

удачным в связи с тем, что значение частоты собственных колебаний будет минимальным.

#### Список использованных источников

1. Баканов, Г.Ф. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г.Ф. Баканов, С.С. Соколов, В.Ф. Суходольский. – Academia, 2007. – 368 с.
2. Зеленский, А.В. Основы проектирования электронных средств. Часть 2/ А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощёкова, А.А. Ньюхалов / Под общ. ред А.В. Зеленского. - Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008.-167с.

## ВНОСИМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

А.В. Зеленский, Н.В. Ляченков

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Пусть катушка индуктивности, по которой протекает переменный ток с частотой  $f$ , расположена вблизи плоской поверхности электропроводящего элемента, имеющего неограниченные размеры. И пусть плоскость витков катушки индуктивности расположена параллельно плоскости поверхности электропроводящего элемента. В результате наложения электромагнитных полей катушки и электропроводящего элемента происходит изменение параметров исходного электромагнитного поля катушки индуктивности, что отражается в изменении сопротивления катушки индуктивности. Приближение катушки индуктивности к поверхности электропроводящего элемента сопровождается следующими явлениями [ 1 ]:

а) часть энергии катушки индуктивности поглощается электропроводящим элементом и выделяется в окружающую среду в виде тепловых потерь, что увеличивает активное сопротивление катушки индуктивности;

б) другая часть энергии катушки индуктивности создаёт отражённое электромагнитное поле, которое действует в противофазе с исходным электромагнитным, что уменьшает индуктивность катушки.

Для ферромагнитных электропроводящих элементов к двум вышеуказанным явлениям добавляются ещё следующие:

в) происходит увеличение индуктивности катушки за счёт магнитной проницаемости электропроводящего элемента (обычно это увеличение индуктивности невелико и меньше размагничивающего действия вихревых токов);

г) возрастают активные потери за счёт перемagnичивания материала электропроводящего элемента.

Все перечисленные эффекты приводят к изменениям активной и индуктивной составляющих сопротивления катушки индуктивности.

Если пренебречь межвитковой ёмкостью катушки индуктивности, то её комплексное сопротивление равно:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 = Z_0 \cdot \exp(j\varphi_0) = Z_0 \cos\varphi_0 + jZ_0 \sin\varphi_0, \quad (1)$$

где  $\underline{Z}_0$  - собственное комплексное сопротивление катушки индуктивности;  $Z_0$  - модуль собственного сопротивления катушки индуктивности;  $\varphi_0$  - аргумент собственного сопротивления катушки индуктивности;  $R_0$  - активная часть собственного комплексного сопротивления катушки индуктивности;  $\omega L_0$  - реактивная часть собственного комплексного сопротивления катушки индуктивности;  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота;  $L_0$  - собственная индуктивность катушки;

$$\varphi_0 = \text{arctg}(\omega L_0 / R_0).$$

Приращения составляющих сопротивления катушки индуктивности, обусловленные влиянием электропроводящего элемента, называются вносимыми сопротивлениями. Таким образом, влияние электропроводящего элемента на катушку индуктивности формально отображается следующим соотношением:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{\text{вн}} = R_0 + R_{\text{вн}} + j\omega(L_0 + L_{\text{вн}}), \quad (2)$$

где  $\underline{Z}_k$  - комплексное сопротивление катушки индуктивности;  $\underline{Z}_{\text{вн}} = (R_{\text{вн}} + j\omega L_{\text{вн}})$  - комплексное вносимое сопротивление,  $R_{\text{вн}}$  - активная часть вносимого сопротивления,  $L_{\text{вн}}$  - вносимая индуктивность.

Действие вихревых токов на катушку индуктивности аналогично действию короткозамкнутой вторичной обмотки трансформатора на его первичную обмотку. Поэтому, при анализе вихретокового взаимодействия между катушкой индуктивности и электропроводящим элементом, можно заменить электропроводящий элемент с распределёнными в нём вихревыми токами на эквивалентный короткозамкнутый контур с сосредоточенными параметрами. С учётом таких представлений, и для частот когда можно пренебречь паразитными ёмкостями, допустимо записать следующие формулы, определяющие значения вносимых параметров:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{вн}} &= \frac{\omega^2 M^2 R_s}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} \\ L_{\text{вн}} &= \frac{\omega^2 M^2 L_s}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $M = K\sqrt{L_0 L_i}$  - взаимная индуктивность катушки и электропроводящего элемента;  $K=(0...1)$ - коэффициент взаимной индуктивности, зависящий от взаимного положения катушки индуктивности и электропроводящего элемента;  $R_s$  - активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов,  $L_s$  -индуктивность эквивалентного контура вихревых токов.

Для определения значений параметров эквивалентного контура необходимо составить модель электропроводящего элемента, из которой следует определить значения активного сопротивления и индуктивности эквивалентного контура, а также взаимной индуктивности электропроводящего элемента и катушки индуктивности.

Вихревые токи распределены в теле электропроводящего элемента неравномерно как по поверхности, так и в глубину. Однако, как показывают экспериментальные исследования, можно выделить часть объёма электропроводящего тела, в котором сосредоточена большая часть(80%) распределённых вихревых токов. Эта часть объёма расположена под катушкой индуктивности, по форме и площади повторяет форму и площадь обмотки катушки индуктивности, а по глубине равна удвоенной глубине проникновения вихревых токов. Для случая круглой катушки индуктивности прообразом модели электропроводящего элемента может являться объёмное кольцо прямоугольного сечения, наружный и внутренний диаметры которого равны, соответственно, наружному и внутреннему диаметрам обмотки катушки индуктивности, а толщина кольца равна удвоенной глубине проникновения вихревых токов. Сечение такого объёмного кольца показано на рис. 1, где оно отмечено косой штриховкой. Для перехода от объёмного кольца (в котором сохраняется неравномерность распределения вихревых токов по сечению) к модели с сосредоточенными параметрами заменим объёмное кольцо двумя сосредоточенными круговыми контурами: контур 1 и контур 2.

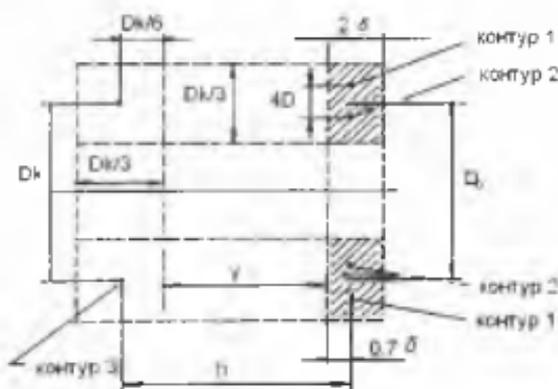


Рис.1. Модель вихретокового взаимодействия

Для плоской электромагнитной волны (т.е. без учёта размеров катушки индуктивности) глубину проникновения вихревых токов в материал электропроводящего элемента можно определить с помощью формулы

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_{\text{отн}}}} = 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu_{\text{отн}} \cdot f}}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  - удельная электрическая проводимость материала электропроводящего элемента;  $\mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость воздуха;  $\mu_{\text{отн}}$  - относительная магнитная проницаемость материала электропроводящего элемента.

С учетом размеров катушки индуктивности и для квадратного сечения обмотки катушки индуктивности преобразуем формулу (4) следующим образом:

$$\delta = 68 \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu_{\text{отн}} \cdot f}}. \quad (5)$$

Так как вихретоковые преобразователи обычно используют на повышенных частотах, то глубина проникновения вихревых токов в материал электропроводящего элемента обычно менее одного миллиметра, поэтому толщина объемного кольца, в котором сосредоточены вихревые токи, существенно меньше, чем его ширина (половина разности наружного и внутреннего диаметров). Следовательно, сечение объемного кольца не квадратное, а значит для его замены на сосредоточенные контуры необходимо применять два контура, как показано на рис. 1 [ 2 ]. Для такой модели эквивалентный диаметр объемного кольца следует определять по формуле:

$$D_0 = D_k \left[ 1 + \left( \frac{1,4\delta}{D_k} \right)^2 \cdot 0,167 \right], \quad (6)$$

где  $D_k$  - средний диаметр объемного кольца (равен среднему диаметру катушки индуктивности). Здесь использован коэффициент "1,4" перед значением глубины проникновения вихревых токов в материал электропроводящего элемента вместо ожидаемого коэффициента "2" в связи с неравномерностью распределения плотности вихревых токов по глубине. По этой же причине расстояние от поверхности электропроводящего элемента до плоскости, в которой расположены два сосредоточенных круговых контура, выбрано равным  $0,7\sigma$ . В поверхностном слое толщиной  $0,7\sigma$  сосредоточена половина всех вихревых токов, т.к. плотность вихревых токов убывает по экспоненциальной зависимости от глубины.

Разность диаметров двух сосредоточенных контуров равна:

$$\Delta D = \sqrt{\frac{(D_0 - 3)^2 - 2\delta^2}{3}} \quad (7)$$

Диаметры двух сосредоточенных контуров равны:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= D_0 + \Delta D; \\ D_2 &= D_0 - \Delta D, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $D_1$  — диаметр первого сосредоточенного контура;  $D_2$  — диаметр второго сосредоточенного контура.

Два сосредоточенных контура необходимы при последующих расчётах взаимной индуктивности катушки индуктивности и электропроводящего элемента. Для расчёта собственной индуктивности объёмного кольца, в котором сосредоточены вихревые токи можно пользоваться следующей методикой. Пусть для прямоугольного сечения объёмного кольца размеры сечения будут  $1,4\delta$  и  $D_k/3$ . Значение  $1,4\delta$  — размер сечения в осевом направлении, а значение  $D_k/3$  — размер в радиальном направлении. Пусть  $\delta^* = \delta / D_k$ , тогда собственная индуктивность объёмного кольца равна:

$$L = \frac{\mu_0 D_k}{2} \left[ \ln \frac{4}{1,4\delta^* + 0,33} - 0,5 + \left( \frac{6(\delta^*)^2 + 0,11}{24} \right) \cdot \ln \left( \frac{4}{\sqrt{2(\delta^*)^2 + 0,11}} \right) + f_1 + 0,0275 f_2 \right] \quad (9)$$

где значения  $f_1$  и  $f_2$  указаны в табл. 1.

Таблица 1.

| $\delta^*$ | 0       | 0,02    | 0,03     | 0,1      | 0,2      | 0,3      |
|------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| $f_1$      | 0,00027 | -0,0022 | -0,00221 | -0,00223 | -0,00183 | -0,00177 |
| $f_2$      | 0,5972  | 0,5991  | 0,6019   | 0,6329   | 0,7023   | 0,7717   |

Аппроксимируя табличные функции аналитическими соотношениями, получим следующие выражения для эквивалентного контура вихревых токов:

$$\left. \begin{aligned} L_s &= 6,28 \cdot 10^{-7} \cdot D_k \left[ -\ln \left( \frac{1,4\delta}{4D_k} + 0,125 \right) - 0,5 \right] \cdot \left[ 1 + 0,16 \left( \frac{1,4\delta}{D_k} + 0,5 \right)^3 \right]; \\ R_s &= \frac{6,73}{\sigma \cdot \delta}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Моделью для катушки прямоугольного сечения можно считать сосредоточенный контур 3 (рис.1), являющийся центральным витком катушки. Индуктивность вычисляют по следующей формуле [1]:

$$L = \mu_0 D_k n_k^2 F. \quad (11)$$

где  $n_k$  - число витков катушки индуктивности.

Такая методика неудобна для анализа погрешностей преобразователей, содержащих катушки индуктивности, т.к. плохо поддается автоматизации анализа из-за необходимости ручного определения значения функции  $F$  по графикам, поэтому желательно получить аналитическое выражение для определения индуктивности катушки с прямоугольным сечением. Такой формулой может служить следующее выражение:

$$L = \mu_0 \frac{D_k}{2} \left[ \ln \frac{4D_k}{a+r} - 0,5 \right] \cdot \left[ 0,998 + \left( \frac{a+r}{D_k} \right)^3 \cdot 0,16 \right] \cdot n_k^2 = \mu_0 D_k n_k^2 F'. \quad (12)$$

#### Список использованных источников

1. Зеленский А.В., Воронцов С.В. Вихрековые устройства с непрерывным тестированием функции преобразования. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. – 132 с.
2. Ляченков Н.В. Вихрековые контрольно-измерительные модули. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 300с.

## ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ - АКТИВНЫЙ МЕТОД ОБУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Н.И. Лиманова

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Система образования призвана готовить инициативных и мобильных выпускников, готовых легко сменить место работы. Для этого высшая школа должна обеспечивать своим выпускникам такие знания, которые позволили бы легко маневрировать в рыночных условиях. Широкие и глубокие знания - это условие высокой профессиональной квалификации и важнейший ресурс, который со временем приумножается.

Одно из направлений модернизации образования - индивидуальная траектория, т.е. создание условий и возможностей для самовыражения и развития личности студентов, для их самореализации, профессионального роста. Основным условием эффективного процесса обучения является