

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ” (г. Харьков),
О.С. СОМХИЕВА, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ” (г. Харьков)

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

У статті розглянуто варіант включення параметричного вихорострумового перетворювача в схему моста змінного струму, що працює у невірноваженому режимі поблизу точки рівноваги. Показано, що чутливість перетворювача при безконтактному контролі електромагнітних і геометричних параметрів зразка набагато вище, а значення вихідної напруги лінійно залежить від механічних напружень.

The variant of engaging of parametrical eddy current converter switching on alternating current bridge circuit working in disbalance operation mode at a point of balance is considered. It is shown that the sensitivity of the converter under noncontact control of electromagnetic and geometrical parameters of a sample is higher and the outlet parameter value linear depends on mechanical stresses.

Постановка проблеми. Поскольку физико-химический состав, однородность материала, наличие дефектов и различные виды технологической обработки металла непосредственно влияют на его электромагнитные характеристики, то, определяя последние, можно судить о свойствах металла и его прочностных характеристиках [1]. Известно много различных методов и устройств для контроля электрических, магнитных и геометрических параметров металлических изделий [2]. Видное место среди них занимает вихретоковый метод, позволяющий бесконтактно определять такие параметры, как относительную и абсолютную магнитную проницаемость μ_r и μ , удельную электрическую проводимость σ и геометрические размеры (для цилиндрических изделий его диаметр d) [3 – 4].

Анализ литературы. В работе [5] предложен метод совместного бесконтактного измерения на переменном токе μ_r и σ цилиндрических изделий из магнитных, слабомагнитных и немагнитных материалов на основе параметрического вихретокового преобразователя. Сущность предложенного метода состоит в том, что при заданных геометрических параметрах изделия и проходного параметрического вихретокового преобразователя (ВТП), а также частоты и напряженности возбуждающего электромагнитного поля, по измеренным значениям активного сопротивления и индуктивности параметрического ВТП как с изделием, так и без, определяют нормированный магнитный поток и его фазу. Далее, используя полученные в работе универсальные функции преобразования, находят обобщенный параметр x и по приведенным выражениям вычисляют соответственно μ_r и σ (для ферромагнитных изделий) или σ и d (для немагнитных изделий). Хотя в

работе [6] и использовались высокоточные мосты переменного тока для измерения активного сопротивления и индуктивности параметрического ВТП, но и они не позволяли достичь максимальной чувствительности к изменению электромагнитных и геометрических параметров контролируемого изделия в широком частотном диапазоне изменения возбуждающего поля.

Цель статьи. Когда стоит задача разбраковки материалов, которые находятся в одной партии и изготовлены из одного материала, по их электромагнитным и геометрическим параметрам, то найти их различия по μ_r , σ и d становится затруднительным из-за малости их отличия по $\Delta\mu_r$, $\Delta\sigma$ и Δd . Аналогичная задача возникает и при контроле различных физико-механических воздействий на металлический образец [7], когда эти воздействия приводят к незначительным изменениям μ_r и σ . Все это связано с недостаточной чувствительностью вихретокового параметрического преобразователя и особенно в случаях, когда добротность преобразователя $Q \leq 1$.

Данная работа посвящена вопросам повышения чувствительности параметрического ВТП в широком частотном диапазоне изменения поля за счет включения его в мост переменного тока, который работает в неравновесном режиме вблизи точки равновесия.

Алгоритм расчетных и измерительных процедур при бесконтактном контроле электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических образцов. Если записать выражения для определения активного сопротивления и индуктивности проходного параметрического преобразователя с исследуемым образцом, который является эталонным или на который не действует механическая сила, то мы получим:

$$R_{1\varphi} = R_0 + 2\pi f L_0 \mu_r \eta K_\varphi \sin \varphi_\varphi; \quad (1)$$

$$L_{1\varphi} = L_0 [(1 - \eta) + \eta \mu_r K_\varphi \cos \varphi_\varphi], \quad (2)$$

где R_0 и L_0 – активное сопротивление и индуктивность преобразователя без образца; f – циклическая частота возбуждающего тока (частота генератора, которым запитывается мост); $\eta = \frac{d^2}{d_n^2}$ – коэффициент заполнения; d_n – диаметр обмотки преобразователя; K_φ и φ_φ – нормированный магнитный поток внутри изделия и его фаза.

Рассмотрим схему (см. рис. 1) моста переменного тока, в одно плечо которого включен параметрический ВТП с эталонным изделием (на который не действует сила растяжения или сжатия, т.е. $F = 0$).

Пока схема находится в равновесии, разность потенциалов между точками a и b равна нулю ($U_{ab} = 0$), а сопротивление $z_1 = z_{1\varphi} = R_{1\varphi} + j\omega L_{1\varphi}$. Если к образцу приложить растягивающую или сжимающую силу, то, получив механическую деформацию (при выполнении закона Гука), в образце

изменяются значения $\mu_r \pm \Delta\mu_r$ и $\sigma \pm \Delta\sigma$, а значит, изменится модуль магнитного потока в образце и его фаза, что, в конечном счете, приведет к изменению комплексного сопротивления $z_{1H} = z_{1\sigma} \pm \Delta z$, причем:

$$R_{1H} = R_0 + 2\pi f L_0 \mu_{rH} \eta K_H \sin \varphi_H; \quad (3)$$

$$L_{1H} = L_0 [(1 - \eta) + \eta \mu_{rH} K_H \cos \varphi_H], \quad (4)$$

где μ_{rH} – относительная магнитная проницаемость нагруженного образца; K_H и φ_H – нормированный магнитный поток внутри нагруженного образца и его фаза.

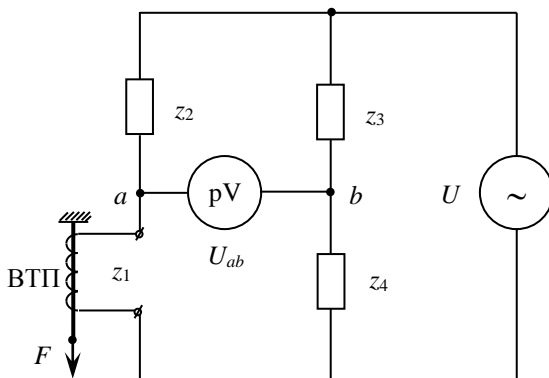


Рис. 1. Схема моста переменного тока.

В этом случае мост разбалансируется, и между точками a и b появится разность потенциалов, которую можно определить из выражения [8]:

$$U_{ab} = U \frac{z_3 \Delta z_1}{(z_{1\sigma} + z_2)(z_3 + z_4)}, \quad (5)$$

где $U = \text{const}$ – напряжение генератора синусоидального сигнала частотой f .

Если в схеме (см. рис. 1) принять $z_2 = z_4 = R$, а $z_{1\sigma} = z_3$, то выражение (5) можно переписать в виде:

$$U_{ab} = U \frac{z_{1\sigma}}{(z_{1\sigma} + R)^2} \Delta z_1. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что напряжение U_{ab} прямо пропорционально изменению Δz_1 . Известно, что чувствительность моста максимальна, если все сопротивления плеч моста приблизительно одинаковы, т.е. $z_1 \approx z_2 \approx z_3 \approx z_4$, поэтому выражение (6) справедливо можно использовать при условии $z_{1\sigma} \ll \Delta z_1$.

Для исследования поведения чувствительности параметрического ВТП, включенного в схему неравновесного моста переменного тока, были

проведены эксперименты по определению изменения U_{ab} в различных режимах работы преобразователя по частоте поля при постоянной напряженности поля и одинаковым воздействиям механической нагрузки на образец.

В эксперименте использовался проходной параметрический ВТП с параметрами: диаметр измерительной обмотки $d_n = 2,2 \cdot 10^{-3}$ м; длина преобразователя $l_n = 0,1$ м; $w = 500$ витков; $R_0 = 2,666$ Ом; $L_0 = 14,3 \cdot 10^{-6}$ Гн. Для определения изменения выходного напряжения ВТП в зависимости от механического напряжения, возникающего в цилиндрическом образце, была взята предварительно отожженная ферромагнитная проволока с параметрами: $d = 10^{-3}$ м; $\mu_r = 100$; $\sigma = 0,5 \cdot 10^7$ См/м. Напряженность электромагнитного поля поддерживалась постоянной и равной 50 А/м, что соответствует начальному (линейному) участку кривой намагничивания. При этом частота зондирующего поля изменялась в широком диапазоне и определялась из выражения:

$$f = \frac{2x^2}{d^2 \mu_0 \mu_r \sigma \pi}, \quad (7)$$

где x – обобщенный параметр, который изменялся в диапазоне от 0 до 10 с шагом $\Delta x = 0,5$.

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость изменения напряжения U_{ab} при нагружении проволоки гири весом в 5 кг, полученная для различных значений x (частоты поля).

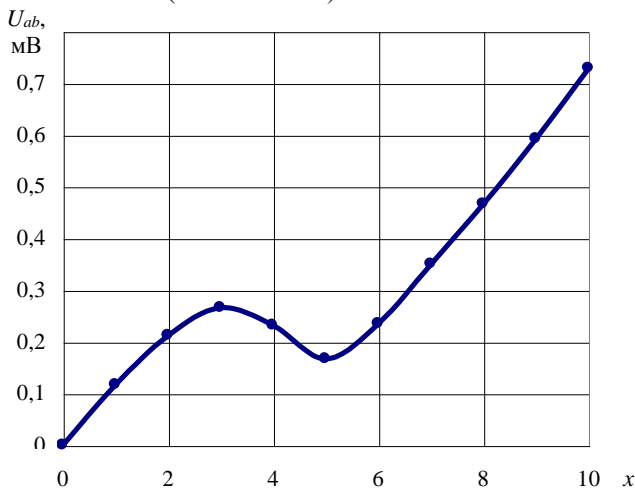


Рис. 2. Экспериментальная кривая зависимости выходного напряжения ВТП с нагружаемым образцом.

В работе также была построена модель ВТП с образцом, у которого переменными являлись электромагнитные и геометрические параметры, и проведены теоретические исследования по определению чувствительности ВТП при дискретном изменении электромагнитных и геометрических параметров исследуемого образца в диапазоне $\pm 10\%$ от их значения в каждой фиксированной рабочей точке по x .

В таблице 1 приведены расчетные значения приращений напряжения U_{ab} в зависимости от изменения соответствующего параметра образца в широком частотном диапазоне.

Таблица 1

x	$\frac{\partial U}{\partial \mu_r}, мВ$	$\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{мВ \cdot м}{См}$	$\frac{\partial U}{\partial d}, \frac{мВ}{м}$
1,0	0,4628	0,04896	0,09717
1,5	1,152	0,2064	0,3886
2,0	1,841	0,3639	0,6801
2,5	1,956	1,061	2,148
3,0	2,071	1,759	3,615
3,5	2,349	2,139	4,482
4,0	2,627	2,519	5,348
4,5	3,044	2,779	5,891
5,0	3,460	3,039	6,433
5,5	3,827	3,372	7,113
6,0	4,194	3,705	7,793
6,5	4,535	4,065	8,549
7,0	4,875	4,424	9,305
7,5	5,219	4,776	10,15
8,0	5,563	5,128	11,00
8,5	5,909	5,476	11,50
9,0	6,255	5,823	12,00

Как известно [9], мост переменного тока в неравновесном режиме позволяет определить зависимость $U_{ab} = f(\Delta z_1)$, но не дает возможности определить знак изменения искомого параметра, если не использовать фазочувствительные вольтметры, которые сразу усложняют задачу построения прибора для контроля механических напряжений или сортировку деталей по их геометрическому размеру (диаметру). Если использовать теорему подобия для проникновения электромагнитного поля в проводящую среду, то можно записать [10]:

$$\mu_1 \sigma_1 d_1 f_1 = \mu_2 \sigma_2 d_2 f_2 = \mu_n \sigma_n d_n f_n. \quad (8)$$

Из этого равенства видно, что для любых двух состояний проводящей среды всегда можно найти такое значение частоты зондирующего поля, при котором это равенство будет справедливо, а из выражения (7) следует, что как бы не изменялись параметры μ , σ и d , обратным изменением частоты можно добиться равенства (8), т.е. если изменения μ , σ и d имели знак "+", то изменение частоты при этом будет иметь знак "-" и, наоборот, причем не нужно добиваться полной компенсации, а необходимо только зафиксировать движение стрелки вольтметра.

Выводы. Таким образом, на основе рассмотренного включения проходного параметрического ВТП в схему моста переменного тока, работающего в неравновесном режиме вблизи точки равновесия, возможно построение достаточно простых высокочувствительных индикаторов с линейной шкалой для бесконтактного контроля механических напряжений, возникающих в металлических конструкциях, а также проведение разбраковки цилиндрических образцов по их диаметру (при их незначительном отличии).

Результаты работы могут использоваться при контроле давления в трубах охладительных установок, где необходимо контролировать одновременно и само давление и диаметр трубы, так как в процессе безаварийной эксплуатации необходимо знать механическое напряжение, возникающее в стенке трубы, которое зависит от давления и сечения трубы.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практическое пособие / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с. **2.** Машиностроение. Измерения, контроль, испытания. – Т.Ш-7 / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.М. Филинов и др. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1996. – 464 с. **3.** Герасимов В.Г., Останин Ю.Я., Покровский А.Д. и др. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. – М.: Энергия, 1978. – 215 с. **4.** Дорофеев А.Л., Казанов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с. **5.** Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П. К оценке погрешностей проходного вихретокового преобразователя при многопараметровых измерениях // Дефектоскопия. – 1984. – № 6. – С. 84-89. **6.** Горкунов Б.М., Себко В.П., Тодоров Е.И. Вихретоковый параметрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. – 1985. – № 5. – С. 63-68. **7.** Себко В.П., Горкунов Б.М., Москаленко И.И., До Дык Нгуен. Амплитудный и фазовый методы измерения механических напряжений в проводящих изделиях // Материалы Международной научно-технической конференции "Компьютер, наука, технология, образование, здоровье". – Харьков-Мишкольц (Венгрия). – Ч.1 – 1995. – С. 174. **8.** Электрические измерения / Под ред. А.В. Фремке, Е.М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с. **9.** Электрические измерения: Учебное пособие для ВУЗов / Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат, 1975. – 416 с. **10.** Неразрушающий контроль металлов и изделий / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

Поступила в редакцию 21.05.04