

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники

УДК 621.373.826

Ратников

Евгений Сергеевич

**Технология локальной индукционной пайки с микроконтроллерным  
управлением термопрофилем нагрева**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

Научный руководитель

Ланин Владимир Леонидович

профессор кафедры ЭТТ

профессор; доктор технических наук

Минск 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Пайка является неотъемлемой частью производства изделий микроэлектроники, поскольку с продолжением процесса микроминиатюризации от применения некоторых технологий создания соединений приходится отказаться, в связи со сложностью или невозможностью их реализации. Однако, уже существующие методы пайки имеют свои недостатки и путь технического прогресса привел к развитию технологии пайки с применением индукционного нагрева.

Технология локальной индукционной пайки, которая использует энергию высокочастотных магнитных колебаний для высокопроизводительного бесконтактного нагрева, используется относительно недавно, однако, обладает рядом отличительных особенностей и преимуществ, в сравнении с другими методами пайки.

Качество паянных соединений во многом зависит от стабильности параметров и условий пайки. Индукционная пайка обладает уникальной контролируемостью, что позволяет осуществлять контроль за ключевыми параметрами и, в конечном итоге, повышать в значительной степени качество паянных соединений. Если также учесть такие неоспоримые преимущества, как высокая экологическая чистота, локальность нагрева, бесконтактность процесса, высокая скорость нагрева, то локальная индукционная пайка выглядит хорошим кандидатом на роль производительного, экологически чистого и создающего приемлемые рабочие условия.

Исходя из особенностей формирования температурных профилей нагрева при использовании концентрированных потоков электромагнитной энергии, возникает ряд проблем в их практическом применении для локальной индукционной пайки:

- неравномерность нагрева различных компонентов и зон на поверхности платы из-за разной проводимости материалов и массы компонентов;
- необходимость использования как бессвинцовых, так и свинецосодержащих припоев с различной температурой нагрева;
- проблемы защиты SMD компонентов от электромагнитного излучения при их монтаже в электронных модулях.

В диссертационной работе будет дан обзор устройств и методов локального индукционного нагрева, проведено моделирование вихревых токов при индукционном нагреве и экспериментальное исследование термопрофилей локального индукционного нагрева компонентов силовой электроники, разработана методика исследования термопрофилей локального индукционного нагрева и даны практические рекомендации.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Тема диссертационной работы представляет интерес для производителей электронных устройств, поскольку включает в себя информацию об оптимизации локальной индукционной пайки, а также о самой технологии. Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Электронной техники и технологии» в рамках научной программы ГБ № 16-2020 «Материалы, технологические процессы и устройства электронно-оптических систем, электронных средств, биомедицинской и интегральной электроники».

### **Цель и задачи исследования**

Целью данного магистерской диссертации является технология локальной индукционной пайки электронных модулей с микроконтроллерным управлением профилем нагрева.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ устройств и методов локального индукционного нагрева.
2. Компьютерное моделирование распределения вихревых токов в нагреваемых объектах в процессе локальной индукционной пайки.
3. Исследование и оптимизация процесса локальной индукционной пайки с микроконтроллерным управлением термопрофилем нагрева.

**Объектом** исследования являются индукторы локального нагрева на ферритовых магнитопроводах, электронные модули.

**Предметом** исследования является технология локальной индукционной пайки электронных модулей.

**Область исследования** содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй степени (магистратуры) специальности 1-39 80 03 «Электронные системы и технологии»

**Научная новизна и значимость полученных результатов** обусловлены моделированием локального индукционного нагрева в зазоре магнитопровода в пакете Ansys Electromagnetics Suite, определением краевого эффекта при индукционном нагреве, расчета силы Лоренца при локальной индукционной пайке, оценка влияния краевого эффекта и силы Лоренца на процесс индукционной пайки компонентов.

## **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

1. Компьютерные модели распределения вихревых токов при индукционном нагреве в диапазоне 60–250 кГц с учетом краевого эффекта нагрева и динамического воздействия поля на нагреваемые детали в зазоре магнитопровода индуктора, позволяющие получить распределение плотности вихревых токов и сил Лоренца в нагреваемых деталях и тем самым увеличить скорость нагрева в 1.4–1.5 раза в процессах пайки электронных устройств.

2. Методика микроконтроллерного исследования термопрофилей индукционного нагрева концентрированными потоками электромагнитной энергии в частотном диапазоне 22–140 кГц и при величине зазора магнитопровода 1–5 мм в процессах локальной пайки с образованием замкнутых контуров для вихревых токов и дополнительных концентраторов электромагнитного поля.

3. Экспериментально установленные закономерности нагрева концентрированными потоками электромагнитной энергии в процессах локальной индукционной пайки компонентов силовой электроники, определяющие термопрофили нагрева в диапазоне 200–240°C при образовании замкнутых контуров нагрева и использовании бессвинцовых припоев.

## **Личный вклад соискателя**

Все основные научные результаты, представленные в работе, получены соискателем самостоятельно. В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично (7 публикаций). Участие научного руководителя: доктора технических наук, профессора кафедры ЭТТ БГУИР Ланина В. Л. заключалось в обсуждении структуры, целей и задач исследований, обсуждении и обобщении результатов теоретических и практических исследований, проведенных автором самостоятельно. Оригинальность работы по результатам проверки в системе антиплагиат составляет 83%.

## **Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов**

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 55-й и 57-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР, 6-й международной конференции «BIGDATA and Advanced Analytics Conference and EXPO» 2020, международных конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» Могилев 2019, 2021 г., международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2019» Севастополь 2019.

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, из них 6

докладов в материалах научных конференций, 1 статья в периодическом научном журнале Electronics Science Technology and Application Volume-07, Issue-05, 2020.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объем магистерской диссертации составляет 74 страницы, включая 50 иллюстраций, 7 таблиц, библиографический список из 38 наименований, 2 приложения.

Во введении приводится обоснование актуальности работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводятся методы локального воздействия концентрированными потоками для процессов формирования контактных соединений локальной индукционной пайкой, источники локального воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии для процессов локальной индукционной пайки, особенности конструкции современных электронных модулей. Дается обзор устройствам воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии для технологии локальной индукционной пайки.

Вторая глава посвящена разработке методики моделирования, создание математических и физических моделей в программном пакете Ansys Electromagnetics Suite. Производится выбор модели и определение исследуемых параметров системы воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии и оптимизация ее параметров. Проведено моделирование системы воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии в пакете программ ANSYS. Произведены оптимизации параметров воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии для локальной индукционной пайки.

Третья глава содержит разработку макета воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии для локальной индукционной пайки, методику исследования термопрофилей воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии с применением компьютера, методику исследования температурных полей, методику контроля качества паяных соединений электронных модулей.

В четвертой главе диссертации представлены:

- исследование термопрофилей воздействия концентрированными потоками электромагнитной энергии с применением компьютера.
- исследование температурных полей в электронных модулях.
- контроль качества паяных соединений локальной индукционной пайкой.

Пятая глава даёт практические рекомендации по использованию результатов исследования. Даны рекомендации, касающиеся используемого оборудования для исследования локальной индукционной пайки.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников и используя поиск материалов по данной теме в сети интернета, определена перспективность процессов локальной индукционной пайки с микроконтроллерным управлением термопрофилем нагрева при пайке SMD элементов. Индукционный нагрев деталей отличается высокой скоростью, локальностью зоны нагрева, использованию любой газовой среды, автоматизацией процесса. При воздействии концентрированных потоков электромагнитной энергии происходит нагрев деталей за счет вихревых токов, что в свою очередь позволяет использовать этот нагрев для индукционной пайки.

2. Результаты моделирования в пакете Ansys Electromagnetics Suite показывают, что при индукционном нагреве проявляется краевой эффект, который свидетельствует о том, что нагрев по краям детали идет более интенсивно, чем в центре. При повышении частоты с 22 до 66 кГц плотность токов по краям детали увеличилась примерно в 10 раз, использование данного эффекта позволит увеличить скорость нагрева за счет большей концентрации вихревых токов в области нагрева. Проведено моделирование для локальной индукционной пайки детали с замкнутым контуром, скорость нагрева повысилась с 3,0 до 7,0 °C/с, в сравнении с нагревом без замкнутого контура и концентратора скорость нагрева увеличилась более чем в 2 раза. В результате моделирования сил, действующих на деталь, подтверждена возможность отклонения детали из зазора магнитопровода под воздействием этих сил, что может повлиять на качество пайки.

3. Разработанная методика микроконтроллерного исследования термопрофиля нагрева на базе промышленного модуля Data Taker DT-80 позволила с высокой точностью определить и зафиксировать термопрофиль нагрева, а также учесть вибрации, возбуждаемые подачей на дополнительную обмотку индуктора переменного тока частотой 100 Гц, амплитудой до 30 В при величине тока порядка 6 А, что увеличивает растекание бессвинцовых припоев на 20%.

4. Экспериментально установлены термопрофили локального индукционного нагрева силового диода в диапазоне 200–240 °C в зазоре магнитопровода 1–5 мм, силового диода в замкнутом контуре в зазоре магнитопровода, силового диода с концентратором электромагнитного поля в замкнутом контуре. Время пайки с концентратором нагрева в замкнутом контуре составило 35 с, в то время как пайка в зазоре магнитопровода составила 70 с.

5. Для локальной индукционной пайки рекомендуется использовать

индукторы на ферритовом магнитопроводе, индукторы компаний iTherm, UltraFlex. Для повышения скорости нагрева рекомендуется использовать деталь с замкнутым контуром и, при необходимости, концентратор электромагнитного поля, дабы минимизировать зазор магнитопровода и послужить дополнительным источником нагрева. Наиболее перспективным оборудованием является Dragon 15 компании UltraFlex, поскольку позволяет участвовать в автоматизации процессов и обладает высокой гибкостью и быстрой настройкой под различные условия использования.

Библиотека БГУИР

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Ратников Е.С., Краевой эффект индукционного нагрева в зазоре магнитопровода / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии / Материалы Междунар. науч. – техн. конф. 25–26 апреля 2019. – Могилев: Белорус.–Рос. ун-т, 2019. – С. 120–121.

2. Ратников Е.С., Моделирование вихревых токов при индукционном нагреве / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // 55-я Юбилейная Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР 22-26 апреля 2019 года. – С. 371-372.

3. Ратников Е.С., Моделирование краевого эффекта в зазоре магнитопровода при индукционном нагреве / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2019. Труды 14-й Международной НТК. Севастополь 14–18 октября 2019. – С.103.

4. Ратников Е.С., Моделирование индукционного нагрева в воздушном зазоре магнитопровода / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // BIG DATA and Advanced Analytics=BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 13-14 апреля 2020 г. – Минск, БГУИР.– 2020. – С. 59-62

5. Lanin V.L., Effects of Induction Heating in Air Gap of Magnetic Wire / V.L. Lanin, E. S. Ratnikau // Electronics Science Technology and Application Volume-07, Issue-05, 2020, P. 35–37.

6. Ратников Е.С., Исследование индукционного нагрева при пайке силовых диодов / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // 57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, апрель 2021 г. – Минск, БГУИР.– 2021. – С. 239–241.

7. Ратников Е.С., Моделирование силы Лоренца при локальном индукционном нагреве / Е.С. Ратников, В.Л. Ланин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии / Материалы Междунар. науч. – техн. конф. 2021. – Могилев: Белорус.–Рос. ун-т, 2021. – С. 349–350.