

УДК 620.179

Исследование сигналов вихретокового преобразователя при контроле методом высших гармоник

В. С. Кошельников*, А. Д. Покровский

Разработан метод выбора режимов вихретокового контроля при использовании метода высших гармоник, но без использования предварительно подготовленных образцов. Методы вихретокового контроля объектов с постоянными свойствами неприменимы к объектам с нелинейными свойствами. Исследован численный алгоритм решения задачи неразрушающего контроля ферромагнитных цилиндрических объектов в проходном вихретоковом преобразователе. Контроль, основанный на анализе высших гармоник, повышает эффективность контроля структурного состояния стальных изделий и предназначен, например, для соблюдения их качества. Анализ электромагнитного поля проходного преобразователя с учетом нелинейной зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля становится актуальным для выбора режимов работы приборов неразрушающего контроля. Для решения использовано численное моделирование с использованием метода прогонки. Проверка результатов, полученных по выбранной расчетной схеме, выполнялась путем сравнения с опубликованными результатами для частного случая постоянных магнитных свойств, а проверка результатов выбранной схемы расчета, — путем сравнения с опубликованными результатами для конкретного случая постоянных магнитных свойств.

По выбранной методике исследовано влияние магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости на первую и третью гармоники магнитного потока в цилиндрическом объекте контроля, по которым определяется их влияние на сигнал преобразователя. Полученные зависимости позволяют определить влияние напряженности возбуждающего поля, существенное при контроле ферромагнитных объектов.

Показано преимущество третьей гармоники на частотах возбуждения в десятки герц, приемлемых с точки зрения производительности и получения достаточной амплитуды сигналов на измерительной обмотке.

Приведены результаты выбора режимов контроля для объектов из конструкционной стали. Даны рекомендации по выбору параметров контроля при использовании третьей гармоники сигнала. Рекомендован диапазон частот и напряженность возбуждающего поля в приборах, работающих по методу высших гармоник.

Ключевые слова: метод высших гармоник, нелинейная магнитная характеристика, цилиндрический объект контроля.

* vkoshelnikov@bk.ru

Выбор режимов контроля ферромагнитных объектов при использовании метода высших гармоник в настоящее время осуществляется трудоемким способом с помощью большого количества предварительно подготовленных образцов. В то же время для выбора режимов работы вихретоковых приборов с проходными преобразователями при контроле объектов, свойства которых могут считаться постоянными, разработаны удобные и относительно простые аналитические методы. Они основаны на исследовании электромагнитного поля внутри цилиндрического объекта контроля [1]. В случае ферромагнитных объектов такой подход не удастся применить, поскольку не учитывается нелинейность магнитных свойств объектов контроля.

В методе высших гармоник применяется нелинейность магнитной характеристики $B(H)$, когда сигнал формируется так же, как в вихретоковом методе, а в качестве информативных берется нелинейность кривой намагничивания. Приборы, работа которых основана на методе высших гармоник, предназначены для контроля, например, качества термообработки стальных изделий. К подобным приборам с проходным преобразователем относится, например, MAGNATEST D, описанный в [3]. Контроль по высшим гармоникам повышает эффективность контроля структурного состояния изделий из стали. Анализ электромагнитного поля проходного преобразователя с учетом нелинейной зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля становится актуальным для выбора режимов приборов неразрушающего контроля.

Попытки поиска аналитического решения при учете нелинейности магнитной характеристики объекта контроля в настоящее время не дали результата, удовлетворяющего требованиям практики, поэтому для решения такой задачи предпочтителен метод численного моделирования.

В настоящей работе исследованы выходные сигналы проходного вихретокового преобразователя при контроле цилиндрических объектов из ферромагнитных материалов. Вихревые токи возбуждаются в электропроводящем контролируемом объекте магнитным полем, создаваемым возбуждающей катушкой в объекте контроля; несинусоидальное напряжение измерительной катушки зависит от распределения напряженности магнитного поля H . В рассматриваемом случае цилиндрического объекта напряженность H определяется уравнением:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \sigma \mu_d(H) \frac{\partial \dot{H}}{\partial t}.$$

Конечно-разностная аппроксимация данного уравнения для решения по неявной схеме методом прогонки [2] имеет вид:

$$\frac{H_{i+1}^{j+1} - 2H_i^{j+1} + H_{i-1}^{j+1}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{H_{i+1}^{j+1} - H_{i-1}^{j+1}}{2\Delta r} = \sigma \mu_d(H) \frac{H_i^{j+1} - H_i^j}{\Delta t}.$$

Сгруппировав это уравнение, и записав в виде, пригодном для поиска решения методом прогонки, получим:

$$H_{i+1}^{j+1} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r} \right) - H_i^{j+1} \left(2 + \frac{\sigma \mu_d(H) \Delta r^2}{\Delta t} \right) + H_{i-1}^{j+1} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r} \right) = - \frac{\sigma \mu_d(H) \Delta r^2 H_i^j}{\Delta t};$$

$$A_i H_{i+1}^{j+1} - C_i H_i^{j+1} + B_i H_{i-1}^{j+1} = F_i H_i^j.$$

Граничным условием на поверхности цилиндра будет напряженность, созданная возбуждающей катушкой преобразователя:

$$H(r=R) = H_{\text{пов}} = H_m \sin(\omega t),$$

а на оси цилиндра (при $r=0$):

$$\frac{\partial H}{\partial r} = 0.$$

Зависимости $B(H)$ и $\mu_d(H)$ для цилиндрического объекта контроля из стали 45, для которого определяли решение методом прогонки, приведены на рис. 1.

Была проведена сверка результатов, полученных по данной расчетной схеме и отмеченных точками на рис. 2, с результатами расчета эффективной магнитной проницаемости с точными значениями, показанными на рис. 2 сплошной линией, для постоянной магнитной проницаемости, приведенными, например в [1].

Выбор числа узлов n разбиений по радиусу и разбиений m по периоду изменения возбуждающего поля проводился из условий допускаемой погрешности. Из полученных результатов, показанных на рис. 3, следует, что при $n=500$ и $m=7200$ погрешность не превысит 2—3% в диапазоне частот до 1 кГц, что охватывает диапазон частот вихретоковых структуроскопов, работающих по методу высших гармоник.

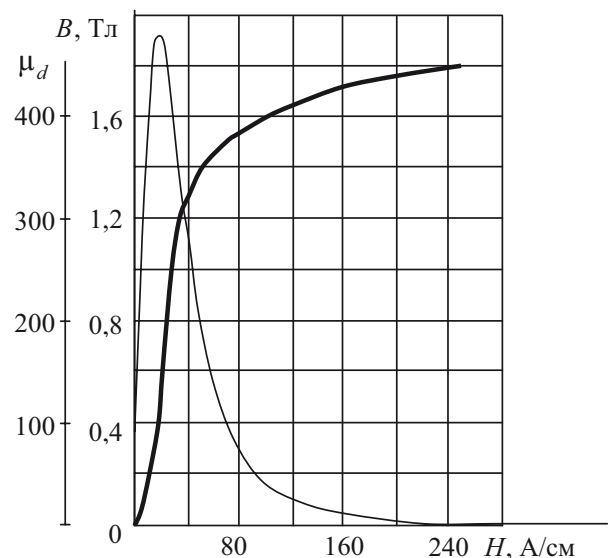


Рис. 1. Магнитные характеристики стали 45

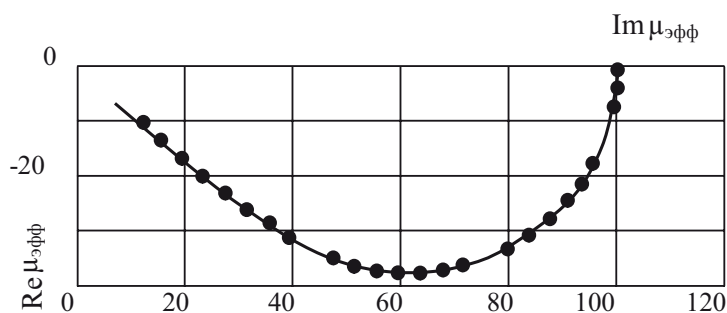


Рис. 2. Сравнение результатов расчета эффективной магнитной проницаемости для постоянной магнитной проницаемости

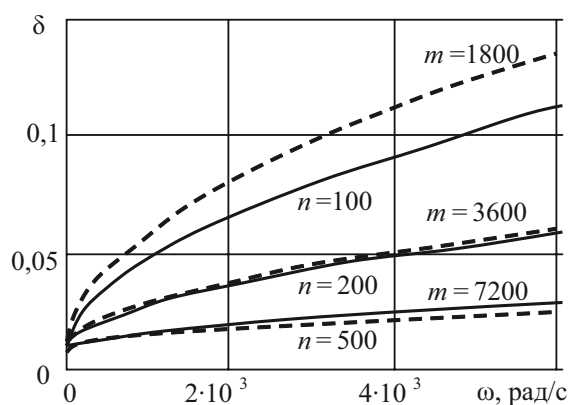


Рис. 3. Зависимость погрешности расчета от частоты возбуждающего поля для различного числа узлов разбиения по радиусу и периоду изменения возбуждающего поля

По анализируемой методике расчета получены показанные на рис. 4 зависимости эффективной магнитной проницаемости, соответствующие первой гармонике магнитного потока в цилиндрическом объекте контроля. По этим зависимостям определяется, аналогично [1], влияние магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости на сигнал преобразователя.

В дополнение к этому построенные зависимости позволяют уточнить влияние напряженности возбуждающего поля, существенное при контроле ферромагнитных объектов.

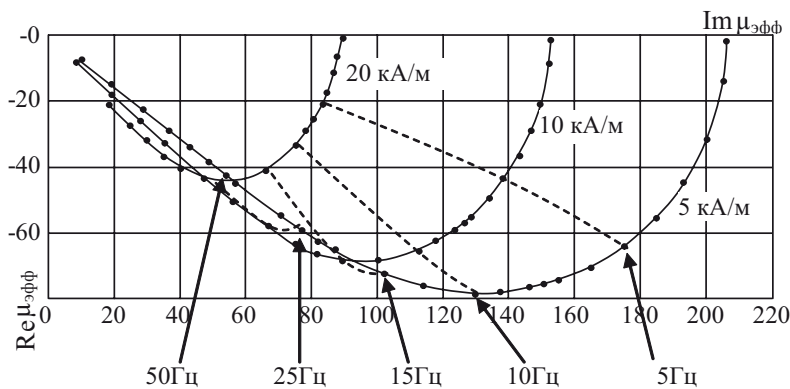


Рис. 4. Годографы эффективной магнитной проницаемости для первой гармоники магнитного потока

Таким образом, при каждом значении напряженности возбуждающего поля построенные зависимости имеют характер, аналогичный подобным зависимостям для линейных сред. Существенным является уменьшение $\mu_{эфф}$ при увеличении напряженности возбуждающего поля вследствие насыщения материала объекта контроля. Это, однако, не приведет к уменьшению амплитуды сигнала, поскольку с увеличением напряженности величина сигнала будет расти, но в меньшей мере, чем при контроле объектов с постоянной магнитной проницаемостью.

Вследствие нелинейности магнитной характеристики $B(H)$, напряженность и магнитная индукция содержат высшие гармоники, которые и используются при контроле в приборах, рассмотренных в [3]. Годографы третьей гармоники приведены на рис. 5.

Из рис. 5. видно, что хотя амплитуды третьих гармоник значительно меньше первых, влияние на них изменений напряженности возбуждающего поля меньше, чем на первые. Это снижает влияние таких мешающих параметров как нестабильность тока возбуждения и изменения магнитной характеристики.

Использование третьей гармоники в неразрушающем контроле в ряде случаев дает дополнительную информацию о свойствах объекта. В частности, раздельное определение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости на третьей гармонике оказывается более удобным, чем на первой. По значению магнитной проницаемости можно оценивать, например, качество термообработки, в то время как изменение удельной электрической проводимости является в этом случае мешающим параметром. Преимущество третьей гармоники становится существеннее на относительно больших частотах возбуждения, хотя бы в десятки герц, более приемлемых для контроля с точки зрения производительности и получения достаточных величин сигналов на измерительной обмотке. Все изменения на первой гармонике, вызванные колебаниями магнитной проницаемости и электрической проводимости, укладываются в показанный на рис. 6 сектор серого цвета. В результате раздельный контроль по первой гармонике на приемлемых частотах становится проблематичным, из-за того, что, как показано на рис. 6, угол между направлениями изменений магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости составляет всего единицы градусов.

В то же время на третьей гармонике эти углы для напряженности возбуждающего поля, близкой, но еще не достигающей насыщения, составляют величину около 40° , что достаточно удобно для реализации амплитудно-фазового метода. Однако следует учитывать, что амплитуды сигналов третьей гармоники почти в десять раз меньше, чем первой.

Полученные результаты показывают целесообразность использования в приборах [3], работающих по методу высших гармоник, частот в десятки герц и напряженности возбуждающего поля, немного не достигающей области насыщения.

Выводы

В проведенной работе проанализирован численный алгоритм решения задачи неразрушающего контроля ферромагнитного цилиндрического объекта в проходном вихретоковом преобразователе. Исследована неявная схема для решения поставленной задачи. Приведено решение данной задачи для нелинейных магнитных характеристик объекта из конструкционной стали. Даны рекомендации по выбору параметров контроля при использовании третьей гармоники сигнала.

Литература

1. **Неразрушающий контроль:** Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева: в 2 кн. Книга 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2003.
2. **Самарский А.А.** Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.
3. **Foerster GROUP** [Официальный сайт]. <http://www.foerstergroup.ru/MAGNATEST-D.117.0.html> (дата обращения 20.05.2016).

Статья поступила в редакцию 06.04.2016

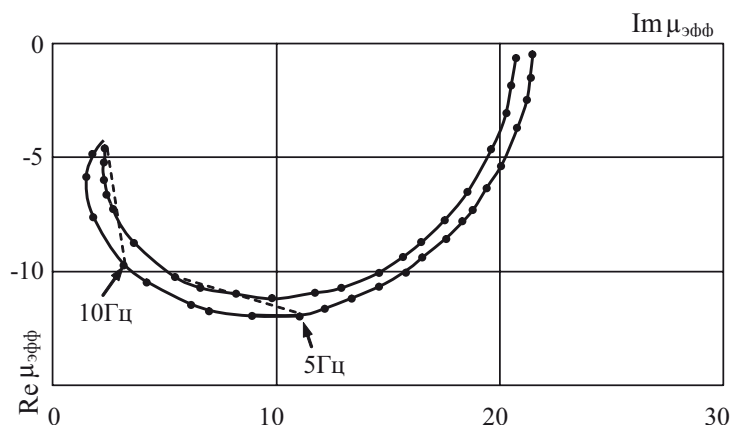


Рис. 5. Годографы третьей гармоники магнитного потока

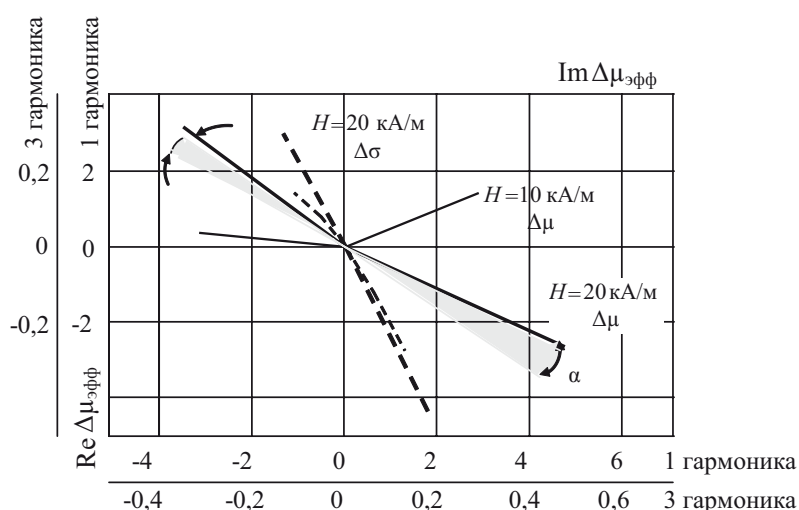


Рис. 6. Годографы приращений первой и третьей гармоник, вызванных изменениями магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости