

Микрокомпьютерное управление термическими профилями индукционной пайки SMD-компонентов

Сегодня технология поверхностного монтажа является наиболее распространенным методом сборки электронных модулей на печатных платах. С повышением плотности монтажа SMD-компонентов и переходом к бессвинцовым технологиям пайки возрастает интерес к использованию высокоскоростных и контролируемых источников нагрева.

**Владимир Ланин
Александр Хацкевич**

Введение

Одной из первых технологий пайки SMD-компонентов стало применение конвекционных печей, где оплавление припоя осуществлялось за счет нагрева его потоком горячего воздуха. В установках пайки с принудительным конвективным теплообменом тепло к монтируемым платам подавалось посредством конвективной теплоотдачи принудительно перемещающимся с малой скоростью нагретым воздухом. Скорость нагрева в таких системах определяется разностью температур между нагретым воздухом и платой. Вследствие большой тепловой инерционности конвекционные печи имеют конвейер, движущийся с малой скоростью, по которому платы проходят через несколько зон нагрева. Такая технология требует как предварительного нанесения на контактные площадки паяльной пасты, так и приклеивания компонентов к поверхности платы, чтобы при обдуве горячим воздухом не произошло их смещения. Одним из недостатков этой технологии является разогрев до температуры пайки всей платы. В конвекционных печах практически невозможно точно выдерживать температурный профиль пайки корпусов типа BGA [1].

Альтернативными технологиями для пайки SMD-компонентов стало использование концентрированных потоков энергии: высокочастотной (ВЧ) электромагнитной, инфракрасной и лазерной. Применение инфракрасных (ИК) источников позволяет осуществить локальный нагрев, уменьшить время нагрева электронного модуля и снизить риск повреждения SMD-компонентов. Для пайки предназначено два типа ИК-нагревателей: галогенные ИК-лампы, работающие в ближнем ИК-диапазоне, и керамические, работающие в среднем ИК-диапазоне.

Пайка ИК-излучением обеспечивает возможность бесконтактного нагрева на воздухе, в контролируемой газовой среде или в вакууме. Инфракрасная пайка высокопроизводительна, инвариантна к типу паяемого изделия (корпус ИС, печатная плата), экологически чиста (не загрязняет окружающую среду), позволяет программировать режимы нагрева и вести пайку в любой контролируемой атмосфере, нейтральной или защитной.

Технология ИК-пайки имеет ряд преимуществ [2], таких как высокая скорость нагрева, возможность управления термопрофилем, избирательность нагрева, возможность монтажа и демонтажа SMD-компонентов в электронных модулях с плотной компоновкой. Для обоснованного выбора источников ИК-нагрева необходим анализ тепловых полей нагреваемых объектов, оценка влияния расстояния от нагревателя до печатной платы на равномерность и скорость нагрева.

В процессе пайки ВЧ-нагревом тепло генерируется в поверхностных слоях изделия. Глубина нагрева и проникновения тока зависит от частоты тока, электропроводности и магнитной проницаемости паяемого металла. Чем больше используемая частота тока, а также электропроводность и магнитная проницаемость паяемого металла, тем сильнее проявляется поверхностный эффект нагрева. Однако электропроводность и магнитная проницаемость также зависят от температуры нагрева металла, поэтому по мере нагрева паяемого изделия индуктивными токами характер нагрева будет изменяться. С повышением температуры металла скорость нагрева снижается, а глубина нагрева растет. Преимущества ВЧ-нагрева следующие [3]:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в материале изделия;
- возможны высокая плотность энергии и короткое время нагрева;
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны;
- нагрев в любой среде, включая вакуум или инертный газ;
- высокая экологическая чистота нагрева;
- улучшение растекания припоя за счет электродинамических сил.

Однако использовать индукционный нагрев в паяльных устройствах для монтажной пайки стали сравнительно недавно. Индукционный нагрев с помощью специализированной оснастки — индукторов — в диапазоне высоких частот (400–2000 кГц) при отношении глубины проникновения к толщине детали $b/h < 0,5-1,0$ требует значительных удельных мощностей (до 10^6 Вт/м²). Такой нагрев применяют

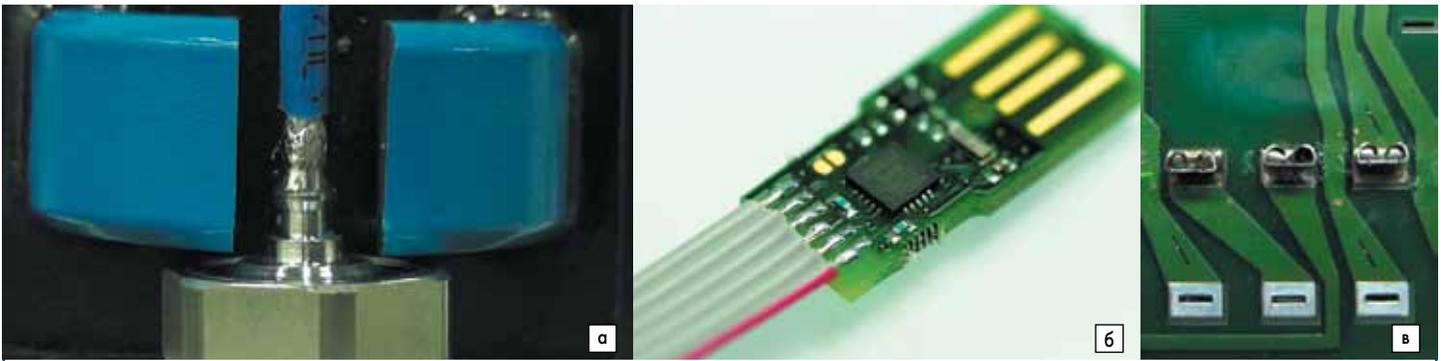


Рис. 1. Пайка: а) коаксиального кабеля; б) проводов; в) силовых контактов

для конструкционной пайки волноводных трактов, коммутационных элементов, твердосплавного инструмента и т. д. Индукторы катушечного типа характеризуются значительным рассеянием магнитного потока, низким КПД и необходимостью электрической и тепловой изоляции от нагреваемых поверхностей деталей.

Индукционные устройства на магнитопроводе способны с высокой точностью поддерживать температуру нагрева деталей при высокой теплоотдаче в процессе монтажной пайки. Максимальная скорость нагрева при оптимальных параметрах ВЧ-нагрева достигает $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, что позволяет реализовать бесконтактный нагрев небольших по размеру деталей в зазоре магнитопровода индуктора.

С переходом на бессвинцовую технологию ключевым требованием к паяльному оборудованию становится стабильность термоуправления, то есть сохранение точности поддержания температуры в течение всего процесса пайки электронных компонентов. Связано это требование с тем, что температура пайки повысилась на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и приблизилась к температуре, предельно допустимой для компонентов. Снижение точности термического профиля нагрева увеличивает риск теплового повреждения компонентов. Традиционные индукционные системы достаточно инерционны, в них затруднено применение в качестве датчика термопары, подверженной электромагнитным наводкам.

Поэтому актуальна разработка микрокомпьютерной системы управления термическими профилями при индукционной пайке SMD-компонентов в электронных модулях и оптимизация технологических режимов монтажа бессвинцовыми припоями и пастами.

Особенности индукционной монтажной пайки

При монтажной пайке прогресс в области индукционного нагрева достигнут за счет новых конструкций индуктирующих устройств и применения мощных полевых транзисторов в ВЧ-источниках питания. Нагрев переменным электромагнитным полем в зазоре магнитопровода индукционного устройства с открытой магнитной цепью обеспечивает

высокую скорость при небольших удельных мощностях, однако сильно зависит от материала детали и геометрических факторов [4].

Использование магнитопровода для концентрации электромагнитной энергии в области зазора позволяет повысить эффективность нагрева. Увеличивается скорость нагрева, локализуется зона нагрева, что существенно при пайке изделий интегральной электроники. Возможность нагрева только локальной зоны предотвращает вытекание припоя из места присоединения деталей. Высокая надежность и повторяемость соединений достигаются вследствие высокой точности контроля мощности ВЧ-генератора, не более 1% от установленного значения уровня мощности и временным разрешением до 100 мс.

Индукционные устройства на разомкнутом магнитопроводе применяются для пайки коаксиальных кабелей, проводов и силовых контактов в электронных модулях при мощности нагрева 250–2000 Вт и времени пайки 2,5–25 с. При пайке трех проводов к плате тепло фокусируется таким образом, что изоляция на проводах не расплавляется (рис. 1).

Высокая эффективность преобразования электрической энергии для большинства процессов термической обработки металлов позволяет заменить установки с ламповыми генераторами мощностью 60 кВт на транзисторные установки мощностью 20 кВт. Установка индукционного нагрева IHS 20-60 (рис. 2) предназначена для всех видов термообработки металлов: пайки, закалки, отжига, а также для плавки цветных и черных металлов и сплавов [5]. В составе установки индукционного нагрева имеются: генератор ВЧ-колебаний (инвертор), блок согласования генератора с нагрузкой, стандартный индуктор, комплект кабелей питания и управления, педаль управления.

Высокочастотный генератор модели DF-UHF-3.2KW предназначен для пайки и термообработки деталей малого размера. В нем используются 1GBT и инвертирующие технологии 3-го поколения, обладающие высокой надежностью и низкой стоимостью. Характеристики индукционных малогабаритных установок приведены в таблице.

При контроле термопрофилей индукционной пайки возникают трудности измерения температуры. Использование термопары ведет к индицированию электромагнитным полем дополнительного тепла в металлических полупроводниках. Термопара не позволяет совершать большое количество измерений в единицу времени, так как обладает тепловой инерцией, что делает невозможным быструю корректировку термопрофиля, когда это необходимо. Вот почему в схемах управления требуются бесконтактные датчики температуры в зоне пайки.

Для управления ВЧ-инверторами нужен микроконтроллер, который задает соответствующий термический профиль пайки и позволяет автоматизировать процесс. Управление ВЧ-инвертором может осуществляться микроконтроллером, который задает определенный режим пайки, изменяя питающее напряжение силового модуля.

Таблица. Техническая характеристика индукционных установок

Модель	IHS 20-60	Elektronika MF 15	DF-UHF-3.2KW
Входное напряжение, В	380	380	220
Выходная мощность, кВт	1–20	10	3,2
Частота, кГц	17–60	30–60	11–40
Ток в индукторе, А	3–15	5–20	5–15
Вес, кг	40	100	20
Габариты, мм	483×202×480	450×1060×520	320×190×400



Рис. 2. ВЧ индукционные установки IHS 20-60



Рис. 3. Микрокомпьютер Raspberry pi 3

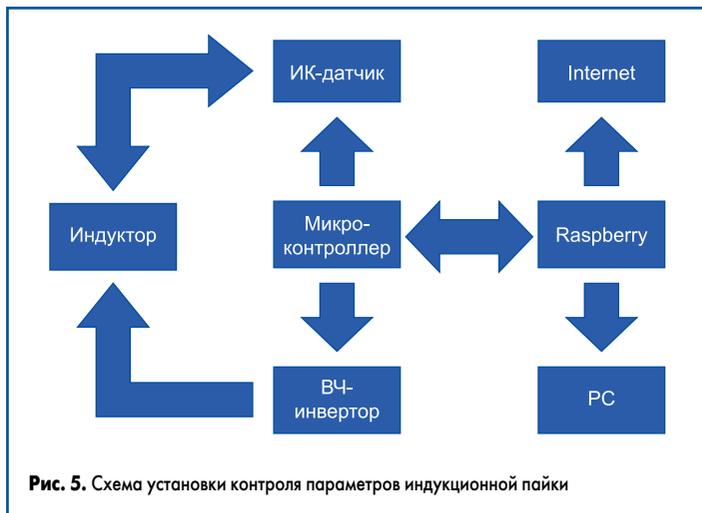


Рис. 5. Схема установки контроля параметров индукционной пайки

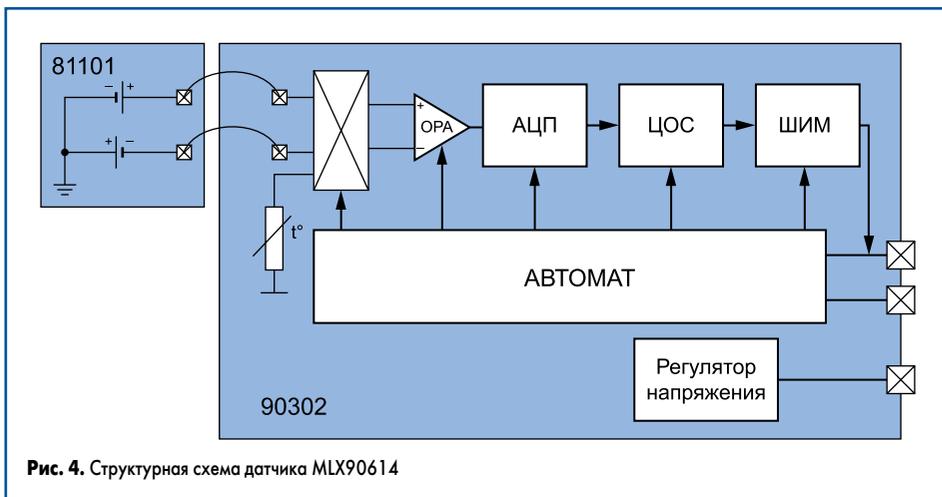


Рис. 4. Структурная схема датчика MLX90614

Широко применяемые контроллеры Siemens, Mitsubishi, Omron предназначены для решения большого спектра задач автоматизации, однако сложное программное обеспечение предполагает наличие серьезного опыта при работе с ними.

Микрокомпьютерная система управления ВЧ-инверторами

Для изменения параметров термопрофиля применен микрокомпьютер Raspberry pi3 (рис. 3) [6], где основная программа позволяет создавать или использовать готовые термопрофили, отправлять информацию на микроконтроллер, выводить графические данные на монитор и передавать сведения по сети Интернет. Raspberry pi3 — это одноплатный компьютер основанный на 64-битном 4-ядерном процессоре ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на однокристальном чипе Broadcom BCM2837. Он имеет:

- оперативную память 1 Гбайт LPDDR2 SDRAM;
- цифровой видеовыход HDMI;
- композитный выход 3,5 мм (4 pin);
- четыре USB-порта 2.0;
- сетевые устройства Wi-Fi 802.11n и 10/100 Мбайт RJ45, Ethernet (Bluetooth 4.1 и Bluetooth Low Energy);
- разъем дисплея Display Serial Interface (DSI);
- видеокмеры MIPI Camera Serial Interface (CSI-2);

- карту памяти MicroSD;
- 40 портов ввода/вывода.

Габариты Raspberry pi 3 — 85×56×17 мм. Для контроля температуры выбран ИК бесконтактный датчик MLX90614, имеющий температурный диапазон измерений $-70...+380\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разрешающей способностью 0,02 $^{\circ}\text{C}$, цифровой интерфейс SMBus, выход ШИМ для непрерывного чтения, напряжение питания 4,5–5 В. Значения датчика оцифровываются 17-битным АЦП и обрабатываются мощным блоком DSP. Структурная схема датчика изображена на рис. 4. Работа датчика MLX90614 координируется внутренним автоматом, который с последующей обработкой контролирует измерения и расчеты температуры объекта и окружающей среды и отправляет данные на выход PWM или совместимый с SMBus интерфейс.

Выход ИК датчика через низкошумный низкочастотный усилитель с программируемым усилением преобразуется с помощью Sigma Delta для одного битового потока и подается на мощный DSP для дальнейшей обработки. Сигнал обрабатывается программируемыми (с помощью EEPROM) фильтрами FIR и IIR нижних частот для дальнейшего уменьшения ширины полосы входного сигнала с целью достижения желаемых характеристик шума и частоты обновления. Выход фильтра IIR является результатом измерения и доступен во внутренней памяти.

Для управления выходным напряжением 0–230 В пропорционально входному сиг-

налу управления выбрано твердотельное реле HD2522.10U) с максимально допустимым рабочим током 20 А. Управление реле HD2522.10U производится напряжением 0–10 В. При работе с токами до 25 А необходимо применение радиатора РТР060.

Для управления ВЧ-инвертором применен наиболее доступный микроконтроллер семейства AVR Atmega328P, который имеет:

- 32-кбайт флэш-память программ с возможностью самопрограммирования;
- 2 кбайт ОЗУ 1 кбайт EEPROM;
- периферийные устройства:
 - два 8-бит таймера/счетчика с модулями сравнения и делителями частоты;
 - 16-бит таймер/счетчик с модулем сравнения и делителем частоты, а также с режимом записи;
 - счетчик реального времени с отдельным генератором;
- шесть каналов PWM (аналог ЦАП);
- 6-канальный ЦАП со встроенным датчиком температуры;
- программируемый последовательный порт USART;
- последовательный интерфейс SPI;
- интерфейс I²C;
- программируемый сторожевой таймер с внутренним генератором.

Устройство контроля параметров индукционной пайки (рис. 5) работает следующим образом. ВЧ-инвертор создает в индукторе вихревое поле, которое разогревает паяемые детали. Температура в зоне нагрева контролируется инфракрасным датчиком MLX90614.

Информация с датчика по шине I²C поступает на микроконтроллер, в котором хранятся данные о температуре, времени нагрева, то есть термопрофиль. Поскольку у Raspberry pi3 нет встроенной памяти, для работы компьютера необходимо подготовить карту памяти с операционной системой. В качестве операционной системы выбрана Raspbian OS, основанная на базе Debian и оптимизированная под Raspberry pi.

Для связи блоков, API и сервисов служит программа Node-Red — open-source-проект IBM. Соединения основаны на использовании графических линий связи, по которым пересылаются сообщения между блоками. Таким образом, связывать различ-

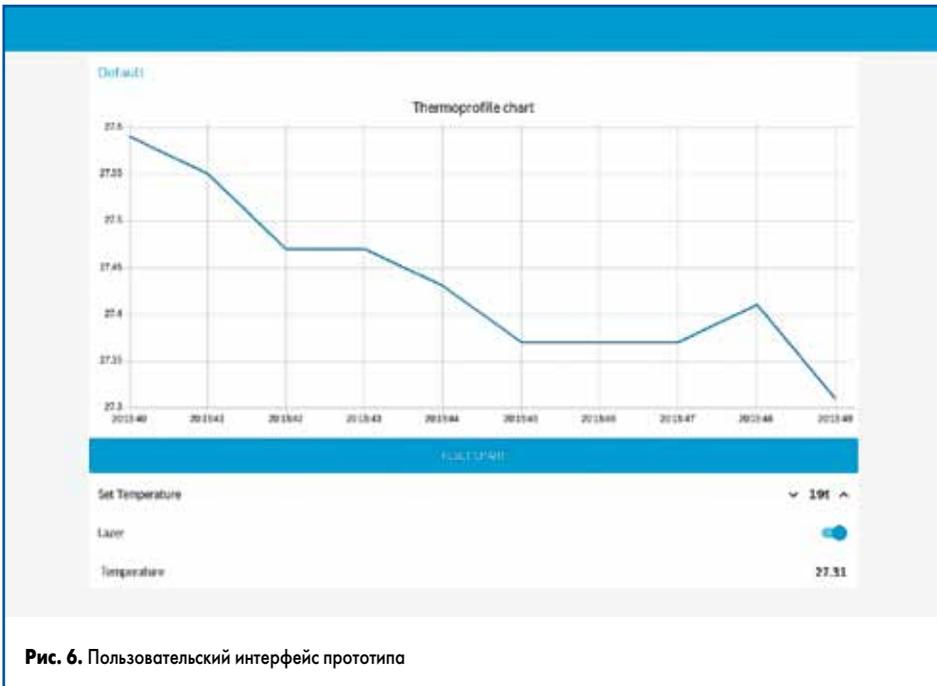


Рис. 6. Пользовательский интерфейс прототипа

ные блоки можно без программирования. Разработка в Node-RED ведется через обычный браузер, а ядро можно запустить на различных платформах — PC, RPi, cloud и т. д. [7].

Визуализация интерфейса для Node-Red осуществляется при помощи стороннего плагина Dashboard. Интерфейс прототипа представляет собой экран, на котором расположен график, показывающий температуру в реальном времени и дополнительные функции для работы установки (рис. 6). Переключатель Set Temperature предназначен для ограничения температуры. Если температура превышает заданную величину, реле автоматически выключается. Переключатель Lazer служит для включения лазера для правильного фокусирования ИК-датчика температуры.

Присутствует поле, показывающее реальную температуру в момент измерения. В установке предусмотрена автоматическая запись всех температурных значений в лог для последующей обработки данных. Кнопка RESET CHART предназначена для сброса значений графика.

Напряжение питания управляющего модуля ВЧ-инвертора поступает из сети и преобразуется до требуемого напряжения с помощью источника питания. Силовой модуль питается от стенда управления, который регулирует

данное напряжение в пределах 0–220 В, тем самым изменяет скорость нагрева изделия. Возможна регулировка частоты управляющих импульсов в диапазоне 60–300 кГц.

Проведены испытания ВЧ-инвертора на двух частотах: 60 и 100 кГц (рис. 7). Как видно из графика, скорость нагрева выше на низкой частоте, где больше глубина прогрева. При разнице частот в 40 кГц максимальная скорость на частоте 60 кГц составила около 50 °C/с, а на частоте 100 кГц — около 30 °C/с.



Рис. 7. Термограммы нагрева ВЧ-инвертором на разных частотах

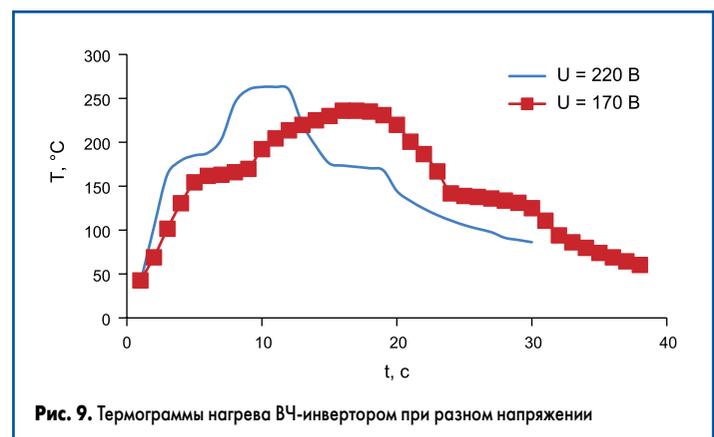


Рис. 9. Термограммы нагрева ВЧ-инвертором при разном напряжении

Для настройки контура индуктора на резонанс тока последовательно индуктору подключена конденсаторная батарея, что позволило создать последовательный колебательный контур на заданной резонансной частоте. По формуле Томпсона рассчитана необходимая емкость батареи конденсаторов. Так, на частоте 60 кГц емкость батареи составила 0,25 мкФ. При настройке контура индуктора в резонанс скорость нагрева возросла до 60 °C/с (рис. 8).

На следующем этапе проведены исследования при разном питающем напряжении ВЧ-инвертора (рис. 9). Скорость нагрева при напряжении питания 170 В уменьшилась почти в 2 раза относительно сетевого напряжения питания.

Благодаря таким качествам ВЧ индукционного нагрева, как локальность, простота конструкции, высокая экологическая чистота и возможность использования электродинамических сил для улучшения растекания припоя, данный вид нагрева оптимален для поверхностного монтажа электронных модулей. С помощью индукционных устройств, выполненных на магнитопроводах, можно также осуществлять пайку силовых контактов, разъемов и проводов на печатные платы, коаксиальных кабелей и герметизацию металлостеклянных корпусов интегральных схем.

Применение программируемых микроконтроллеров и микрокомпьютера позволяет гибко настраивать систему ВЧ-нагрева под различные задачи. Понятный и про-

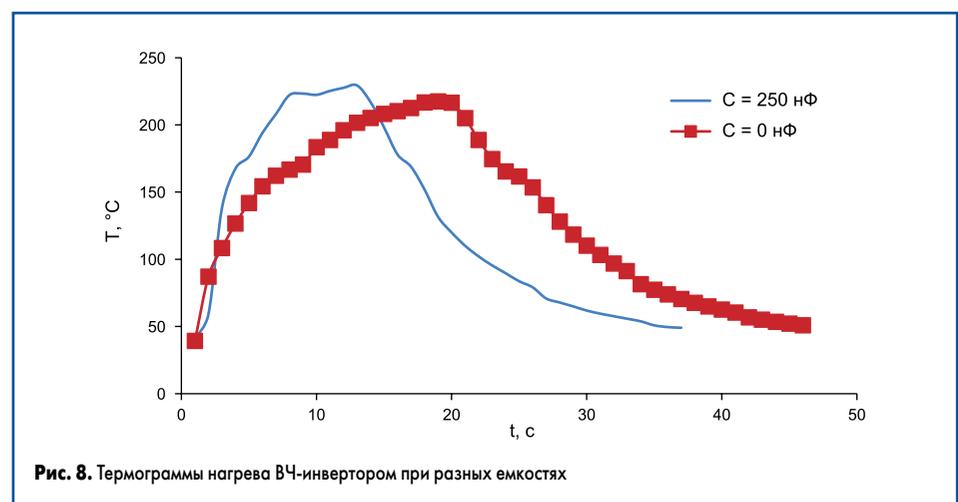


Рис. 8. Термограммы нагрева ВЧ-инвертором при разных емкостях

стой интерфейс обладает функционалом для общения с установкой. Благодаря наличию Wi-Fi в микрокомпьютере установку можно интегрировать в сеть для удаленного управления и контроля терм-профилей.

Литература

1. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip-технологии. М.: ИД «Технологии», 2006.
2. Wassink K.R. J. Soldering in Electronics. Ayr, Scotland: Electrochem, 2002.
3. Ланин В. Л. Высокочастотный электромагнитный нагрев для пайки электронных устройств // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 5.
4. Ланин В. Л. Высокоэффективные индукционные устройства для монтажной пайки в электронике // Технологии в электронной промышленности. 2012. № 1.
5. Установки индукционного нагрева HIS. www.slipstone.ru
6. Raspberry pi3. www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3
7. Node-Red. www.nodered.org