Peened Nickel Alloys J Nondestruct Eval (2010) 29: 143–153
17. Соболев В. С. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов) / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
18. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
19. Распределение плотности вихревых токов в металлическом образце, возбуждаемых полем линейного тока / Г. М. Сучков [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2014. – № 44 (1087). – С. 170-175.
20. Иванова Я.А., Руденко Е.А., Садыков А.Н. Ворох Д.А. Мостовой вихрековый преобразователь перемещения и его конструктивная компоновка // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: ООО «Офорт», 2016. – С. 73-76.
21. Коломиец Л. В. Метод наименьших квадратов: метод. указания / сост.: Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.

22. Эконометрика. Парная регрессия: метод. указания к лабораторным работам / сост. А.П. Котенко, О.А. Кузнецова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2016. – 48 с.
23. Эконометрика. Множественная регрессия: метод. указания к лабораторным работам / сост. А.П. Котенко, О.А. Кузнецова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2016. – 20 с.
24. Ляченков Николай Васильевич. Вихретоковые контрольно-измерительные модули систем управления технологическими процессами: диссертация доктора технических наук: 05.13.05. – Самара, 2000. – 335 с.: ил.
25. Маркелов М.К. Разработка вихретокового преобразователя для измерения зазора // Труды Международного симпозиума: в 2-х т. «Надежность и качество – 2011». Т. 2. П.: Изд-во ПГУ, 2011. – С. 270-273.
26. В. П. Маланин, А. Д. Семенов измерение информативных параметров вихретоковых датчиков с использованием настраиваемых моделей информационные технологии в измерениях 2014. – № 4 (10)
27. Вихретоковые датчики: каталог URL: <http://rohmann.ru/pdf/Sensors.pdf> (датаобращения: 04.04.2019).
28. Данилин А.И., Ворох Д.А. Анализ частотных характеристик мостового вихретокового преобразователя перемещения // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: матер. Всерос. науч.-техн. конф. Самара: ООО «Офорт», 2016. – С. 77-80.
29. Харкевич А.А. Основы радиотехники. 3-е издание, стереотипное. — М.: Физматлит, 2007, стр. 446...450
30. Данилин А.И., Медников В.А., Чернявский А.Ж., Капустин А.С. Первичный преобразователь для реализации оптоэлектронного дискретнофазового метода измерения деформаций лопаток турбомашин // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. Т. 5. – №2. – С. 388-395.
31. Ворох Д.А., Данилин А.И., Дудкина Е.Е. Математическая модель синхронного детектора для мостового вихретокового преобразователя // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – Том 20, № 6 (2). – С. 391-394
32. Ворох Д.А., Данилин А.И., Бояркина У.В. Синхронный детектор для мостового вихретокового преобразователя // Известия Самарского научного центра РАН. — 2017. – Том 19, № 4. – С. 167-170
33. Санников Максим Анатольевич. Диагностический вихретоковый модуль для систем управления каналами газоснабжения : диссертация кандидата технических наук : 05.13.05 / Санников Максим Анатольевич; Самара, 2007. – 191 с.: ил.

*Статья поступила в редакцию 12.11.2021*

*Статья принята к публикации 07.12.2021*