

УДК 53.083

О ВКЛАДЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА В СОБСТВЕННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

А. Ю. Цветков

Работа посвящена изучению собственных нелинейных искажений индукционных датчиков. Рассматривается случай, когда эти искажения имеют магниторезистивную природу. Выявлено, что такие искажения преобладают в области температур ниже 20–30 К. Показано, что такой механизм может приводить к возникновению как четных, так и нечетных гармоник. При этом наличие каких-либо составляющих спектра будет определяться величинами внешнего постоянного магнитного поля и амплитуды тока возбуждения.

Ключевые слова: индукционный датчик, бесконтактная методика, нелинейный отклик.

В данной работе продолжено рассмотрение вопроса о механизмах возникновения собственных нелинейных искажений индукционных датчиков, начатое в [1], где в основе модели лежал терморезистивный эффект. Этот эффект обычно имеет место при температурах более 20–30 К, где ярко выражена температурная зависимость сопротивления материала обмоточного провода.

Теперь рассмотрим влияние магниторезистивного эффекта, который преобладает в области низких температур (менее 20–30 К). Как отмечалось в [1], индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности, намотанную медным проводом и содержащую достаточно большое количество витков. Таким образом, при протекании через него переменного тока амплитудой до 200 мА может создаваться собственное магнитное поле амплитудой до 0.1 Тл. Вследствие того, что медь обладает выраженным магнитосопротивлением в широком диапазоне температур, в датчике под действием собственного магнитного поля возникают колебания омического сопротивления, которые приводят к возникновению нелинейных искажений сигнала возбуждения.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tsvetkov@lebedev.ru.

Данное явление изменения сопротивления в присутствии магнитного поля может быть количественно описано формулой

$$MR(B) = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)}, \quad (1)$$

где $MR(B)$ – величина магнитосопротивления при заданной величине индукции магнитного поля B , $R(B)$ – сопротивление образца в данном магнитном поле, $R(0)$ – сопротивление образца в отсутствие магнитного поля. Пример зависимости магнитосопротивления индукционного датчика от величины внешнего магнитного поля приведён на рис. 1.

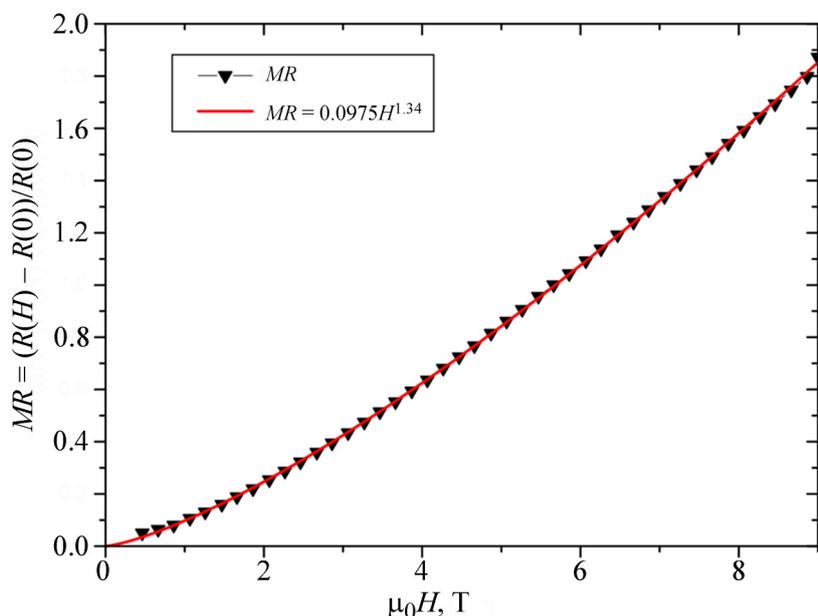


Рис. 1: Зависимость магнитосопротивления индукционного датчика от величины внешнего постоянного магнитного поля при температуре 10 К (треугольники – экспериментальные точки, сплошная линия – результат аппроксимации степенной функцией, $m = 1.34$).

Известно, что магнитосопротивление металлов обычно хорошо описывается степенной функцией вида

$$MR(B) = \beta B^m, \quad (2)$$

где β и m – подгоночные параметры. Для случая, показанного на рис. 1, они равны $\beta = 0.0975$, $m = 1.34$. Индукцию магнитного поля $B(t)$ в нашем случае можно записать

в виде

$$B(t) = \gamma I(t) + B_0, \quad (3)$$

где γ – коэффициент пропорциональности между током в катушке и индукцией создаваемого ей магнитного поля, $I(t)$ – ток через катушку, B_0 – индукция внешнего постоянного магнитного поля.

Падение напряжения на катушке индуктивности во внешнем постоянном магнитном поле с учётом магниторезистивного эффекта можно записать следующим образом:

$$U_c(t, B_0) = I(t)R(0) \{1 + \beta(\gamma I(t) + B_0)^m\}. \quad (4)$$

Здесь рассматривается только активная часть сопротивления катушки, подключенной к идеальному источнику тока $I(t) = I_0 \sin \omega t$. Раскладывая соотношение (4) в ряд Фурье, можно получить зависимости амплитуд гармоник как функции амплитуды тока возбуждения I_0 и внешнего магнитного поля B_0 . Выразить эти зависимости в аналитическом виде довольно затруднительно, поэтому здесь приводятся только результаты численного моделирования. Для расчётов были использованы следующие параметры: $I_0 = 0.1$ А, $R(0) = 1$ Ом, $\beta = 0.0975$ Тл $^{-1.34}$, $m = 1.34$, $\gamma = 0.3$ Тл/А. На рис. 2 приведены результаты расчётов амплитуд гармоник собственных нелинейных искажений в зависимости от величины внешнего постоянного магнитного поля. На рис. 2(а) показаны чётные гармоники (со 2-ой по 8-ю), а на рис. 2(б) – нечётные (с 3-ей по 9-ю). На вставках более подробно показаны области в окрестности начала координат.

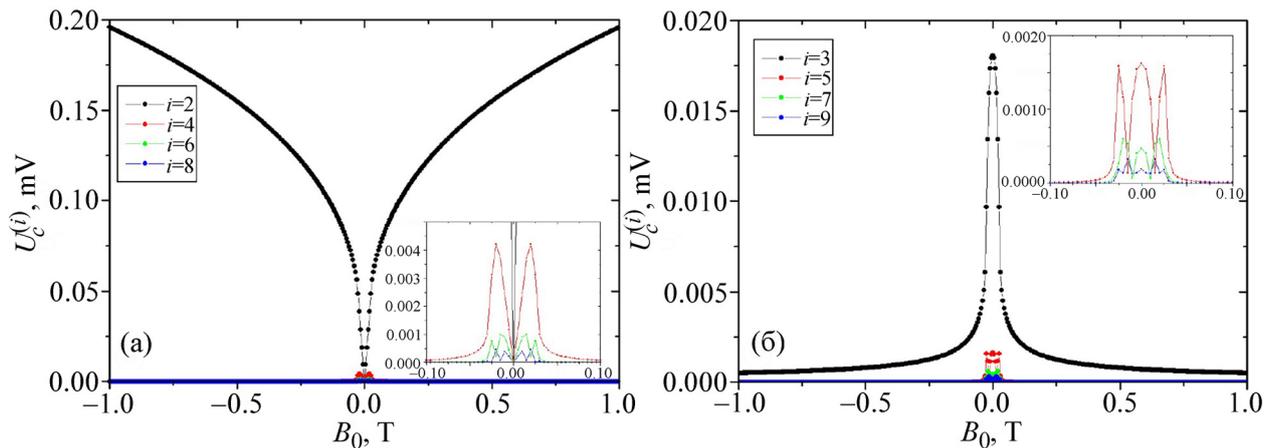


Рис. 2: Результаты численного моделирования собственных нелинейных искажений, вызванных магниторезистивным эффектом, для индукционного датчика во внешнем магнитном поле. Здесь и далее i – номер гармоники.

Можно видеть, что в отсутствие внешнего магнитного поля чётные гармоники отсутствуют, а амплитуды нечетных достигают своих максимальных значений. При наложении малого внешнего магнитного поля резко появляются чётные гармоники, однако при дальнейшем его увеличении все гармоники старше второй затухают, а вторая монотонно увеличивается и даже для малых внешних полей может давать существенный вклад в спектр нелинейных искажений сигнала отклика, получаемого от исследуемого образца. Иным образом обстоит дело с нечётными гармониками. Видно, что заметный вклад в искажение сигнала от образца может давать только третья гармоника при нулевом внешнем магнитном поле. Следует еще обратить внимание на то, что в малых внешних полях как чётные, так и нечётные гармоники порядка выше третьего имеют осцилляции, причем их количество возрастает с увеличением порядка гармоники, а чётные и нечётные гармоники совершают колебания в противофазе.

Рассмотрим рис. 3, где приведены полученные нами экспериментальные результаты для реального индукционного датчика (число витков – 600, внутренний диаметр – 0.3 мм, высота – 0.7 мм, сопротивление при 300 К – 87.5 Ом, индуктивность – 174 мкГн). Ток возбуждения I_0 в данном случае ~ 0.1 А. Видно, что они находятся в хорошем качестве с модельными зависимостями.

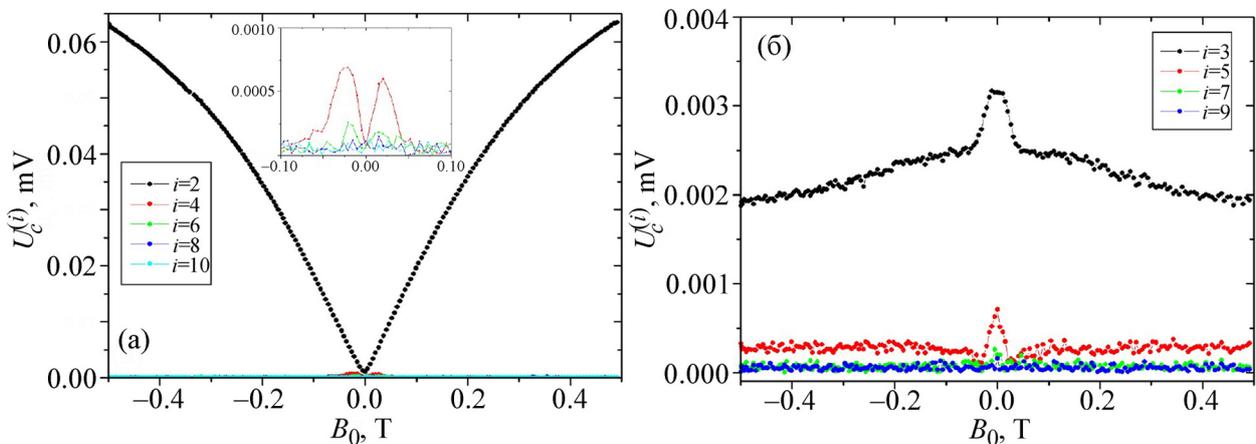


Рис. 3: Экспериментальные зависимости амплитуд гармоник собственных нелинейных искажений индукционного датчика от величины внешнего постоянного магнитного поля при температуре 10 К.

Теперь рассмотрим поведение амплитуд гармоник в зависимости от тока через катушку при фиксированном внешнем магнитном поле. Расчётные зависимости приведены на рис. 4. Вычисления производились для указанных выше параметров датчика и двух

фиксированных величин внешнего поля (0 и 0.03 Тл).

На рис. 4(а) показаны зависимости амплитуд нечётных гармоник для нулевого внешнего магнитного поля (чётные гармоники в данном случае отсутствуют). Видно, что преобладает только 3-я гармоника, способная существенно исказить сигнал отклика образца; влияние старших гармоник при токах возбуждения до 100 мА намного менее выражено. Иным образом обстоит дело, когда измерения происходят в присутствии внешнего магнитного поля. На рис. 4(б) показано, что в этом случае присутствует весь спектр гармоник, причем амплитуды гармоник порядка выше 3-ей имеют немонотонный осциллирующий характер поведения. Амплитуды гармоник по 4-ю включительно достигают достаточно больших значений, что необходимо учитывать при анализе сигнала отклика образца.

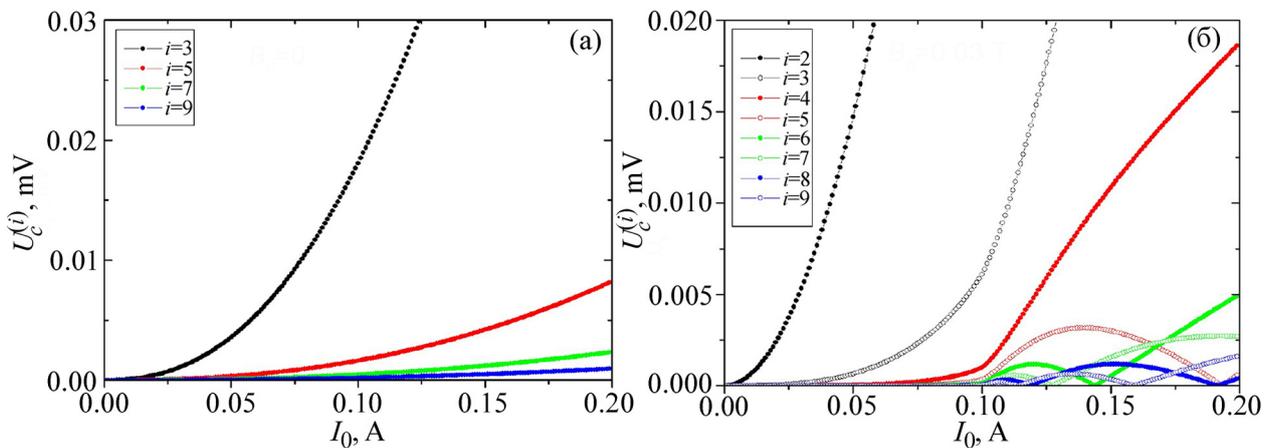


Рис. 4: Результаты численного моделирования собственных нелинейных искажений, вызванных магниторезистивным эффектом, для индукционного датчика при двух значениях индукции внешнего магнитного поля.

Для сравнения на рис. 5 приведены экспериментальные зависимости амплитуд гармоник собственных нелинейных искажений описанного выше индукционного датчика от амплитуды тока возбуждения во внешнем постоянном магнитном поле с индукцией $B_0 = 0.05$ Тл. Видно, что при работе на токах до 100 мА ощутимый вклад в искажение полезного сигнала могут вносить только 2-я и 3-я гармоники собственного нелинейного отклика датчика.

Таким образом, в этой работе был рассмотрен механизм возникновения собственных нелинейных искажений в катушке индукционного датчика, имеющий магниторезистивную природу. Принимая во внимание результаты работы [1], где подобным образом был

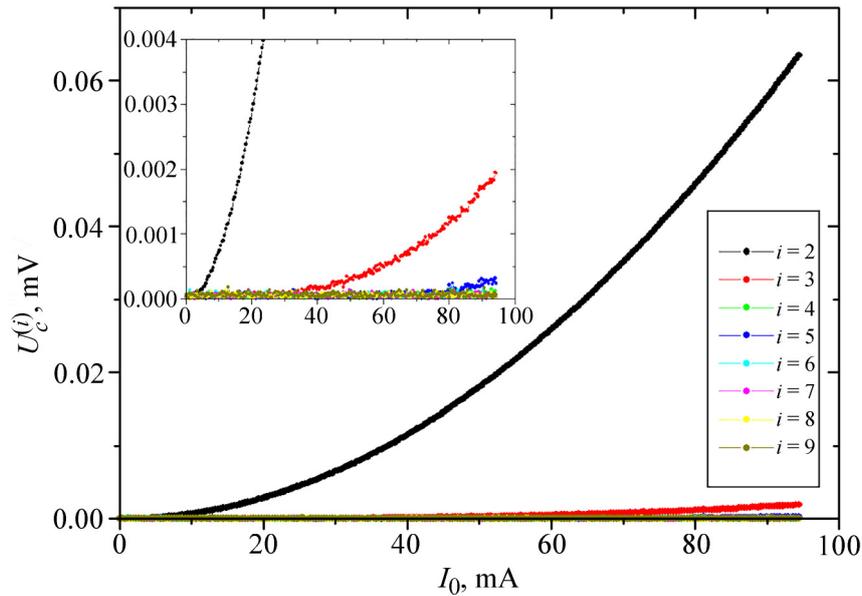


Рис. 5: Экспериментальные зависимости амплитуд гармоник от величины тока возбуждения во внешнем магнитном поле 0.05 Тл для реального индукционного датчика при температуре 10 К.

исследован терморезистивный механизм, следует отметить, что на практике в нелинейный отклик датчика вносят вклад оба этих механизма одновременно, причём преобладание того или другого определяется внешними условиями (рабочая температура и величина внешнего постоянного магнитного поля). Полностью избавиться от данных паразитных вкладов в сигнал отклика образца невозможно, поэтому внимание должно уделяться математическим методам их компенсации в ходе цифровой обработки полезного сигнала отклика.

В заключение отметим, что результаты работы могут быть использованы при разработке широко распространенных в качестве исследовательского инструмента бесконтактных (неразрушающих) индукционных методик [2, 3], когда возникает необходимость компенсировать появление вышеописанных нелинейностей численными методами.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119083090048-5.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Ю. Цветков, Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(4), 39 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622040066.

- [2] С. Ю. Гаврилкин, О. М. Иваненко, К. В. Мицен, А. Ю. Цветков, Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(2), 26 (2014). DOI: 10.3103/S1068335614020043.
- [3] П. И. Безотосный, С. Ю. Гаврилкин, О. М. Иваненко и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(9), 30 (2017). DOI: 10.3103/S1068335617090056.

Поступила в редакцию 20 июня 2022 г.

После доработки 5 июля 2022 г.

Принята к публикации 6 июля 2022 г.