

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН, Ю. Н. ГРИЩЕНКО

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: vlanin@bsuir.by

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПАЙКОЙ КОРПУСОВ МИКРОБЛОКОВ ИЗ ДИАМАГНИТНЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

Для герметизации корпусов СВЧ-микроблоков из диамагнитных сплавов с помощью пайки применены эффекты высокочастотного нагрева – поверхностный, близости и концентрации силовых линий электромагнитного поля. Оптимизированы параметры высокочастотного нагрева, обеспечивающие энергоэффективный и производительный процесс герметизации пайкой легкоплавкими припоями корпусов СВЧ-микроблоков.

Ключевые слова: высокочастотный нагрев, эффекты нагрева, герметизация, корпуса микроблоков, пайка.

Микроблоки с общей герметизацией, предназначенные для работы в СВЧ-диапазоне, нашли широкое применение в аэрокосмической технике, средствах телекоммуникаций, мобильных устройствах управления и др. благодаря своим достоинствам, таким как [1]:

- повышение уровня интеграции и плотности компоновки в 5–10 раз объединением электронных модулей, индикаторных, оптико- и электромеханических устройств, антенн в одном корпусе;

- одновременное применение тонко- и толстопленочных БГИС и микросборок СВЧ-диапазона, пленочной и печатной коммутации, корпусных электронных компонентов, не имеющих аналогов в микроисполнении;

- улучшение тепловых характеристик ввиду значительно большей, по сравнению с корпусами микросборок, поверхностью теплоотдачи корпуса и возможностью использования устройств искусственного охлаждения;

- ремонтпригодность, наличие доступа к регулируемым и подстраиваемым компонентам, внутрислочному монтажу, возможность замены микроплат;

- наличие общего экранирования и возможность реализации межплатного и внутрислотно-го экранирования;

- высокая надежность при наличии прямого внутрислочного монтажа, что исключает два-три структурных уровня электрических соединений и в 7–10 раз уменьшает длину пути электрического сигнала по сравнению с аппаратурой III поколения.

Удельные характеристики микроблоков с общей герметизацией как источников вторичного электропитания следующие: плотность рассеиваемой мощности 1,0–1,5 Вт/см² на поликоре ВК-100-1; 2,0–3,0 Вт/см² на анодированном алюминии. Микроблоки питания применяются в качестве DC/DC-преобразователей бортовой спутниковой аппаратуры мощностью до 120 Вт. Они получают энергию от шины питания постоянным напряжением 20–120 В, соединенной с солнечными батареями, и преобразуют его в напряжение от 3 до 27 В постоянного тока, необходимое для электронной аппаратуры. Преобразователи должны устойчиво работать в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства при дозе до 38 МэВ·см²/год.

В настоящее время до 40% корпусов БИС и микросборок герметизируется пайкой, которой свойственны следующие достоинства: ремонтпригодность изделия, невысокая температура нагрева корпуса в процессе пайки, некритичность требования к плоскопараллельности паяемых кромок, возможность применения групповой технологии. Традиционные процессы пайки в печи или паяльником имеют низкую производительность, в них в значительной мере используется ручной труд, не обеспечивается высокое качество паяемых соединений, также имеются трудности, связанные с использованием флюса и необходимостью удаления его остатков.

Перспективным направлением в технологии производства СВЧ-микроблоков является применение высокочастотной (ВЧ) пайки для герметизации корпусов из алюминиевых сплавов.

Воздействие энергии электромагнитных колебаний позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведенных в них вихревых токов высокой частоты, активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям. Качество соединений, полученных ВЧ-пайкой, зависит от следующих факторов [1]:

- скорости нагрева деталей корпуса и припоя;
- избирательности и равномерности нагрева паяемых деталей;
- регулируемости нагрева во времени.

Наиболее важные преимущества ВЧ-нагрева следующие:

- энергия нагрева создается вихревыми токами непосредственно в изделии;
- возможность получения высокой плотности энергии и короткого времени нагрева;
- локализация нагрева в пределах обрабатываемой зоны;
- возможность нагрева в любой среде, включая вакуум или инертный газ;
- высокая экологическая чистота нагрева;
- электродинамическая активация растекания припоя.

ВЧ-нагрев наиболее эффективен для металлов и сплавов с большими удельным сопротивлением и магнитной проницаемостью (например, никелевые сплавы), которая уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из частоты колебаний. При этом, однако, снижение частоты колебаний увеличивает электродинамический эффект перемешивания расплавленного припоя.

Основными трудностями применения ВЧ-нагрева для процессов герметизации пайкой корпусов микроблоков из алюминиевых сплавов являются низкий КПД нагрева, длительность процесса и значительный нагрев герметизируемого электронного модуля в процессе пайки.

Целью настоящей работы является оптимизация параметров ВЧ-нагрева в процессах герметизации пайкой легкоплавкими припоями корпусов СВЧ-микроблоков из диамагнитных сплавов за счет эффективного использования физических явлений высокочастотного нагрева.

Эффекты ВЧ-нагрева проводящих сред

При ВЧ-нагреве распределение напряженности электрического поля в проводящей среде имеет вид

$$E = E_0 \cdot \exp(-x/\delta), \quad (1)$$

где E_0 – напряженность поля на поверхности;

x – текущая координата;

δ – глубина проникновения поля (толщина скин-слоя).

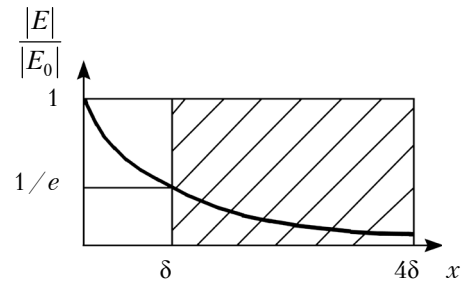


Рис. 1. Распределение напряженности электромагнитного поля

До 86% мощности нагрева создается в поверхностном слое проводящего тела толщиной δ , где амплитуда напряженности поля E_0 уменьшается в e раз (рис. 1). Глубина проникновения поля зависит от частоты тока f , удельного электрического сопротивления материала ρ и магнитной проницаемости μ [3]:

$$\delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная поля.

В процессе пайки микроэлектронных устройств, которые содержат внутри корпуса микроплату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия электромагнитной наводки должна быть значительно меньше энергии деградации элементов, которая составляет 10–15 мкДж [4]. На глубине $x = 4\delta$ напряженность поля ослаблена в 152 раз по сравнению с поверхностью и на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации элементов. Таким образом, при пайке микроэлектронных устройств выбирать частоту необходимо из условия

$$\delta \leq h/4, \quad (3)$$

где h – толщина стенки корпуса.

С учетом выражения (1) получим соотношение для определения нижней частоты тока

$$f_{\min} \geq 4,05 \cdot 10^{-6} \rho / (\mu h^2). \quad (4)$$

Верхний предел частоты следует из требования максимальной величины термического КПД ВЧ-нагрева, когда

$$\delta > h/8, \quad (5)$$

и в таком случае

$$f_{\max} < 16,2 \cdot 10^{-6} \rho / (\mu h^2). \quad (6)$$

Этим условиям удовлетворяет нагрев энергией электромагнитных ВЧ-колебаний в диапазоне частот 0,4–2,0 МГц. С повышением частоты локализуется тепловыделение и снижается температурное воздействие на изделие.

При оптимизации параметров ВЧ-нагрева необходимо оценить энергию электрического поля

в индукторе и внутри корпуса объемом V микроблока по формуле

$$W = \frac{\epsilon_0 E^2 V}{2}, \quad (7)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная,
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

При напряжении на индукторе 1500 В и расстоянии между индуктором и деталью 2 мм напряженность электрического поля составит 750 кВ/м. Тогда энергия электрического поля внутри индуктора объемом $125 \cdot 10^{-6}$ м³ будет равна 300 мкДж, а внутри корпуса микросборки с толщиной стенки 2 мм на частоте 2,2 МГц она уменьшится в 152 раза и составит 1,97 мкДж.

Функциональные сбои аналоговых интегральных схем (ИС) происходят при средней плотности потока мощности порядка 10 мВт/см² ($E = 0,19$ кВ/м) [5]. Поскольку напряжение электрического поля, измеренное рамкой внутри корпуса, составляет 0,44 В, напряженность электрического поля равна 0,0036 кВ/м. Таким образом, напряженность поля ослабляется в 63 раза и является безопасной для аналоговых ИС.

Удельная мощность, выделяемая в слое толщиной δ , составляет [6]

$$p_0 = 0,993 \cdot 10^{-3} H_{\max}^2 \sqrt{pf\mu}, \quad (8)$$

где H_{\max} — максимальная напряженность магнитного поля.

КПД индукционного нагрева определяется как отношение полезной мощности, выделяемой в нагреваемом объекте, к полной активной мощности [7]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_{\Sigma}} = \left(1 + \frac{\sqrt{\rho_1 \mu_1}}{\sqrt{\rho_2 \mu_2}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где P_2 — активная мощность в нагрузке;

P_{Σ} — суммарная мощность системы;

$\rho_{1,2}$, $\mu_{1,2}$ — соответственно, удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость материала индуктора (1) и детали (2).

Если значения удельного электрического сопротивления и диамагнитные свойства индуктора и детали различаются незначительно, КПД индукционного нагрева не превышает 0,6. Для повышения эффективности нагрева используют эффект близости, который заключается в стягивании вихревого тока детали под поверхность индуктора и в концентрации тока индуктора на поверхности проводника, обращенной к индуктору. При малом зазоре h между индуктором и деталью ($h \leq 2-4$ мм) ширина зоны на-

грева на поверхности детали определяется проекцией диаметра индуктора. В случае ярко выраженного эффекта близости можно предположить, что индукционный ток в детали протекает только в малой зоне, ограниченной глубиной проникновения и размерами индуктора, сопротивление которой равно

$$R_d = \rho \frac{l}{\delta L}, \quad (10)$$

где l — периметр детали;

L — ширина зоны нагрева.

Электрическое сопротивление току ВЧ в зоне нагрева можно определить из предположения, что ширина зоны нагрева при малой величине зазора h определяется проекцией диаметра индуктора $D_{и}$ на нагреваемую поверхность, а ее длина — длиной окружности $\pi N D_d$ для круглой детали и периметром Nl для прямоугольной (рис. 2):

$$R_d = 2 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{D_{и}} \sqrt{\rho f \mu}, \quad (11)$$

где N — число витков индуктора.

Используя магнитопровод определенной конструкции, можно создавать концентрацию силовых линий поля на заданной поверхности нагрева проводящего тела (рис. 3).

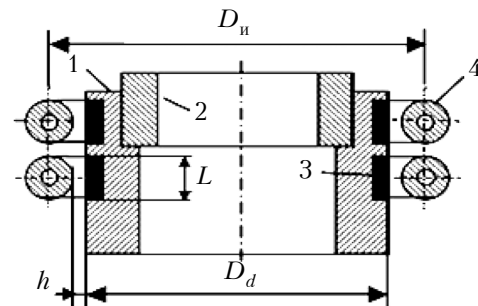


Рис. 2. Схема ВЧ-нагрева при эффекте близости: 1, 2 — детали; 3 — зона нагрева; 4 — индуктор

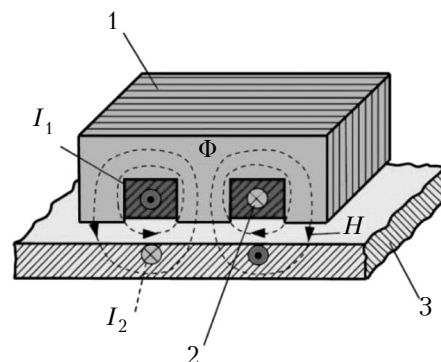


Рис. 3. Концентрация магнитного поля с помощью магнитопровода:

1 — магнитопровод; 2 — индуктор; 3 — нагреваемое тело

Оптимизация параметров ВЧ-нагрева корпусов микроблоков

Параметры ВЧ-нагрева были оптимизированы для СВЧ-микроблока, корпус которого изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т фрезерованием в мелкосерийном производстве или литьем под давлением (рис. 4).

Для герметизации корпуса пайкой легкоплавкими припоями на его поверхность нанесено многослойное покрытие: никель — 15 мкм, медь — 6 мкм, покрытие олово-висмут толщиной 8—9 мкм.

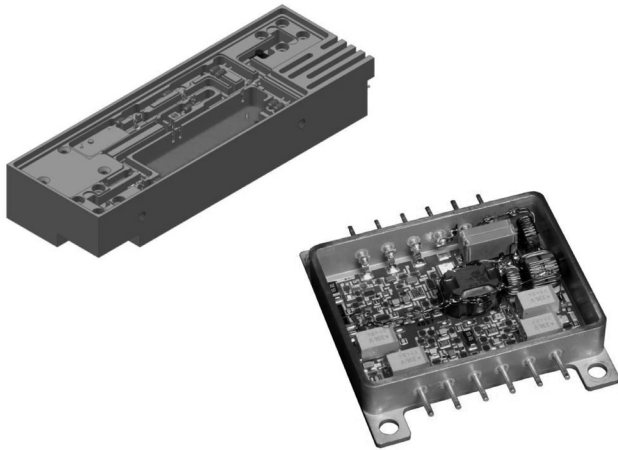


Рис. 4. Различные конструктивные исполнения микроблоков

Схема ВЧ-нагрева для герметизации корпусов микроблоков представлена на рис. 5. Индуктор токов ВЧ был изготовлен из медной трубки диаметром 5 мм и содержал 6 витков.

Измерительная рамка размещается как внутри индуктора, так и внутри корпуса микроблока и соединяется с электронным вольтметром.

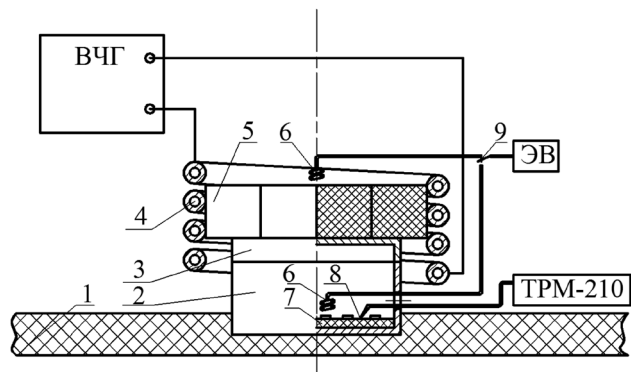


Рис. 5. Схема ВЧ-нагрева для герметизации корпусов микроблоков:

1 — основание; 2 — корпус; 3 — крышка; 4 — индуктор; 5 — магнитопровод; 6 — измерительная рамка; 7 — микроплата; 8 — термопара; 9 — переключатель; ВЧГ — ВЧ-генератор; ЭВ — электронный вольтметр; ТРМ-210 — цифровой измеритель-регулятор температуры

В измерительной рамке наводится ЭДС, величина которой равна

$$\varepsilon = \mu_0 \omega N \pi R^2 H, \quad (13)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

ω — круговая частота;

r — радиус контура круглой рамки.

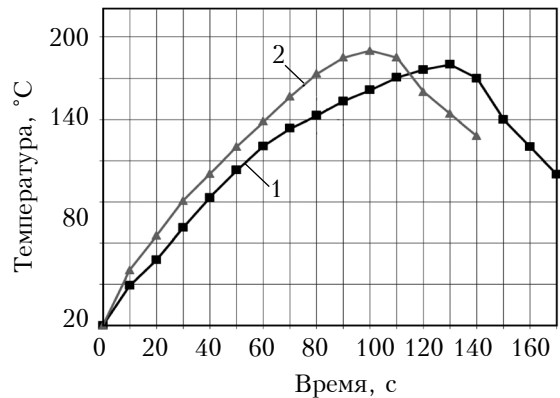
Для квадратной рамки формула для расчета напряженности поля имеет вид [8]

$$H = 1,26 \cdot 10^5 \frac{\varepsilon(\text{В})}{f(\text{МГц}) \cdot a^2(\text{мм}^2) \cdot N}, \text{ А/м}, \quad (14)$$

где a — длина стороны рамки.

Зависимости температуры в зоне пайки припоем ПОС 61 крышки с корпусом, измеренные с помощью термопары, для различных конструкций индуктора приведены на рис. 6, а. Их анализ показывает, что применение ферритового магнитопровода внутри индуктора повышает напряженность магнитного поля в 1,2—1,3 раза за счет концентрации его силовых линий (рис. 6, б), при этом скорость нагрева увеличивается во столько же раз.

а)



б)

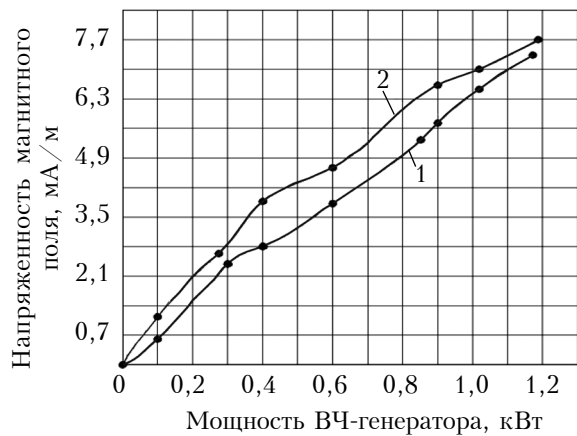


Рис. 6. Зависимости температуры в зоне ВЧ-пайки от времени (а) и напряженности магнитного поля от мощности ВЧ-генератора (б), полученные при использовании индуктора без магнитопровода (1) и с ферритовым магнитопроводом (2)

Заключение

Таким образом, для эффективного ВЧ-нагрева корпусов микроблоков из диаманитных материалов в процессе их герметизации пайкой легкоплавкими припоями необходимо правильно выбирать частоту электромагнитного поля, чтобы исключить повреждение электронного устройства в результате наводок, а также конструкцию индуктора (число витков, наличие магнитопровода). Этим условиям удовлетворяет диапазон частот 0,4–2,0 МГц, в котором на глубине проникновения электромагнитного поля в материал корпуса, равной четырехкратной толщине скин-слоя, напряженность поля ослабляется в 152 раза по сравнению с поверхностью, в этом случае ее величина значительно ниже напряженности наводок, приводящих к деградации элементов.

Для повышения эффективности ВЧ-нагрева необходима концентрация тока индуктора на поверхности корпуса, обращенной к индуктору, что достигается за счет применения магнитопровода из феррита.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Климачев И. И., Иовдальский И. И. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. – Москва: Техносфера, 2006.
2. Lanin V.L. High-Frequency Electromagnetic Heating for Soldering in Electronics // Circuits and Systems. – 2012. – N 3. – P. 238–241. – <https://doi.org/10.4236/cs.2012.33033>.
3. Rapoport E., Pleshivtseva Y. Optimal control of induction heating processes. – USA, NY: CRC Press, 2007.
4. Ricketts L.W., Bridges J.E., Miletta J. EMP radiation and protective techniques. USA, NY: John Wiley @ Sons, Inc., 1976.
5. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучений // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 1. – <http://www.modtop.ru/node/33849>
6. Кувалдин А. Б. Особенности расчета параметров электромагнитного нагрева в ферромагнитной стали // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2014. – № 2. – С. 26–30.
7. Metaxas A. C. Foundation of Electroheat. – USA, NY: John Wiley @ Sons, Inc., 1996.
8. Ланин В. Л., Достанко А. П., Телеш Е. В. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники. – Минск: Издательский центр БГУ, 2007.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 30.05 2018 г.*

В. Л. ЛАНИН, Ю. М. ГРИЩЕНКО

Республика Беларусь, м. Минск,
Белорусский державний университет інформатики і радіоелектроніки
E-mail: vlanin@bsuir.by

**ГЕРМЕТИЗАЦІЯ ПАЙКОЮ КОРПУСІВ МІКРОБЛОКІВ
З ДІАМАГНІТНИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ВИСОКОЧАСТОТНОГО НАГРІВУ**

Основними труднощами застосування ВЧ-нагріву для процесів герметизації пайкою корпусів микроблоків з алюмінієвих сплавів є низький ККД нагріву, тривалість процесу і значне нагрівання електронного модуля, що герметизується, під час процесу пайки.

Метою роботи є оптимізація параметрів ВЧ-нагріву в процесі герметизації пайкою легкоплавкими припоями корпусів НВЧ-микроблоків з діаманитних сплавів за рахунок ефективного використання фізичних явищ високочастотного нагріву.

Ефекти ВЧ-нагріву – поверхневий, близькості і концентрації силових ліній електромагнітного поля – були застосовані для пайки НВЧ-микроблоків в корпусах з діаманитних сплавів. Для забезпечення енергоефективності та продуктивності процесу герметизації пайкою легкоплавкими припоями корпусів НВЧ-микроблоків оптимізовано частоту електромагнітного поля і конструкцію індуктора.

В процесі паяння мікроелектронних пристроїв, що містять всередині корпусу електронні компоненти, чутливі до електричної складової поля, енергія електромагнітного поля всередині корпусу має бути значно менше енергії деградації елементів, при цьому скин-шар сягає глибини проникнення поля, яка еквівалентна чотирьом значенням товщини корпусу.

Для підвищення ефективності ВЧ-нагріву необхідна концентрація струму індуктора на поверхні корпусу, зверненої до індуктора, що досягається за рахунок застосування магнітопроводу з фериту. Застосування феритового магнітопроводу всередині індуктора підвищує напруженість магнітного поля завдяки концентрації силових ліній магнітного поля в 1,2–1,3 рази.

Для ВЧ-пайки оптимальним є діапазон частот 0,4–2,0 МГц, в якому на глибині проникнення електромагнітного поля в матеріал корпусу, що дорівнює чотирикратній товщині скин-шару, напруженість поля послаблюється в 152 рази в порівнянні з поверхнею.

Ключові слова: високочастотний нагрів, ефекти нагріву, герметизація корпусу микроблоків, пайка.

DOI: 10.15222/TKEA2018.?.??
UDC 621.365(075.6)

V. L. LANIN, Yu. N. GRISHCHENKO

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

SEALING BY SOLDERING OF MICROBLOCK PACKAGES MADE OF DIAMAGNETIC ALLOYS USING HIGH-FREQUENCY HEATING

The main difficulties of application of high-frequency (HF) heating for sealing by soldering of microblock packages made of aluminum alloys is the low efficiency of heating, long processing time and considerable heating of the internal electronic module while sealing.

The purpose of this study was to use effectively the physical phenomena of HF heating in order to optimize the HF heating parameters of sealing by soldering using fusible solders of microwave microblock packages made of diamagnetic alloys.

Effects of HF heating (superficial, proximity and concentration of power lines) of the electromagnetic field are applied to sealing using soldering of microwave microblock packages made of diamagnetic alloys. The optimized parameters of HF heating provide energy efficiency and productivity of sealing: frequency of the electromagnetic field and the inductor design.

When soldering microelectronic devices containing electronic parts sensitive to the electric field component, the energy of electromagnetic field in the package should significantly lower than the energy of elements degradation, in which case the skin layer reaches the field penetration depth which is equal to 4 package thickness values. In order to increase the HF heating efficiency, there should be a concentration of the inductor current on the package surface facing the inductor, which is done by using a ferrite magnetic core. Using a ferrite magnetic core inside the inductor concentrates tension of magnetic field due to concentration of power lines of magnetic field in 1,2-1,3 times.

The optimal frequency range for HF soldering is 0,4–2,0 MHz when at electromagnetic field penetration depth into the material of the package equal to 4 thickness values of the skin layer, the field strength is 152 times weaker in comparison with the surface.

Keywords: high-frequency heating, heating effects, sealing, microblock, soldering.

REFERENCES

1. Klimachev I.I., Iovdalysky I.I. SVHc GIS. *Osnovy tehnologii i konstruirovaniya* [Microwave Hybrid Integrated Circuits. Bases of Technology and Designing]. Moscow, Technosphera, 2006, 351 p. (Rus)
2. Lanin V.L. High-Frequency electromagnetic heating for soldering in electronics. *Circuits and Systems*, 2012, no. 3, pp. 238-241. <https://doi.org/10.4236/cs.2012.33033>.
3. Rapoport E., Pleshivtseva Y. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. USA, NY, CRC Press, 2007, 341 p.
4. Ricketts L.W., Bridges J.E., Mileta J. *EMP Radiation and Protective Techniques*. USA, NY, John Wiley @ Sons, Inc., 1976.
5. Kluchnic A.V., Pirogov J.A., Solodov A.V. [Reversible refusals of integrated circuits in fields of radio emissions]. *Radio Electronic Journal*, 2013, no. 1. (Rus)
6. Kuvaldin A.B. Calculation features of electromagnetic heating parameters in ferromagnetic steel. *Industrial electrical heating and electroheating*, 2014, no. 2, pp. 26-30, <http://www.modtop.ru/node/33849>. (Rus)
7. Metaxas A.C. *Foundation of electroheat*. USA, NY, John Wiley @ Sons, 1996.
8. Lanin V.L., Dostanko A.P., Telesh E.V. *Formirovanie tokoprovodyashchikh kontaknykh soedinenii v izdeliyakh elektroniki* [Formation of Current-Carrying Contact Connection in Electronics Products]. Minsk, Publ. center of the BSU, 2007, 574 p. (Rus)