

УДК 621.365.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ШАРИКОВ ПРИПОЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА



**В.Л. Ланин**

Профессор кафедры  
электронной техники и  
технологии, доктор технических  
наук



**А.Д. Хацкевич**

Магистр технических наук.  
Инженер-электроник  
кафедры ЭТТ



**А.А. Войналович**

Магистрант кафедры ЭТТ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
Email: vlanin@bsuir.by

### **В.Л. Ланин**

Профессор кафедры электронной техники и технологии. Имеет 30 летний опыт работы в области технологии ультразвуковой микросварки. Автор 10 монографий в данной области.

### **А.Д. Хацкевич**

Магистр технических наук. Окончил аспирантуру на кафедре ЭТТ. Инженер-исследователь. Имеет 14 публикаций по данной тематике, три из них входят в перечень ВАК.

### **А.А. Войналович**

Окончил БГУИР по специальности Проектирование и производство программно-управляемых электронных средств. Магистрант кафедры ЭТТ.

**Аннотация.** Рассмотрено применение индукционного нагрева для формирования шариков припоя на контактных площадках печатных плат в 3D электронных модулях. Проведено моделирование распределения плотности магнитного потока и температуры в рабочей зоне индуктора в пакете COMSOL Multiphysics. Предложена структура индукционного устройства на замкнутом магнитопроводе, питаемого от ZVS генератора. Применение индукционных устройств на магнитопроводе позволило повысить эффективность нагрева за счёт концентрации электромагнитного поля в зазоре магнитопровода.

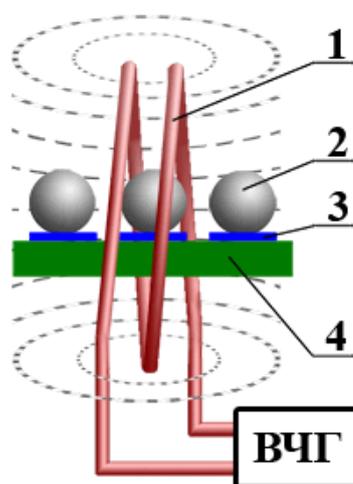
**Ключевые слова:** индукционная пайка, индуктор, инвертор, магнитопровод.

Воздействие энергии высокочастотных (ВЧ) электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев в различных процессах обработки проводящих материалов: термообработке, плавке, упрочнении, сварке, пайке, выращивании кристаллов и т. д. Наиболее важными преимуществами ВЧ-нагрева являются следующие:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в изделии;
- возможны высокая плотность энергии и короткое время нагрева;
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны;
- возможность нагрева в любой среде, включая вакуум или инертный газ;
- высокая экологическая чистота нагрева;
- возможность использования электродинамических сил для улучшения растекания припоя, перемешивания расплава металла и т. д. [1].

Индукционный нагрев основан на использовании трех известных физических явлений: электромагнитной индукции, открытой Фарадеем, эффекте Джоуля и поверхностном эффекте.

Индукционный нагрев применен для формирования шариков бессвинцового припоя диаметром 0,76 мм на контактных площадках платы, имеющих покрытие никелем 10 мкм и золотом 0,05 мкм. Шарики вручную размещались на подложке, а затем вместе с подложкой нагревались в центре витка индуктора (рисунок 1). Частота тока составляла 300 кГц, величина тока варьировалась от 11 до 29 А. Температура оплавления припоя достигалась при токе индуктора 17 А за 12 с и токе 27 А за 3 с [2]. Затем шарики припоя были использованы для присоединения БИС в корпусе BGA к контактным площадкам платы.



1–индуктор, 2–шарик, 3–контактная площадка, 4– плата

Рисунок 1 – Схема индукционного нагрева для формирования шариков припоя:

Прототип установки индукционной пайки шариков припоя в зазоре магнитопроводе выполнен по схеме ZVS генератора работающего в импульсном режиме. Основным преимуществом импульсного режима работы является низкий уровень потерь и высокое значение КПД, что особенно важно для преобразователей среднего и высокого диапазона мощностей. Коммутация силового ключа в индуктивной цепи должна производиться активным способом в любой определенный момент времени. При бесконечно коротком времени переключения динамические потери мощности отсутствуют, и все напряжение падает непосредственно на индуктивности  $L$  коммутируемой цепи. В реальных схемах размыкание ключа, пропускающего ток  $I_S$ , невозможно без преобразования энергии, запасенной в индукторе. Преобразование не происходит только в том случае, когда  $I_S = 0$ . Такое состояние называется пассивным выключением, так как момент перехода через ноль зависит от характера протекания тока в конкретной цепи, а участвующий в нем транзистор является коммутатором нулевого тока ZCS (Zero Current Switch). При нулевом напряжении ( $v_s = 0$ ) включение происходит в «идеальном» режиме без рассеяния мощности. Как и в предыдущем случае, оно является пассивным, поскольку форма напряжения на транзисторе определяется конкретной схемой, и оно принимает нулевое значение только в определенные моменты времени. Работающий таким образом ключ, соответственно, называется коммутатором нулевого напряжения ZVS (Zero Voltage Switch). Структурная схема ZVS генератора представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема ZVS генератора

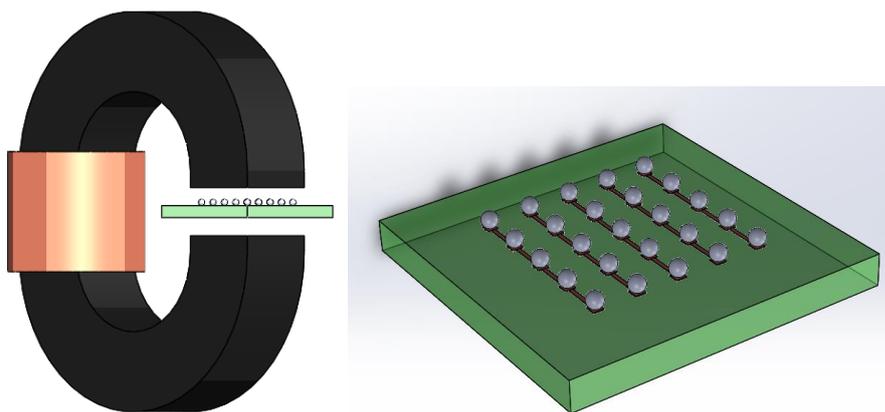
Ключи с коммутацией при нулевом напряжении (ZVS) разрабатываются исходя из возможности активного выключения и пассивного включения при спаде напряжения до нуля ( $v_s = 0$ ). Активное запирающее с малыми потерями достигается благодаря установке параллельно ключу достаточно высокой емкости. По сравнению с режимом HS снижение потерь здесь обеспечивается только при одном способе управления, как и в предыдущем случае: это PSM. Меньший уровень рассеиваемой мощности, однако, позволяет работать на более высоких частотах, чем при «жестком» переключении. Они также могут быть использованы в устройствах с циклическим переключением, примером которых является параллельный резонансный конвертер с форсированным напряжением. Сопротивление  $R_{load}$  определяет активную составляющую нагрузки, включенную последовательно резонансной цепи [3].

### Моделирование тепловых полей шариков припоя

В науке и технике постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Компьютеры позволяют выполнять такие расчеты при помощи приближенных численных методов. Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из них. В последние десятилетия он занял ведущее положение и получил широкое применение. Моделирование плотности магнитного потока и температурных полей выполнено в пакете COMSOL Multiphysics.

Шарики припоя диаметром 0,76 мм закреплялись на контактных медных площадках платы из стеклотекстолита FR4 толщиной 1,5 мм и между контактными площадками проложены медные дорожки толщиной 0,2 мм. Плата находилась в зоне нагрева магнитопровода из ферритов с зазором в магнитной цепи 5 мм.

В результате моделирования получены распределение плотности магнитного потока (рисунок 4) и температурные поля в зоне нагрева (рисунок 5). В оптимальном варианте температура индукционного нагрева шариков припоя достигает 203°C за 45с.



а

б

а – модель индукционного нагревателя с открытым магнитопроводом,

б – печатная плата с шариками припоя

Рисунок 3 – Модель индукционного нагревателя

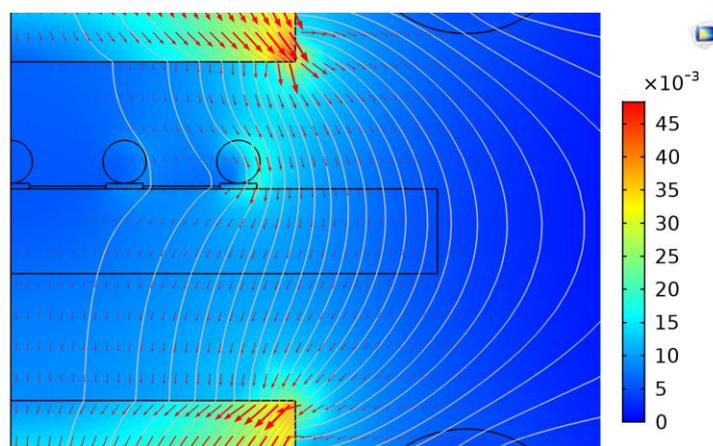


Рисунок 4 – Распределение плотности магнитного потока, Тл

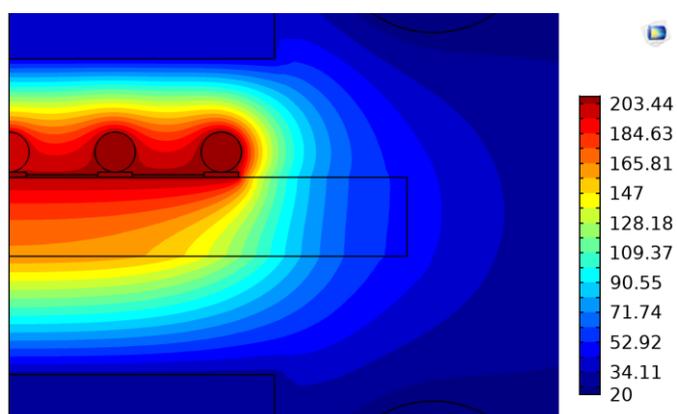


Рисунок 5 – Распределение температуры в зазоре нагрева, °С

Анализ зависимостей температуры шариков припоя от величины тока в индукторе показал, что на более высокой частоте (732 кГц) температура в рабочей зоне растёт быстрее (рисунок 6).

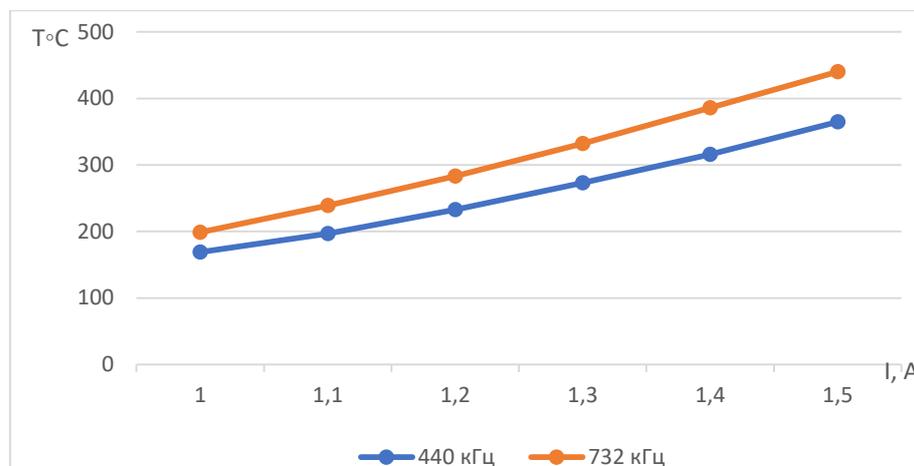
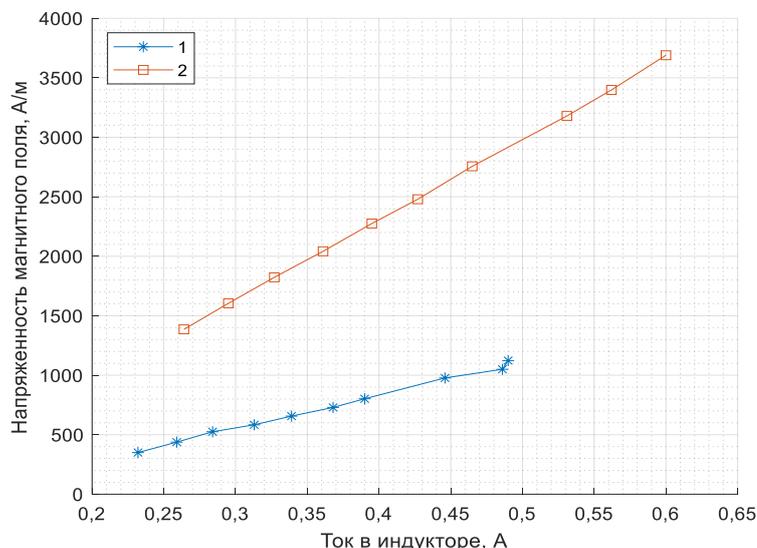


Рисунок 6 – Зависимости температуры шариков припоя от силы тока в индукторе

Полученные данные были сформированы в результате проведения эксперимента.

Напряжённость магнитного поля в зоне нагрева индукторов различного типа была оценена с помощью индуктивного зонда, с длиной стороны  $a$ , присоединённого к электронному вольтметру. Зависимости напряжённости магнитного поля от тока в индукторе и приведены на рисунке 7.



1 – без магнитопровода, 2 – с магнитопроводом

Рисунок 7 – Зависимости напряжённости магнитного поля от тока в индукторе

Напряжённость магнитного поля в зазоре магнитопровода растёт линейно с увеличением тока в индукторе, но в большей степени с использованием магнитопровода.

**Выводы:** преимуществами индукционного нагрева является локальность нагрева, простота конструкции, высокая экологическая чистота нагрева. Применение индукционных устройств на магнитопроводе позволяет повысить эффективность нагрева за счёт концентрации электромагнитного поля в зазоре магнитопровода. Применение концентраторов увеличило равномерность нагрева шариков припоя. Наибольшая скорость

нагрева достигнута при сплошном концентраторе, однако его применение приводит к перегреву платы. Замкнутые конфигурации концентраторов обладают оптимальным временем нагрева и не перегревают платы.

### ***Список литературы***

- [1] Ланин, В.Л. Высокочастотный индукционный нагрев для пайки электронных устройств / В.Л. Ланин // *Технология в электронной промышленности* –2007.-№ 5.– С. 46–49.
- [2] Local Melt Process of Solder Bumping by Induction Heating Reflow / Н. Xu [and etc.] // *Soldering @ Surface Mount Technology*. 2009.– № 4. – Р. 45–54.
- [3] Малоизвестные факты из жизни MOSFET/ IGBT / А. Винтрич [и др.] // *Основы силовой электроники: импульсные режимы работы*. – 2013.– № 2. – С. 46–52.

## **SIMULATION OF THERMAL FIELDS DURING THE FORMATION OF SOLDER BALLS OF INDUCTION HEATING**

***V.L. LANIN***

*Doctor of Technical Sciences  
Professor, Department of  
Electronic System and  
Technology, BSUIR*

***A.D. KHATSKEVICH***

*Engineer-researcher  
Master of technical sciences,  
Electronics engineer, Department  
of Electronic System and  
Technology, BSUIR*

***A.A. VOINALOVICH***

*Undergraduate student  
Undergraduate of the  
department of Electronic  
System and Technology,  
BSUIR*

*Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus  
E-mail: vlanin@bsuir.by,*

**Abstract.** The application of induction heating for the formation of solder balls on the pads of printed circuit boards in 3D electronic modules is considered. The simulation of the distribution of magnetic flux density and temperature in the working zone of the inductor was carried out in the COMSOL Multiphysics. The structure of an induction device based on a closed magnetic circuit, powered by a ZVS generator, is proposed. The use of induction devices on the magnetic circuit made it possible to increase the heating efficiency due to the concentration of the electromagnetic field in the gap of the magnetic circuit

**Key words:** induction soldering, inductor, inverter, magnetic circuit.