

К ВОПРОСУ О СОБСТВЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА

А. Ю. Цветков

Работа посвящена изучению одной из причин возникновения собственных нелинейных искажений индукционных датчиков. Выявлено, что в ряде случаев, катушка индукционного датчика сама является источником нелинейных искажений сигнала возбуждения, преимущественно на частоте 3-ей гармоники. Показано, что возникновение собственных нелинейных искажений индукционного датчика может быть связано с температурными колебаниями, обусловленными протеканием тока, и преобладает при азотных температурах.

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

В современной экспериментальной физике в качестве исследовательского инструмента широко распространены бесконтактные (неразрушающие) индукционные методики, основанные на регистрации отклика образца на возбуждение в нём кольцевого тока с помощью близкорасположенной катушки индуктивности (индукционного датчика) [1]. В ходе создания подобной методики [2, 3] было выявлено, что даже при отсутствии образца в ряде случаев регистрируется появление нелинейных искажений сигнала возбуждения, преимущественно на частоте 3-ей гармоники. Источником этих искажений является сама измерительная катушка, а уровень собственного нелинейного отклика на несколько порядков превышает чувствительность приёмного тракта, что приводит к искажению результатов измерения отклика образца. Чаще всего борьба с такими искажениями осуществляется аппаратными методами [4, 5] и сопровождается существенным усложнением измерительной аппаратуры. Поэтому возникает необходимость создания количественной теоретической модели, которая позволит компенсировать появление данной нелинейности численными методами.

В ходе испытания индукционных датчиков было установлено, что возможными причинами возникновения нелинейного отклика являются колебания сопротивления обмоточного провода под действием выделяемой мощности (колебания температуры). Такой механизм преобладает при азотных температурах.

Уравнение теплового баланса для катушки с активным сопротивлением R_c с протекающим через неё переменным током $I(t)$ можно записать в виде

$$I^2(t)R_c = c \frac{d\Delta T}{dt} + \lambda \Delta T, \quad (1)$$

где c – теплоемкость индукционного датчика в сборе, λ – эффективный коэффициент теплоотдачи, ΔT – превышение мгновенного значения температуры катушки над равновесным. Если проинтегрировать это уравнение, то для ΔT можно получить следующее соотношение:

$$\Delta T(t) = \frac{R_c}{c} e^{-\frac{\lambda}{c}t} \int_0^t I^2(t) e^{\frac{\lambda}{c}t} dt. \quad (2)$$

Для простоты рассмотрим случай возбуждения катушки от источника тока. Положим $I(t) = I_0 \sin \omega t$ (где ω – частота задающего сигнала), тогда соотношение (2) после интегрирования примет вид

$$\Delta T(t) = \frac{I_0^2 R_c}{2c} \left[\left(\frac{\nu}{4\omega^2 + \nu^2} - \frac{1}{\nu} \right) e^{-\nu t} + \left(\frac{1}{\nu} - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{\sqrt{4\omega^2 + \nu^2}} \right) \right], \quad (3)$$

где $\varphi = \arctg(\nu/2\omega)$, $\nu = \lambda/c$. При $t \rightarrow \infty$ первый член экспоненциально затухает, и соотношение (3) принимает вид

$$\Delta T(t) = \frac{I_0^2 R_c}{2c} \left(\frac{1}{\nu} - \frac{\sin(2\omega t + \varphi)}{\sqrt{4\omega^2 + \nu^2}} \right). \quad (4)$$

Выражение для сопротивления катушки с учетом температурных колебаний можно записать как

$$R_c(t) = R_c(1 + \alpha \Delta T(t)), \quad (5)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления.

Напряжение на катушке $U_c(t)$, учитывая выражения (4) и (5), записывается в виде

$$U_c(t) = I(t)R_c(t) = I_0 R_c \left\{ \left(1 + \alpha \frac{I_0^2 R_c}{2\lambda} \right) \sin \omega t - \alpha \frac{I_0^2 R_c}{2c} \frac{1}{\sqrt{4\omega^2 + \nu^2}} \sin(\omega t + \varphi + \pi/2) + \alpha \frac{I_0^2 R_c}{4c} \frac{1}{\sqrt{4\omega^2 + \nu^2}} \sin(3\omega t + \varphi + \pi/2) \right\}. \quad (6)$$

Из соотношения (6) видно, что из-за температурных колебаний, возникающих вследствие пропускания через катушку переменного тока возбуждения, на ней возникает сигнал с частотой 3ω , а его амплитуда пропорциональна кубу амплитуды тока возбуждения

$$U_c^{(3)} = R_3 I_0^3, \quad (7)$$

при этом коэффициент пропорциональности R_3 имеет вид

$$R_3 = \frac{\alpha R_c^2}{4c} \frac{1}{\sqrt{4\omega^2 + \nu^2}} \approx \frac{\alpha R_c^2}{8\omega c} \quad (8)$$

(в нашем случае теплоотдачей можно пренебречь) и при фиксированной частоте и рабочей температуре является постоянной величиной для каждого конкретного индукционного датчика. Её величину можно определять в ходе калибровки датчика.

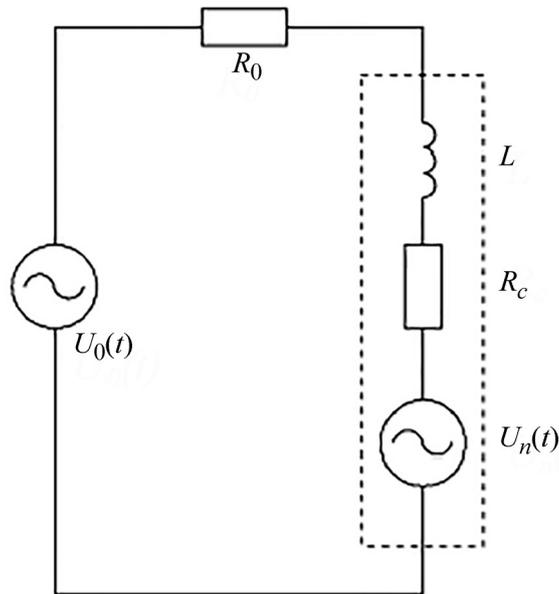


Рис. 1: Принципиальная электрическая схема реальной измерительной цепи.

Напомним, что полученные выше выражения (6)–(8) справедливы для случая питания катушки от идеального источника тока, не нагружающего источник нелинейного отклика. Теперь рассмотрим включение датчика в реальную измерительную цепь (см. рис. 1). Она состоит из источника напряжения основной частоты $U_0(t)$, добавочного сопротивления R_0 и собственно индукционного датчика (обведён пунктирной линией), обладающего собственными индуктивностью L и активным сопротивлением R_c . “Внутри” датчика также расположен источник сигнала нелинейного отклика (неважно чего –

образца или самого датчика) $U_n(t)$. Для напряжения нелинейного отклика (гармоник основной частоты) задающий источник $U_0(t)$ можно считать короткозамкнутым, так что добавочное сопротивление R_0 оказывается подключенным параллельно датчику, образуя делитель напряжения. Таким образом, вольтметр, подключенный параллельно датчику (или, что эквивалентно, добавочному сопротивлению), зарегистрирует амплитуду напряжения отклика, равную

$$V_n = \frac{R_0}{Z} U_n, \quad (9)$$

где Z – полное сопротивление всей измерительной цепи. Можно показать, что для целей оценки амплитуды 3-ей гармоники при рабочей частоте около 1 кГц влиянием реактивной части сопротивления катушки можно пренебречь и записать измеряемое напряжение отклика в виде

$$V_n \approx \frac{R_0}{R_0 + R_c} U_n. \quad (10)$$

Теперь оценим амплитуду 3-ей гармоники, вызванную колебаниями температуры катушки, для случая реального индукционного датчика (число витков – 600, внутренний диаметр – 0.3 мм, высота – 0.5 мм, сопротивление при 300 К – 106.63 Ом, сопротивление при 77 К – 13.27 Ом, индуктивность – 230 мкГн). Используя выражения (10), (7) и (8), выразим её в виде

$$V_3 \approx \frac{R_0}{R_0 + R_c} \frac{\alpha R_c^2}{8\omega c} I_0^3 \quad (11)$$

и подставим следующие значения (для температуры жидкого азота):

- добавочное сопротивление $R_0 = 18$ Ом,
- собственное сопротивление катушки датчика $R_c = 13.3$ Ом,
- рабочая частота 6050 рад/с (960 Гц),
- температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha = 0.031$ К⁻¹,
- эффективная теплоёмкость датчика (медная катушка + жёсткая матрица, оценка общей величины удельной теплоёмкости ~ 400 Дж/(кг·К), масса около 10 мг) $c = 4$ мДж/К,
- амплитуда тока возбуждения $I_0 = 100$ мА.

Вычисление по формуле (11) даёт результат $V_3 \approx 16$ мкВ, что соответствует эффективному (с учетом схемы измерения) коэффициенту собственной кубической нелинейности $R_3 \approx 1.6 \cdot 10^{-8}$ мВ/мА³.

Для сравнения результатов модели с экспериментом на рис. 2 приведена экспериментальная зависимость амплитуды собственных нечётных гармоник для того же самого

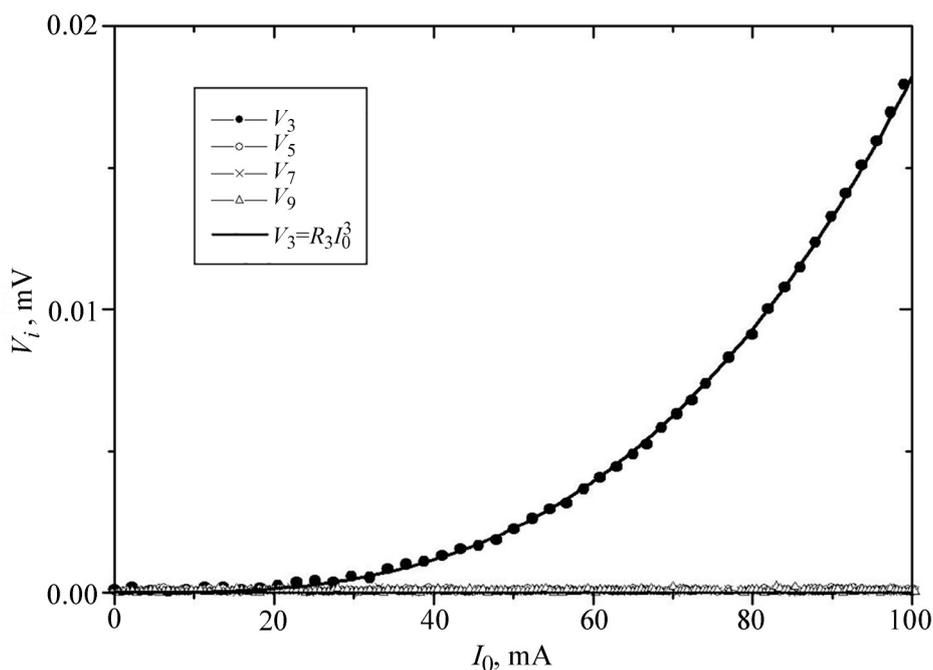


Рис. 2: Зависимость амплитуд нечётных гармоник сигнала возбуждения от амплитуды тока, полученная в ходе калибровки индукционного датчика. Сплошной линией показана модельная кубическая зависимость.

индукционного датчика от амплитуды спектрально-чистого тока возбуждения частотой 960 Гц. Видно, что в спектре сигнала отклика присутствует только третья гармоника, а все старшие гармоники не превышают уровня 0.2 мкВ. Красная пунктирная линия отвечает зависимости (7) при $R_3 = 1.83 \cdot 10^{-8}$ мВ/мА³, что хорошо согласуется с расчётным значением.

Таким образом, в работе рассмотрен механизм возникновения собственных нелинейных искажений в катушке индукционного датчика, связанный с температурными колебаниями, обусловленными протеканием тока. Показано, что на практике вклад такого отклика в искажение полезного сигнала определяется внешними условиями (рабочая температура) и полностью избавиться от него невозможно, поэтому внимание должно уделяться математическим методам его компенсации в ходе цифровой обработки сигнала. Следует отметить, что качественная катушка индукционного датчика (в отсутствие сильных магнитных полей) должна обладать нелинейными искажениями только на частоте 3-ей гармоники, а наличие нелинейных искажений на других частотах может свидетельствовать о невысоком качестве датчика.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. H. Claassen, M. E. Reeves, and R. J. Soulen, *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 996 (1991); DOI: 10.1063/1.1141991.
- [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.
- [4] H. Yamasaki, Y. Mawatari, and Y. Nakagawa, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3275 (2003); DOI: 10.1063/1.1571657.
- [5] H. Yamada, T. Minakuchi, D. Itoh, et al., *Physica C* **451**, 107 (2007); DOI: 10.1016/J.PHYSC.2006.11.002.

Поступила в редакцию 1 марта 2022 г.

После доработки 14 марта 2022 г.

Принята к публикации 16 марта 2022 г.