

УДК 621.365.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ В ЗАЗОРЕ МАГНИТОПРОВОДА

Е. С. РАТНИКОВ, В. Л. ЛАНИН

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь

При индукционном нагреве деталей в зазоре магнитопровода действуют электромагнитные силы, стремящиеся вытолкнуть деталь из рабочей зоны. Проведено моделирование этих сил для деталей из магнитных и немагнитных материалов, чтобы оценить теоретическое воздействие этой силы на нагреваемую деталь и использовать в дальнейшем для увеличения коэффициента растекания припоя.

Моделирование проводилось в пакете ANSYS Electromagnetics Suite [1] с вычислением силы Лоренца с помощью встроенного калькулятора ANSYS. Сначала для моделирования была выбрана медная деталь  $27 \times 27$  мм толщиной 0,2 мм. Моделирование проводилось на частотах 60 и 250 кГц. При плотности меди, равной  $8,96 \text{ г/см}^3$ , масса такой детали составляет 1,3 г, соответственно, чтобы сдвинуть такую деталь, необходимо приложить силу в 12,8 мН.

В качестве магнитной детали была выбрана деталь из никеля таких же размеров, масса которой составила 1,297 г. Чтобы сдвинуть такую деталь, необходимо приложить силу в 12,73 мН.

По результатам моделирования для медной детали, если предположить, что направления составляющих мгновенной силы совпадают, то максимальная мгновенная сила составила бы 12,62 мН для частоты 60 кГц и 14 мН для частоты 250 кГц. Результаты моделирования для детали из никеля показали, что при частоте 60 кГц на деталь действует сила 0,13 мН, а на частоте 250 кГц – 0,003 мН. Таким образом, с ростом частоты тока в индукторе действие электромагнитных сил значительно снижается.

При экспериментальном исследовании вибрации возбуждались подачей на дополнительную обмотку (10 витков) индуктора переменного тока от ВСА-5К частотой 100 Гц и амплитудой до 30 В и величине тока порядка 6 А. После расплавления припоя создавались вибрации амплитудой 1...2 мм в вертикальной плоскости. Вибрации создавались только в ферромагнитных телах (никель, ковар). Исследования проводились по схеме, приведенной на рис. 1.

Сила вибрации определялась из уравнения Лоренца

$$F = BI, \quad (1)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре;  $I$  – величина тока в детали;  $l$  – длина детали.

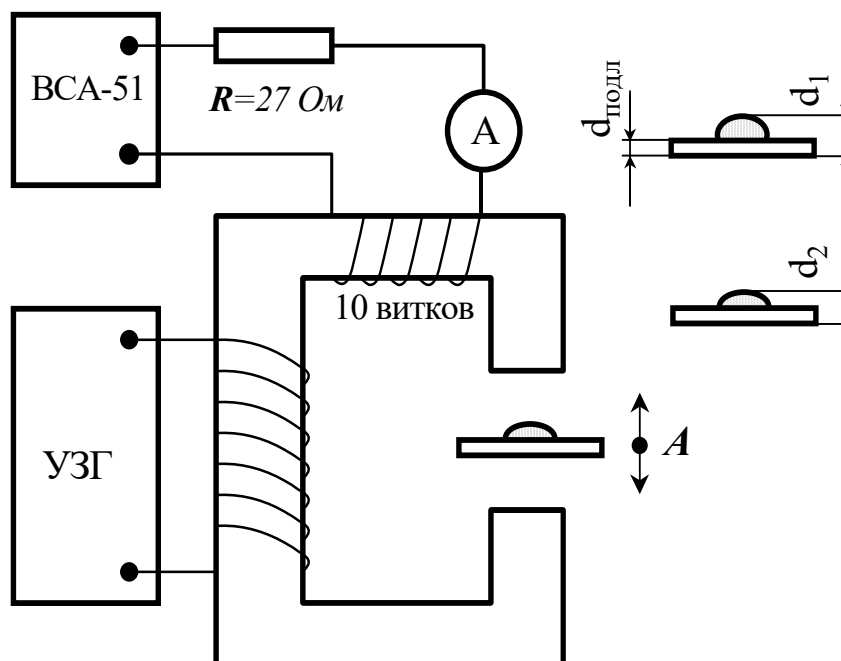


Рис. 1. Схема исследования действия электромагнитных сил

Для расчета индукции магнитного поля приняты следующие данные:  $\mu = 1000$ ,  $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ , напряженность магнитного поля  $H = (0,25 \dots 3,0) \cdot 10^5$  А/м. Тогда индукция магнитного поля  $B = 37,7$  Тл, при внешнем замыкании образца длиной  $2 \cdot 10^{-4}$  м и величине тока в нем  $I = 2$  А электромагнитная сила  $F = 15$  мН. Сила трения образца на поверхности основания определялась по формуле

$$F_{тр} = \alpha F_H = \alpha mg, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент трения;  $m$  – масса детали.

Если коэффициент трения  $\alpha = 0,1 \dots 0,15$ , масса образца 250 мг, то сила трения составляет  $0,3 \cdot 10^{-3}$  Н. Таким образом, сила Лоренца практически в 50 раз превышает силу инерции образца и вызывает его вибрации в магнитном поле индуктора. При массе образца с припоем 500 мг сила трения составит  $0,6 \cdot 10^{-3}$  Н, а превышение силы Лоренца над силой инерции – 25 раз.

Таким образом, электромагнитные силы при локальном индукционном нагреве обладают достаточной величиной, чтобы вытолкнуть деталь из зазора магнитопровода. Эти силы возможно использовать для создания вибраций в процессах пайки деталей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electronics Simulation Software. Ansys [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ansys.com/products/electronics>.
2. Simulation Capabilities. Ansys Maxwell [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell/maxwell-capabilities>.