

В.И. Гуревич, А.И. Покатаев, П.И. Савченко, В.А. Яковлев,

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ КАТУШКИ  
С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Многослойная катушка с цилиндрическим сердечником - распространенный элемент в электрических аппаратах (реле, контакторах).

Особенностью такого элемента является наличие в нем разомкнутой магнитной цепи. Расчет индуктивности катушки, как оказалось, в этом случае становится непростой задачей. Сложность проведения корректного расчета индуктивности катушки усугубляется, если необходимо учитывать и массо-габаритные показатели конструкции, как это имело место, например, при разработке герконовых реле [1].

Поскольку даже в фундаментальных работах, например в [2], вопросу расчета индуктивности систем с разомкнутой магнитной цепью уделено очень мало внимания, авторы могут сослаться лишь на аналитическое выражение в [3], применяемое для этих целей:

$$L_c = L_0 \mu_{\text{э}} = L_0 \frac{D_c^2}{D^2} \left[ \frac{\mu_H}{1 + 0,84 \left( D_c / l_c \right)^{1/4} (\mu_H - 1)} - 1 \right] + 1, \quad (I)$$

где  $L_c$  и  $L_0$  - индуктивности катушки соответственно с сердечником и без сердечника, Г;

$\mu_H$ ;  $\mu_{\text{э}}$  - соответственно начальная и эффективная магнитные проницаемости сердечника, г/см;  $l_c$  и  $D_c$  - соответственно длина и диаметр сердечника, см;  $D$  - средний диаметр катушки, см.

Как отмечено в [3], формулу (I) целесообразно применять, если толщина намотки небольшая. Уже при  $D_c < 0,8 D$  использование этой формулы некорректно. Имеющиеся в литературе другие формулы для расчета индуктивности высокочастотных контуров радиотехнических устройств применимы лишь для сердечников, изготовленных из карбонильного железа или высокочастотного феррита с малыми значениями  $\mu_H$ . При  $\mu_H = 1000$  и более, характерных для электротехниче-

оных сталей, получаются существенно завышенные результаты в расчет индуктивности.

В данной статье предложен метод расчета индуктивности на постоянном токе для многослойных катушек электрических аппаратов, (в том числе и при  $Q_c < 0,8 Q$ ), снабженных сердечниками цилиндрической формы из электротехнических сталей. Суть предлагаемого метода заключается в том, что при введенном в катушку ферромагнитном сердечнике магнитное сопротивление путей потока по воздуху во внутренней полости катушки заменяется магнитным сопротивлением сердечника. Суммарное магнитное сопротивление  $R_M$  составляет

$$R_M = R_{MB} - \Gamma_{MB} + R_{MC} \quad (2)$$

где  $R_{MB}$  и  $R_{MC}$  - соответственно суммарное магнитное сопротивление всех путей потока по воздуху и магнитное сопротивление сердечника;  $\Gamma_{MB}$  - магнитное сопротивление путей потока по воздуху во внутренней полости катушек.

Величины  $R_{MB}$ ,  $\Gamma_{MB}$  и  $R_{MC}$  определяются по формулам

$$R_{MB} = \frac{W^2}{L_0}; \quad (3) \quad \Gamma_{MB} = \frac{4L}{\mu_0 \pi D^2} = \frac{l}{\pi^2 D^2} 10^9 \approx \frac{l}{D^2} 10^8; \quad (4)$$

$$R_{MC} = \frac{4L}{\mu_0 \mu_H \pi (D-h)^2} \approx \frac{l}{\mu_H (D-h)^2} 10^8, \quad (5)$$

где  $W$  - количество витков обмотки;  $h, l$  - соответственно длина и толщина намотки, см;  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума, г/см.

Подставив в формулу (2) значения  $R_{MB}, \Gamma_{MB}, R_{MC}$  из формул (3) - (5), получим:

$$R_M = \frac{W^2}{L_0} - \left[ \frac{l}{D^2} 10^8 - \frac{l}{\mu_H (D-h)^2} 10^8 \right] = \frac{W^2}{L_0} - 10^8 l \left[ \frac{\mu_H (D-h)^2 - D^2}{\mu_H D^2 (D-h)^2} \right]. \quad (6)$$

Введем обозначение  $K = D^2 / (D-h)^2$ . Тогда выражение (6) примет вид

$$R_M = \frac{W^2}{L_0} - 10^8 \frac{l}{D^2} \left( \frac{\mu_H - K}{\mu_H} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) для значений  $\mu_H = 1000$  и более  $\frac{\mu_H - K}{\mu_H} \approx 1$ .

С учетом принятого упрощения получим

$$R_M = \frac{W^2}{L_0} - 10^9 \frac{l}{D^2}. \quad (8)$$

Анализ литературных источников показал, что для расчета  $L_0$  рекомендуются различные формулы, приводящие к существенно отличающимся один от другого результатам. Наиболее близкие к средним результаты получаются при расчете по формуле (4), которую и принимаем как наиболее достоверную при дальнейших расчетах. Используя ее, определим значение  $R_M$  как

$$R_M = \frac{3D + 9l + 10h}{0,08D^2 \cdot 10^{-6}} - \frac{l}{D^2} \cdot 10^9 = \frac{l + 3D + 10h}{0,08D^2} \cdot 10^6.$$

Искомая индуктивность катушки с сердечником

$$L_c = \frac{0,08D^2 W^2}{l + 3D + 10h} \cdot 10^6, \quad (9)$$

а эффективная магнитная проницаемость сердечника

$$\mu_3 = L_c / L_0 = \frac{3D + 9l + 10h}{l + 3D + 10h} \quad (10)$$

У реальных конструкций катушек при  $h \approx 0,2 - 2,0$  см и  $D/l \approx \approx 0,2 - 0,35$  см,  $\mu_3 = 4 - 5$ .

Полученные выражения (9) и (10) рекомендуется использовать в расчетах времени трогания электрических аппаратов с электромагнитным приводом.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.с. № 836704 (СССР). Высоковольтное вакуумное реле. Гуревич В.И. - Оpubл. в Б.И., 1981, № 21.
2. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. - М.-Л.: Энергия, 1964.
3. Баев Е.Ф., Фоменко Л.А., Цымбалюк В.С. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками. - М.: Сов. радио, 1976.
4. Справочник радиолюбителя. Изд. 6-е, Ч. I - Киев: Техніка, 1969.