

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ В ЗАЗОРЕ МАГНИТОПРОВОДА

Васильев А.С., Ланин В.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Использование магнитопровода для концентрации электромагнитной энергии в области зазора позволяет повысить эффективность нагрева. Увеличивается скорость нагрева, зона нагрева более локализована, что существенно при пайке изделий интегральной электроники. Индукционные нагревательные устройства на магнитопроводе из феррита с незамкнутой магнитной цепью обладают высокой скоростью бесконтактного и локального нагрева проводящих материалов и эффективны для монтажной пайки в электронике. Для формирования качественных паяных соединений необходима оптимальная конструкция.

Индукционные нагревательные устройства на магнитопроводе из феррита с незамкнутой магнитной цепью (рисунок 1) обладают высокой скоростью бесконтактного и локального нагрева проводящих материалов и эффективны для монтажной пайки в электронике. Для формирования качественных паяных соединений необходима оптимальная конструкция индуктора, концентрирующая магнитный поток в зоне пайки, и оптимизация температурного профиля нагрева [1].

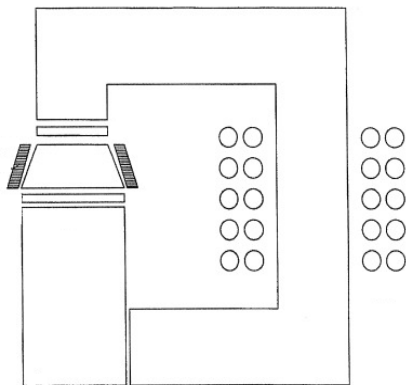


Рисунок 1 – Магнитопровод с незамкнутой цепью

При проектировании индукторов необходимо учитывать следующие ограничительные условия: максимальная плотность магнитного потока, индукция магнитопровода, площадь обмотки и сопротивление обмотки [2].

При подаче максимально возможного тока обмотки I_{max} ожидается получить максимальную плотность магнитного потока B_{max} . Но величина

B_{max} должна быть не больше, чем величина максимального магнитного насыщения материала сердечника магнитопровода. Максимальная плотность магнитного потока будет равна:

$$B_{max} = \frac{h_3}{nI_{max}\mu_0}, \quad (5)$$

где n – количество витков обмотки.

Индукция магнитопровода при этом будет

$$L = \frac{n^2}{R_h} = \frac{\mu_0 A_c n^2}{h_3}, \quad (2)$$

где R_h – сопротивление воздуха в зазоре; A_c – ширина магнитопровода;

Площадь обмотки W_a , доступная для обмотки определяется параметром, называемым коэффициентом заполнения K_f .

$$K_f W_a = n A_w, \quad (3)$$

где A_w – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Из-за собственного сопротивления обмотки, оптимальным значением K_f принято считать в диапазоне 0,65 – 0,95 [3].

Сопротивление обмотки магнитопровода

$$R = \rho \frac{l_b}{A_w}, \quad (4)$$

где ρ – сопротивление проводящего материала, l_b – общая длина обмотки.

Переменный магнитный поток, пронизывающий материал сердечника, вызывает появление в массе материала ЭДС индукции. Так как все ферромагнетики относятся к проводникам, то под действием этой ЭДС в сердечнике возникают электрические токи, протекающие по замкнутым контурам, расположенным в плоскостях перпендикулярных направлению магнитного потока, и называемые вихревыми токами. Вихревые токи создают свой магнитный поток, стремящийся, в соответствии с правилом Ленца, ослабить изменение основного потока. Поэтому они действуют размагничивающим образом, уменьшая основной поток.

Размагничивающее действие вихревых токов неодинаково в различных частях сердечника. Наиболее сильно оно выражено в центре сечения, т.к. центральные части охватываются максимальным числом контуров тока, МДС которых и создают размагничивающий поток. Поэтому в центре сечения плотность основного магнитного потока будет меньше, чем на краях, т.е. происходит вытеснение основного магнитного потока в наружные слои магнитопровода. Это явление выражено тем резче, чем выше частота магнит-

ного потока и больше сечение, магнитная проницаемость и удельная проводимость материала сердечника.

Протекающий по материалу сердечника электрический ток вызывает его нагрев. Если это тепло не используется, то говорят о потерях на вихревые токи. В соответствии с законом Джоуля-Ленца, мощность расходуемая на нагрев равна:

$$P = I_F^2 r, \quad (6)$$

где I_F - действующее значение вихревых токов, а r - сопротивление контура, по которому они замыкаются. Очевидно, что эффективно снизить эти потери можно уменьшив ток. Это достигается увеличением удельного сопротивления материала и разделением его на отдельные изолированные друг от друга слои вдоль линий магнитного потока.

Активная мощность, преобразуемая в тепло вихревыми токами P_F , будет равна [3]:

$$P_F = \varepsilon f^2 B_{max}^2 V, \quad (7)$$

где ε – ЭДС, f – частота переменного тока, V – потери на вихревые токи

Из выражения (7) следует, что потери на вихревые токи очень сильно (во второй степени) зависят от частоты переменного тока f а также от амплитуды индукции (плотности магнитного потока) B_{max} .

Методика моделирования распределения электромагнитных полей включает создание геометрической модели, задание свойств материала, источника возбуждения, граничных условий, настройку опций расчета и сетки, решение задачи распределения и анализ результатов.

Геометрическая модель индукционного устройства в соответствии с ANSOFT MAXWELL имеет составные части:

- магнитопровод ферритовый марки Ф-86, свойства которого выбирались из библиотеки ANSOFT MAXWELL;

- катушки возбуждения с числом витков $N=25$ реализуются в модели как два полых цилиндра с толщиной стенок, равной высоте катушки.

Приложенное к ним токовое возбуждение задается в сечении цилиндра с указанием ампер/витков и направления.

Граничные условия: поле H непрерывно при пересечении границ объектов; условие Неймана на границе области моделирования – поле H не пересекает границы области моделирования.

В результате моделирования с использованием уравнений электромагнитного поля Максвелла без учета конвективного теплообмена нагреваемого тела с окружающей средой получены распределения плотности вихревых токов в металлических деталях, магнитного поля индукционного устройства в пространстве.

Анализ зависимостей показывает, что наибольшая мощность нагрева характерна для металлов с наибольшей электропроводностью, т.е. для меди. Плотность вихревых токов с повышением частоты увеличивается, так как сильнее сказывается скин-эффект. Частота более 950 кГц не приводит к существенному повышению эффективности нагрева. Скоростью и температурой нагрева можно управлять, изменяя величину тока в обмотках возбуждения.

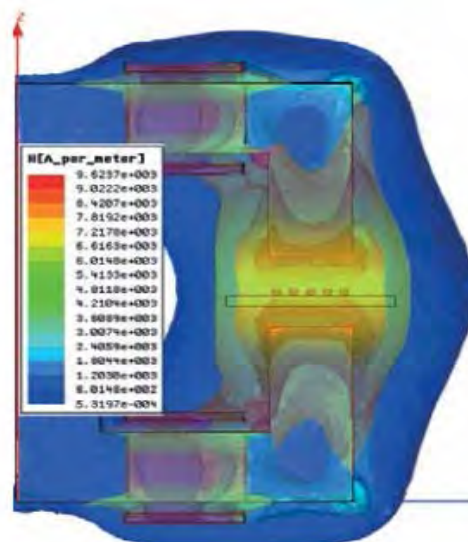


Рисунок 2 – Распределение плотности вихревых токов в зазоре магнитопровода

Для эффективного управления мощностью и скоростью индукционного нагрева необходимо контролировать величину тока в рабочих обмотках, а изменяя частоту питающего тока, можно регулировать характер нагрева – общий или локальный поверхностный.

Избирательный характер индукционного нагрева проводящих материалов позволяет реализовать процесс пайки электронных компонентов на плату без перегрева корпуса. С помощью индукционного нагрева можно осуществлять формирование матричной структуры выводов припоя на контактных площадках печатной платы.

1. Ланин, В.Л. Высокоэффективные индукционные устройства для монтажной пайки в электронике / В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 46–49.
2. Erickson, R.W. Fundamentals of Power Electronics / R.W. Erickson. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 881p.
4. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 280 с.