

УДК 620.179.14

Гармаш Андрій Станіславович, здобувачНаціональний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002. Тел. +38-050-364-09-18. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0002-8175-858X)**Авраменко Олександр Анатолійович**, канд. техн. наук, доц., доцентНаціональний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002. Тел. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3833-1713)**Горкунов Борис Митрофанович**, д-р. техн. наук, проф., професорНаціональний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002. Тел. +38-057-707-69-34. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0002-8175-858X)**Львов Сергій Геннадійович**, канд. техн. наук, доц., доцентНаціональний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002. Тел. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3830-0570)**Шахин Ісаам**, канд. техн. наук, доц., доцентНаціональний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна, вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002. Тел. +38-050-303-53-52. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПО ЧАСТОТІ ЗБУДЖУЮЧОГО ПОЛЯ

На підставі проведеного аналізу стану питання по безконтактному контролю фізико-механічних параметрів трубчастих і листових виробів визначені основні напрями і задачі підвищення точності і чутливості електромагнітних первинних перетворювачів. Спираючись на теорію роботи з диференційно-включеними датчиками, отримано співвідношення для оптимальної частоти намагнічуючого поля з метою отримання максимальної чутливості при контролі товщини стінки трубчастих виробів. Визначено гранично припустимі значення вихідної товщини виробу. Проведено експериментальні дослідження на реальних виробках з труб нафтогазового сортаменту.

Ключові слова: електромагнітний метод, перетворювач з магнітопроводом, напруженість магнітного поля, товщина виробу.

Гармаш Андрей Станиславович, соискательНациональный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002. тел. +38-050-364-09-18. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua**Авраменко Александр Анатольевич**, канд. техн. наук, доц., доцентНациональный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002. тел. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3833-1713)**Горкунов Борис Митрофанович**, д-р. техн. наук, проф., профессорНациональный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002. тел. +38-057-707-69-34. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0002-8175-858X)**Львов Сергей Геннадиевич**, канд. техн. наук, доц. доцент.Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002. тел. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3830-0570)**Шахин Исаам**, канд. техн. наук, доц., доцентНациональный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002. тел. +38-050-303-53-52. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПО ЧАСТОТЕ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ПОЛЯ

На основании проведенного анализа состояния вопроса по бесконтактному контролю физико-механических параметров трубчатых и листовых изделий определены основные направления и задачи повышения точности и чувствительности электромагнитных первичных преобразователей. Опираясь на теорию работы с дифференциально-включенными датчиками, получено соотношение для оптимальной частоты намагничивающего поля с целью получения максимальной чувствительности при контроле толщины стенки трубчатых изделий. Определены предельно допустимые значения исходной толщины изделия. Проведены экспериментальные исследования на реальных изделиях из труб нефтегазового сортамента.

Ключевые слова: электромагнитный метод, преобразователь с магнитопроводом, напряженность магнитного поля, толщина изделия.

Garmash Andrey S., postgraduate

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine, *str. Frunze, 21, Kharkov, 61002.*

Tel. +38-050-364-09-18. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Avramenko Alexander A., Ph.D., assoc. prof., associate professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine, *str. Frunze, 21, Kharkov, 61002.*

Tel. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3833-1713)

Gorkunov Boris M., Sc.D., prof., professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine, *str. Frunze, 21, Kharkov, 61002.*

Tel. +38-057-707-69-34. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0002-8175-858X)

Lvov Sergey G., Ph.D., assoc. prof., associate professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine, *str. Frunze, 21, Kharkov, 61002.*

Tel. +38-057-707-69-34. E-mail: lsg@kpi.kharkov.ua (orcid.org/0000-0003-3830-0570)

Isaam Shahin, Ph.D., assoc. prof., associate professor

National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkov, Ukraine, *str. Frunze, 21, Kharkov, 61002.*

Tel. +38-050-303-53-52. E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

OPTIMIZATION OF WORK OF THE ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER ON FREQUENCY OF THE EXCITING FIELD

The main directions and the problem of increasing the accuracy and sensitivity of the primary electromagnetic transducers, which based on the analysis of the issue on noncontact control of physical and mechanical properties of tubular and sheet products, are identified. The ratio for the optimal frequency of the magnetizing field in order to maximize the sensitivity of the control when the wall thickness of the tubular products using the theory of differential-enabled sensors is obtained. Experimental researches on real products of oil and gas pipes are made.

Keywords: *electromagnetic method, the transducers with a magnet core, the magnetic field strength, the thickness of the product.*

Введение

Много работ посвящено электромагнитным методам и устройствам бесконтактного контроля геометрических параметров, структуры и динамического состояния металлических конструкций [1–3]. Основными элементами таких устройств являются намагничивающая и размагничивающая системы [4], которые достаточно громоздки и требуют больших энергозатрат. При использовании магнитометрических методов для неразрушающего контроля структуры и геометрии ферромагнитных изделий необходимо проводить анализ электромагнитных характеристик материалов. Получение полезной информации в таких системах осуществляется с помощью индукционных, феррозондовых и холловских первичных преобразователей [2], что в значительной степени усложняет реализацию системы в конструктивном, аппаратном и эксплуатационном направлении. Среди многообразия накладных преобразователей выделяются электромагнитные датчики с ферромагнитным сердечником, имеющим воздушный зазор. При помещении такого датчика на исследуемое изделие последнее, перекрывая зазор, замыкает магнитный поток магнитопровода. При этом, изменение магнитного потока в зазоре несет информацию о физических свойствах, толщине, химическом составе изделия. Основное достоинство указанных преобразователей состоит в высокой чувствительности, поскольку сконцентрированный в зазоре магнитный поток может достигать значительных величин по сравнению с потоками других накладных датчиков при тех же значениях возбуждающих ампер-витков. Кроме того, в преобразователях с магнитопроводом накладного типа, для достижения высокой чувствительности, ограничения на габариты возбуждающей обмотки являются менее жесткими по сравнению с требованиями к размерам преобразователей без сердечников. Следует отметить, что существующие преобразователи с магнитопроводом применимы для контроля изделий только одного типоразмера.

Целью данной работы является определение максимальной чувствительности электромагнитного устройства по частоте питающего тока при контроле толщины изделия, а также определение ограничения на наибольшую исходную толщину контролируемого изделия.

Основная часть

На величину выходных параметров устройства для измерения изменений толщины изделий могут оказывать существенное влияние различные факторы: соотношение

геометрических размеров датчиков и изделия, частота намагничивающего тока, степень идентичности датчиков, материал магнитопроводов, изменение удельной электрической проводимости σ , величина воздушного зазора между преобразователем и изделием. В работе [5] описано устройство, содержащее два идентичных трансформаторных датчика, включенных по дифференциальной схеме. Такое устройство применимо для измерения толщины трубчатых либо листовых изделий.

Естественно, для того, чтобы измерять толщину изделия, необходимо полностью его промагнитить. С этой точки зрения, глубина проникновения магнитного поля δ должна быть больше толщины изделия a . Однако случай $\delta \gg a$ приводит к значительному снижению чувствительности преобразователя. Оценки показывают, что достаточно высокая чувствительность устройства достижима при условии $0,3 \leq a/\delta \leq 0,77$. При этом необходимо обеспечить выполнение ограничений на соотношение геометрических размеров магнитопровода П-образного типа и изделия, связанных с распространением магнитного поля в изделии и за ним ($c \geq d$, $d = a + a_1$, здесь d – ширина полюса магнитопровода, c – расстояние между полюсами, a и a_1 – толщины изделия и слоя воздуха за изделием, ограничивающие магнитные потоки). Увеличение толщины магнитопровода b приводит к росту чувствительности устройства, однако, существует ограничение и на этот размер, связанное с требуемой площадью контролируемого участка изделия, соприкасаемой с рабочей поверхностью магнитопровода.

Даже из физических соображений ясно, что рассматриваемый электромагнитный преобразователь должен иметь оптимальный режим работы по такому параметру, как частота намагничивающего тока (или возбуждающего магнитного поля). Действительно, при низких частотах ($\delta \gg a$) чувствительность устройства мала. Та же ситуация должна наблюдаться и при высоких частотах, когда $\delta \ll a$ (сильное влияние скин-эффекта). Отсюда следует, что существует такой частотный диапазон, при котором чувствительность датчика к изменению толщины будет максимальной.

Достаточно простое приближенное соотношение для расчета оптимальной частоты преобразователя по величине наибольшей относительной чувствительности к изменению толщины изделия можно получить из выражения для ЭДС вторичной обмотки дифференциально включенного датчика [5], при условии $a/\delta < 1$. В этом случае

$$f_{opt} = \frac{9}{64\pi a^2 \mu_0 \mu_r \sigma}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа;

μ_r – относительная магнитная проницаемость изделия.

Из формулы (1) следует, что в зависимости от материалов используемого магнитопровода и изделия существуют определенные ограничения на минимальную толщину эталонного образца a . Если применять в качестве материала магнитопровода феррит, то даже при малой исходной толщине изделия измерения на оптимальных частотах не представляют особых трудностей. К примеру, при $a = 0,2$ мм для медного листа $f_{opt} \approx 16$ кГц. В случае использования шихтованного магнитопровода, набранного из ферромагнитных пластин, существует максимальное значение частоты, при которой еще не сильно выражен поверхностный эффект в отдельных пластинах магнитопровода. Таким образом, существует верхний предел по частоте для шихтованного магнитопровода, который зависит от толщины и материала используемых пластин. Например, для пластин, выполненных из электротехнической стали с толщиной 0,35 мм каждая, наибольшая частота составляет 4-5 кГц. Если принять эту частоту в качестве оптимальной, то из выражения (1) следует ограничение на минимальный размер исходной толщины изделия. К примеру, для медного изделия ($\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ См/м) и частоте 5 кГц $a_{min} = 0,35$ мм, а для изделия из алюминиевого сплава ($\sigma = 1,72 \cdot 10^7$ См/м) $a_{min} = 0,6$ мм. Следует отметить, что ограничение на наибольшее значение исходной толщины изделия a связано с требуемым отношением полезного сигнала к сигналу небаланса E_n двух датчиков, помещённых на идентичные

изделия. В практически важном случае $\Delta a/a_1 \ll 1$ наибольшую исходную толщину изделия можно определить из выражения:

$$a \leq \delta - \frac{\delta^2 \frac{\Delta E}{\Delta a E_n} E_n}{\sqrt{2d\omega W_2 H_0 \mu_0 b}}, \quad (2)$$

где H_0 – напряженность возбуждающего поля.

Порядок вычисления этой величины следующий. Измерив значение сигнала небаланса E_n и считая, что полезный сигнал ΔE должен превышать величину E_n , хотя бы на порядок, можно определить a , которое соответствует минимальным заданным изменениям толщины Δa .

Можно также ввести ограничение на наибольшее изменение толщины Δa . В этом случае предельно допустимая величина Δa связана с погрешностью разложений. Простую оценку такой погрешности можно получить из соотношения

$$\frac{\Delta a}{\delta} = \pm \frac{\beta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 + \beta}, \quad (3)$$

где β – задаваемая погрешность разложения; верхний и нижний знаки соответствуют уменьшению и увеличению толщины изделия.

Например, при $\beta = 3\%$ величины допустимых относительных приращений $\Delta a/\delta$ толщин изделий составляют 0,19 и 0,16 при уменьшении и увеличении толщины a , соответственно.

Для экспериментального определения чувствительности устройства по частоте питающего тока применялись датчики с параметрами: $W_1 = 810$; $W_2 = 4000$; $d = 14 \cdot 10^{-3}$ м; $c = 14 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 19,8 \cdot 10^{-3}$ м (где W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток датчика). Измерения проводились при величине намагничивающего тока 0,08 А. Средняя напряженность магнитного поля составляла 4960 А/м. В качестве образцов выбирались трубчатые изделия из сплава Д16 с величиной $\sigma = 1,72 \cdot 10^7$ См/м. Трубчатые изделия имели наружный диаметр $D = 0,146$ м. При измерении приращений толщин преобразователи предварительно балансировались на эталонных изделиях с толщинами a . Точность изготовления образцов составляла 0,5 %.

На рис. 1а, б приведены экспериментальные зависимости чувствительности устройства от частоты питающего тока f для случая уменьшения (рис. 1а) и увеличения (рис. 1б) толщины исследуемого изделия относительно образцового.

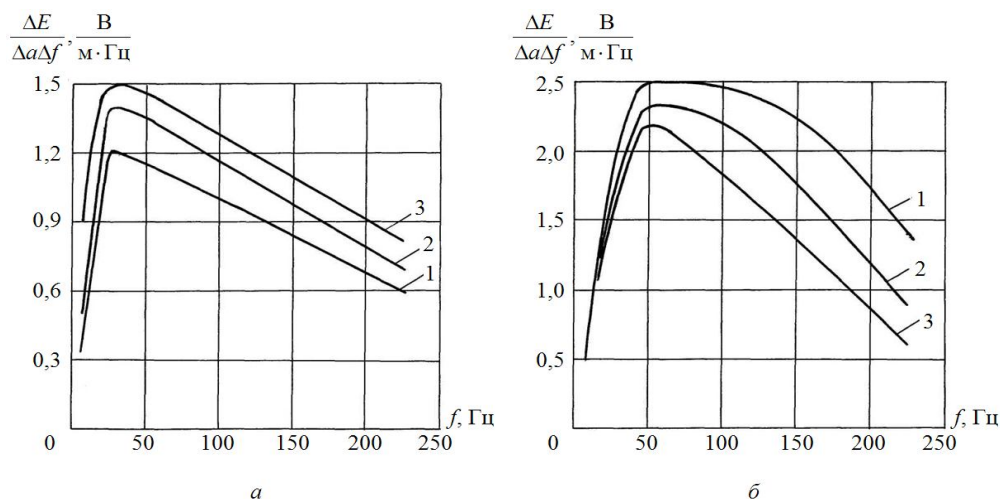


Рис. 1. Экспериментальные зависимости чувствительности устройства от частоты питающего тока

При уменьшении толщины исследуемого изделия относительно образцовой толщины изделия $a = 10^{-2}$ м, которая изменялась на величины Δa , равные 10^{-3} м (кривая 3); $2 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 2); $3 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 1). При увеличении толщины изделия относительно образцовой, Δa изменялась на те же величины, толщина изделия $a = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Видно, что максимальная чувствительность устройства при уменьшении толщины образцов, выполненных из сплава Д16, в пределах $(1,0 \div 3,0) \cdot 10^{-3}$ м по отношению к $a = 10^{-2}$ м наступает при $f_{\text{опт}} \approx (18-28)$ Гц. При подстановке в формулу (1) указанных значений a и σ получим $f_{\text{опт}} \approx 21$ Гц. При увеличении же толщины образцов в пределах $(1,0 \div 3,0) \cdot 10^{-3}$ м по отношению к $a = 6 \cdot 10^{-3}$ м максимальная чувствительность наступает при частотах возбуждающего поля $f_{\text{опт}} \approx (50 \div 60)$ Гц. Вычисленное по формуле (1) значение $f_{\text{опт}}$ будет равно 57 Гц. Как следует из рис. 1а, б относительная чувствительность устройства не сильно изменится по сравнению с максимальной, если использовать промышленную частоту 50 Гц, что позволит упростить электрическую схему преобразователя.

Выводы

Установлены оптимальные режимы работы преобразователя по частоте с точки зрения достижения максимальной чувствительности устройства к изменению толщины. Выяснены пределы применимости разработанного устройства по таким параметрам как толщина изделий, частота питания, наибольшее приращение толщины. Оценены погрешности определения приращений толщин по приближенной формуле.

Описанные преобразователи предназначены для измерения толщин листов и трубчатых металлических изделий. Поэтому, представляют практический интерес разработки методик и средств бесконтактного измерения и контроля геометрических параметров изделий.

Список использованной литературы

1. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, - 1996. – 464 с.
2. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.
3. Горкунов Б. М., Тюпа И. В. Вихрековый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий // Вестник НТУ "ХПИ", Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93–99.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
5. Электромагнитный контроль безопасного состояния трубопроводов и резервуаров / Б. М. Горкунов, А. А. Авраменко, А. А. Тищенко, А. С. Гармаш. // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика, КрНУ, Кременчук. – Вип. 1/2014(2). – С. 334–336. – Режим доступа: http://saue.kdu.edu.ua/files/ICPEES_2014.pdf
6. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрмовица и М. Стиган. – М.: Наука, 1979.

References

1. Measurement, monitoring, testing and diagnosis. V. III-7/V. V. Kluev, F. R. Sosnin, V. N. Filinov, etc.; Ed. V. V. Klyuyev. – Moscow: Mashinostroenie, - 1996. – 464 p. (Rus.)
2. Non-destructive testing. In the 5 books. Book 3. Electromagnetic Testing / Ed. V. V. Sukhorukov. – Moscow: Vyshaya shkola, 1992. – 312p. (Rus.)
3. Gorkunov B. M., Tyupa I. V. Eddy current two-parameter control of ferromagnetic cylindrical products // Vesnik NTU "HPI", Kharkov. – № 5. – 2004. – P. 93–99. (Rus.)
4. Non-destructive testing: Reference book: At 7 vol. Ed. V. V. Klyuyev. Vol. 2: In 2 books. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 688 p. (Rus.)
5. Electromagnetic testing safe condition of pipelines and tanks / Gorkunov B. M, Avramenko A. A, Tishchenko A. A, Garmash A. S. / Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education and practice. Bulletin. – Kremenchuk: KrNU, 2014. – 1/2014 (2). – P. 334–336. (Rus.). Available at: http://saue.kdu.edu.ua/files/ICPEES_2014.pdf
6. Reference book of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables / Ed. M. Abrmovitsa and M. Stigan. – Moscow: Nauka, 1979. (Rus.)

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.