

Модель погрешности катушки индуктивности цилиндрического типа

Пашнин Сергей Владимирович, старший преподаватель
Кацай Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент
Погорелов Богдан Тарасович, студент
Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск)

В статье изложены результаты анализа индуктивности и омического сопротивления цилиндрической катушки, представлены выражения для оценки их погрешностей в зависимости от погрешности электротехнических и конструктивных параметров катушки.

Ключевые слова: катушка, индуктивность, сопротивление, намотка, относительная погрешность.

Катушки индуктивности используются в различных электрических и измерительных цепях [1]. Погрешности электротехнических параметров катушек влияют на точность функционирования устройств, в которых они используются. В процессе производства катушек индуктивности наиболее сложной является операция намотки провода на каркас катушки [3]. При выполнении операции намотки возникают геометрические погрешности укладки провода. Это может привести к отклонениям значений индуктивности (1) и омического сопротивления (2).

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{a}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника катушки;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн * м⁻¹ – магнитная постоянная;
 N – количество витков катушки;
 S – площадь сечения катушки;
 a – длина образующей цилиндра катушки.

$$R = \frac{\rho l}{s}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода катушки;
 l – длина провода;
 s – площадь сечения провода.

По выражениям (1) и (2) можно сделать вывод, что погрешности электротехнических параметров катушек индуктивности могут возникать по следующим причинам:

- 1) погрешность шага намотки;
- 2) изменение длины провода из-за его растяжения при намотке, которое приводит к изменению его диаметра и площади поперечного сечения;
- 3) погрешность количества витков катушки;
- 4) погрешность геометрических размеров каркаса катушки;
- 5) отклонение магнитной проницаемости сердечника от расчетного значения.

Пусть даны относительные погрешности электротехнических и конструктивных параметров катушки: $\delta\mu, \delta\mu_0, \delta N, \delta S, \delta a, \delta\rho, \delta l, \delta s$, где δ – шаг намотки; δD_3 – диаметр каркаса катушки; δd – диаметр провода катушки. Требуется найти максимально возможные относительные погрешности для L и R : $\delta L, \delta R$. Сформируем выражения для L и R в функции от перечисленных параметров катушки:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 \pi D_3^2}{4a} \quad (3)$$

где D_3 – диаметр эффективного поперечного сечения катушки индуктивности;

$$R = \frac{4\rho l}{\pi d^2} \quad (4)$$

Выразим параметры δD_3 и δd через введенные геометрические параметры:

$$D_3 = D + \frac{id}{2} = D + \frac{Nbd}{2a} \quad (5)$$

$$l = \pi D_3 = \pi \left(D + \frac{Nbd}{2a} \right) \quad (6)$$

Разложим в ряд Тейлора [2] выражения (3) и (4) с учетом выражений (5) и (6) по электротехническим и конструктивным параметрам в окрестности их номинальных значений. После выполнения промежуточных преобразований получим следующие выражения для оценки относительных погрешностей индуктивности и

сопротивления катушки в функции от относительных погрешностей электротехнических и конструктивных параметров:

$$\delta L = \delta\mu + \frac{2D}{D_3} \delta D + \left(\frac{2dNb}{aD_3} + 2 \right) \delta N + \frac{2dNb}{aD_3} \delta b + \frac{2dNb}{aD_3} \delta d + \left(\frac{2dNb}{aD_3} + 1 \right) \delta a \quad (7)$$

$$\delta R = \delta\rho + \frac{D}{D_3} \delta D + \frac{dNb}{aD_3} \delta N + \frac{dNb}{aD_3} \delta b + \left(\frac{dNb}{aD_3} - 2 \right) \delta d + \frac{dNb}{aD_3} \delta a \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) следует, что индуктивные и резистивные погрешности катушки индуктивности являются линейными комбинациями погрешностей электротехнических параметров. Поэтому для оценки вклада погрешности каждого параметра катушки отдельно на суммарные погрешности индуктивности и сопротивления достаточно сравнить по модулю коэффициенты при относительных погрешностях. Наибольшее влияние имеют те параметры, при которых коэффициенты имеют наибольший модуль. Соответственно, при модернизации процесса производства катушек индуктивности в первую очередь необходимо уменьшать погрешности таких параметров.

Рассмотрим решение этой задачи на конкретном примере. Пусть заданы конструктивные параметры катушки индуктивности: $d=0,05$ мм; $N=600$; $b=0,05$ мм; $a=5$ мм; $D=15$ мм; $D_3=15,15$ мм. При этом погрешности каждого параметра одинаковы и равны 1%. После подстановки значений параметров в (7) и (8), выражения для оценки численных значений погрешностей индуктивности и сопротивления катушки примут следующий вид:

$$\delta L = 1 \cdot \delta\mu + 1,98 \cdot \delta D + 2,04 \cdot \delta N + 0,04 \cdot \delta b + 0,04 \cdot \delta d + 1,04 \cdot \delta a \quad (9)$$

$$\delta R = 1 \cdot \delta\rho + 0,99 \cdot \delta D + 0,02 \cdot \delta N + 0,02 \cdot \delta b + 1,98 \cdot \delta d + 0,02 \cdot \delta a \quad (10)$$

По выражениям (9) и (10) видно, что наибольшее влияние на погрешность индуктивности имеют погрешности диаметра каркаса D и количества витков N . Соответственно, лучшим решением для модернизации производства таких катушек с точки зрения индуктивности будет производство каркаса с самым точным из возможных квалитетов размера диаметра D и системы контроля количества витков N . Следующими параметрами по их влиянию на погрешность индуктивности являются длина каркаса a и магнитная проницаемость материала сердечника катушки μ , которую можно уменьшить за счет уменьшения концентрации примесей. Погрешности шага намотки b и диаметра провода d слабо влияют на погрешность индуктивности.

Наибольшее влияние на сопротивление катушки имеет погрешность диаметра провода d . Соответственно, лучшим решением для модернизации производства таких катушек с точки зрения сопротивления будет закупка провода с минимальной погрешностью диаметра d в рамках финансовых возможностей производства. Следующими параметрами по их влиянию на погрешность индуктивности являются длина каркаса a и удельное сопротивление материала провода ρ . Погрешности количества витков N , шага намотки b и длины каркаса a слабо влияют на погрешность сопротивления.

Литература:

1. Евтихеев Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: учебное пособие для вузов / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
2. Камылин Л.И. Курс математического анализа. Т.1. – 2-е изд., испр. и доп. / Л.И. Камылин – М.: Изд-во МГУ, 2001 – 432 с.
3. Ларин, В.П. Технология намотки в приборо- и электроаппаратостроении: учебное пособие / В.П. Ларин. – СПб.: Изд-во «СПбГУАП», 2003. – 56 с.