

Универсальный источник питания с цифровой системой контроля параметров гальванической среды

*С.В. Волков, О.Е. Изергин, А.С. Кобзева, М.Д. Кочергин,
Д.В. Вертянов, С.П. Тимошенко*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва

Аннотация: В данной работе описаны результаты моделирования тепловых процессов и воздушных потоков, протекающих в универсальном источнике питания (УИП) с цифровой системой регулирования выходных параметров при заданных условиях эксплуатации. УИП предназначен для проведения научных исследований в области электрохимического осаждения меди с целью формирования сквозных и переходных отверстий печатных плат, трехмерных микросборок, металлизации эпоксидных смол, органических материалов. В статье рассмотрены особенности разработки универсального источника питания, представлены ключевые результаты проектирования и исследования термодинамических характеристик макетного образца.

Ключевые слова: универсальный источник питания, микроконтроллер, система автоматизированного проектирования, печатная плата, коэффициент полезного действия, вычислительная гидродинамика, система автоматизации механического проектирования, система автоматизированного проектирования электронных приборов, проверка проектных норм, метод конечных элементов.

Введение

Гальваническая металлизация, как технологический процесс электрохимического осаждения металлов [1], повсеместно используется при изготовлении различных конструкций печатных плат (ПП). Технологическая операция гальванического осаждения меди [2] обусловлена требованиями по обеспечению больших токов, значение которых может превышать десятки ампер по коммутационной плате или сквозь неё (через переходные отверстия [3]), а также необходимостью отвода тепла от компонентов с высокими показателями рассеиваемой мощности.

Существующие установки гальванической металлизации в своей конструкции (рис.1) имеют резервуар, в котором на катодной штанге качания устанавливается заготовка печатной платы, размещается анод и помещается в

раствор электролита. Анод и катодная штанга подключаются к блоку питания установки, на котором устанавливается требуемое значение напряжения для проведения процесса гальванического осаждения меди.

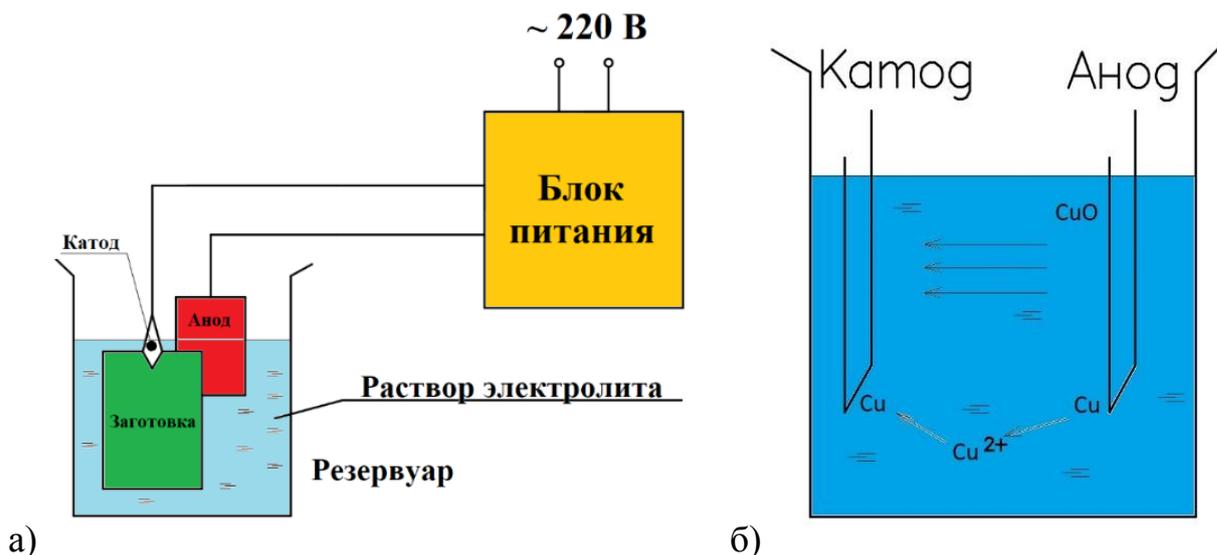


Рис. 1. – Устройство типовой установки гальванической металлизации:
а) Типовая конструкция; б) Основной принцип процесса гальванического осаждения меди

Процесс гальванического осаждения меди проходит в соответствии с законами Фарадея по формуле (1):

$$m = \frac{\int_0^t I(\tau) d\tau}{F} \cdot \frac{M}{z}, \quad (1)$$

где m – масса осажденной на заготовку меди, г.; $\int_0^t I(\tau) d\tau$ – полный электрический заряд, прошедший через вещество за время гальванического осаждения меди t , Ампер·секунда; F – постоянная фарадея, равная 96 485, 33 Кл·моль⁻¹; M – атомная масса иона (для иона меди равна 63,5 г/моль); z – валентное число ионов вещества.

Необходимая масса осажденной меди рассчитывается по формуле (2):

$$(2)$$

где h – высота наращиваемого слоя меди, см; S – площадь наращиваемых проводников в заготовке (определяется по топологическому рисунку проводников), см²; p – плотность меди, равная 8,92 г/см³.

В процессе гальваники поверхность анода окисляется, поэтому в составе электролита присутствует серная кислота, имеющая высокую электропроводность, которая вступает в реакцию с оксидом меди (3):



При этом, в случае изменения концентрации серной кислоты в растворе электролита с 15% до 10% происходит снижение с 0,755 до 0,549 ом-1см-1 электропроводности кислоты, что приводит к увеличению сопротивления раствора и падению тока, протекающего от анода к катоду.

В общем случае установка гальванической металлизации позволяет в ручном режиме включать и выключать подачу напряжения на Анод и Катод установки, регулировать процесс металлизации печатной платы [4], путем корректировки электрических параметров (тока, напряжения), изменяющих в процессе работы установки.

Однако, данная система не позволяет производить автоматическую корректировку выставленного значения тока, изменяющегося под действием химических реакций, проходящих в резервуаре установки, а также осуществлять мониторинг параметров процессов, протекающих внутри системы во время проведения гальванической металлизации [5].

Для решения существующих проблем предлагается использование микроконтроллерного устройства управления [6] в устройстве универсального источника питания (УИП), которое также позволит расширить функции типового источника питания и установки гальванической металлизации за счет применения программного обеспечения, включающего алгоритмы цифрового регулирования выходных параметров (рис.2).

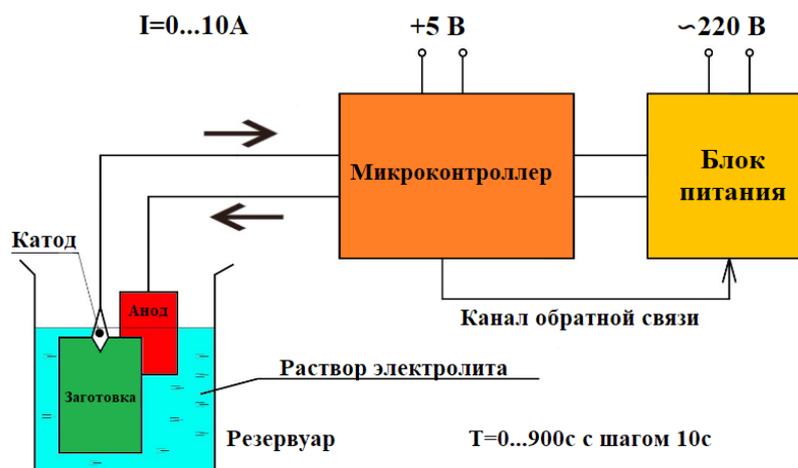


Рис. 2. – Блок-схема модернизированной установки

УИП был разработан средствами системы автоматизированного проектирования электронных средств (САПР) «Expedition Enterprise» компании Mentor Graphics, преимуществом которой является подход проведения сквозного маршрута проектирования систем на основе многослойных печатных плат (МПП) с применением инструментария для верификации топологии с толстой металлизацией. В составе данного САПРа присутствует программная среда для проведения анализа вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics - CFD), суть которого заключается в проведении инженерных расчетов, в частности, распределения тепла, динамики воздушных потоков.

Вначале были определены технические параметры УИП, которые позволят добиться нужных функциональных характеристик его работы:

- Входное напряжение, В - ~ 220 ;
- Выходной ток, А - до 45;
- Выходное напряжение, В - от 0 до 30;
- Выходная мощность источника питания, Вт - 1300;
- Коэффициент мощности, не менее - 0,98;
- Эффективность коэффициента полезного действия (КПД) в номинальном режиме - $\geq 90\%$.

С опорой на конструктивно-технологические ограничения, схему электрическую принципиальную и перечень элементов, была разработана послойная топология плат устройства, создана модель сборки, выведены gerber-файлы для передачи на производство.

С точки зрения технической реализации топологии, была проведена настройка ограничений для трассировки путём задания ширины проводников различных цепей (сигнальных, питания), диаметра переходных отверстий:

- ширина проводников (сигнальных цепей) - 0,10; 0,25; 0,25 мм;
- ширина проводников (цепи питания и земли) - 1; 1,5; 2,5 мм;
- диаметр переходного отверстия - 0,6 мм.
- класс точности - 3.

Следует также отметить, что были созданы классы цепей и проведены дифференциальные пары, реализация которых исходит из расчетов токов и сопротивлений.

Формирование структуры слоев проводилось с включением пары слоев из материала диэлектрика - СТФ-2-105-0,08, между которой располагается препрег - FR4 106+106 0,100. Составление подобного конструктивного решения позволит добиться оптимальных габаритов для конечного изделия.

На следующем этапе были заданы габариты плат модулей, произведена расстановка компонентов, осуществлена трассировка печатных плат с верификацией на соответствие топологическим требованиям посредством модуля проверки проектных норм (Design Rule Checking - DRC).

Таким образом, с помощью системы автоматизации механического проектирования (Mechanical Computer Aided Design - MCAD), была спроектирована общая конфигурация проекта УИП, в оснащение которой были заложены ранее спроектированные платы модулей с помощью системы автоматизированного проектирования электронных приборов (Electronic Computer Aided Design - ECAD) (рис.3).

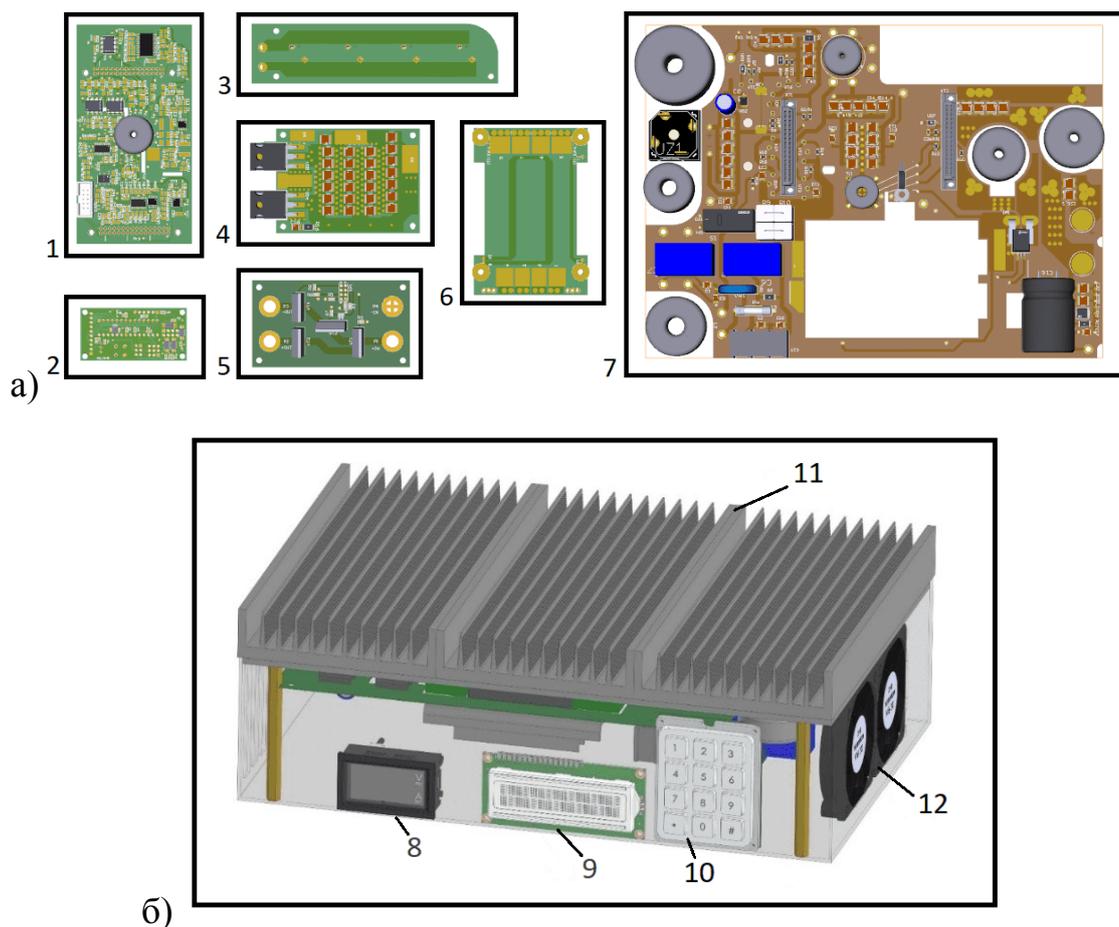


Рис. 3. – Сборка УИП: а) комплекс электронных модулей: модуль управления (1), микроконтроллерный модуль управления (2), конденсаторный модуль (3), модуль выпрямления (4), инвертирующий модуль (5), планарный трансформатор (6), силовой модуль (7); б) внешний вид корпуса УИП: вольтметр-амперметр (8), ЖК дисплей (9), клавиатура (10), радиатор (11), вентилятор (12)

В итоге, габариты разрабатываемого УИП составили - 300x200x75 мм.

Хочется отметить особенность построения ключевого компонента УИП – трансформатора. Зачастую, конструкция классического трансформатора обладает громоздкими габаритами, что вызывает трудности в конструирование источников питания, поэтому для решения этой проблемы предлагается использование трансформатора планарного типа, который при небольших габаритах обеспечивает нужный потенциал по мощности.

Конструкция планарного трансформатора выполнена в виде многослойной печатной платы (МПП), представляющей из себя структуру, на которой образованы первичная и вторичная обмотки (рис.4). Следует отметить, что в качестве межслойной изоляции используется полиимидная пленка [7].

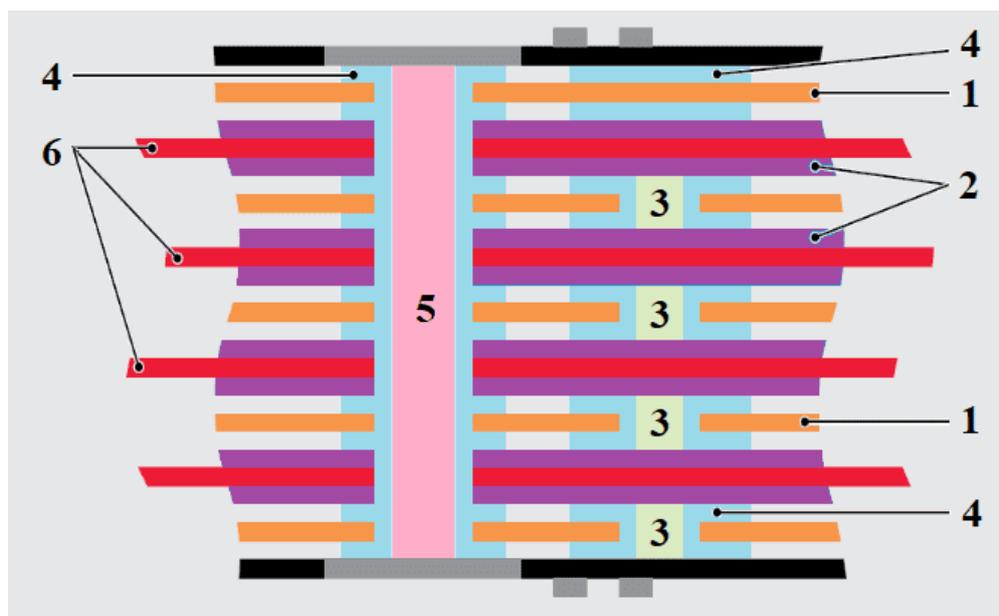


Рис. 4. – Сечение структуры слоёв МПП обмотки трансформатора на основе фольгированного полиимида: 1 – полиимидная пленка, 2 – препрег, 3 – межслойное переходное отверстие, 4 – элементы токопроводящие, 5 – сквозное переходное отверстие, 6 – межслойная изоляция

На каждом слое формируется параллельно-последовательное расположение витков первичной/вторичной обмоток, позволяющее реализовать чередование слоев с витками при разном их количестве. Главной особенностью технологии изготовления обмоток на основе фольгированной полиимидной пленки является использование процесса травления полиимида при формировании переходных отверстий, преимуществом использования которого является уменьшение диаметра отверстий, а также сокращение общей площади МПП по сравнению с традиционной технологией.

Можно отметить, что действующий отвод тепла от функциональной части устройства осуществляется с использованием внешнего радиатора, а с учетом мощностного потенциала реализуемого изделия, возникает потребность в использовании активной системы охлаждения.

Следовательно, обеспечение нормального теплового режима является немаловажной задачей, которая прорабатывается с этапа проектирования УИП, когда испытываются разные варианты конструкции и компоновки элементной базы. Также здесь возникает необходимость исследования работы устройства, путем оценки адекватности его работы на базе критериев. Это позволит выявить слабые стороны текущего варианта конструкции, и определить пути для их дальнейшей проработки, начиная от выдвижения определенных конструктивно-технологических требований, и заканчивая симуляцией процессов, происходящих во время работы устройства при высокой нагрузке и заданном диапазоне температур.

Объектом данного исследования выступает универсальный источник питания (УИП) с цифровой системой регулирования выходных параметров, который предназначен для проведения научных исследований в области электрохимического осаждения, при использовании в составе установок для проведения гальванического процесса.

Исследование макетного образца УИП подразумевает анализ физико-математических зависимостей, описывающих электрические, тепловые, конвекционные процессы, происходящие в трехмерном пространстве, при заданных критических условиях работы системы. Средства конечного элементного анализа, базирующихся на методе конечных элементов (МКЭ), позволят провести данные комплексные исследования в области решении задач прикладной физики, направленные на получение научно-обоснованных технических и методических решений, способствующих созданию моделей теплофизических процессов [8].

В ходе исследования были получены результаты моделирования воздушных потоков и тепловых процессов путем симуляции работы трехмерной модели конструкции УИП, разработанной с помощью САПР с CFD-анализом.

Моделирование осуществлялось с различными вариантами конструкции, а именно - с использованием активного и пассивного варианта охлаждения электронного устройства, с учетом условий окружающей среды, когда обеспечивается работа устройства при оптимальных показателях.

Для моделирования были заданы следующие начальные условия:

1) Термодинамические характеристики:

- температура окружающей среды - $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- давление - 101,325 кПа;
- ускорение свободного падения - $9,8 \text{ м/с}^2$;

2) Физические параметры материалов:

- материал корпуса: алюминиевая пластина несущая АМг2М;
- материал планарного трансформатора: фольгированный полиимид;
- материал плат модулей: FR4;
- материал профильного радиатора АВ0702: алюминий марки АД31.

В общей совокупности были определены параметры среды, локальные области, учитывающие переменчивый характер протекания моделируемого процесса, а также учтены следующие физические модели: теплопроводности, течение физических сред (жидкости, газа), прочности, электромагнетизма, и заданы параметры материалов наиболее теплонагруженных компонентов.

В рамках определения градиента температур было проведено моделирование процессов распределения температуры на примере трехмерной модели конструкции УИП, разработанного с помощью САПР с CFD-анализом [9] (рис.5).

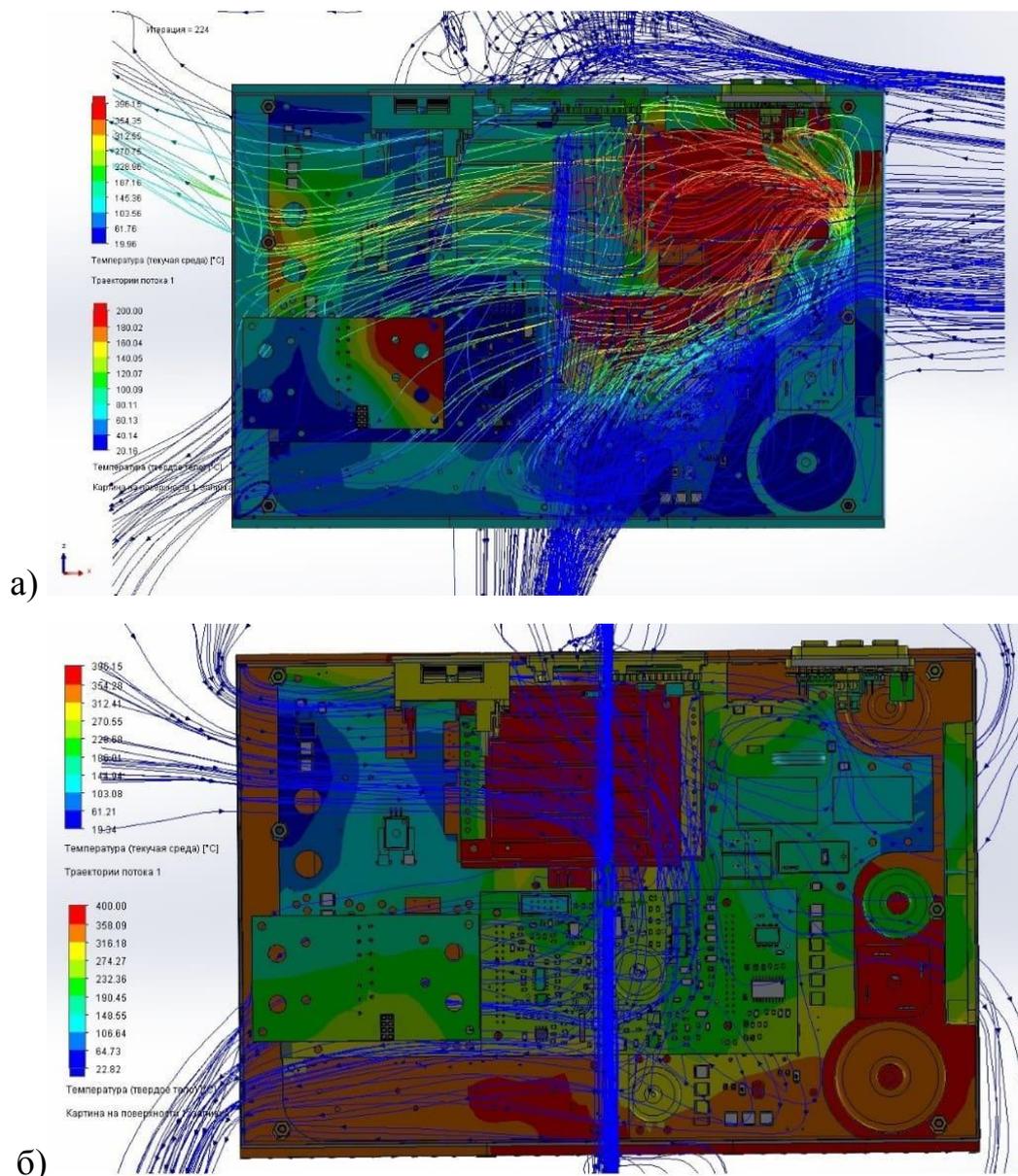


Рис. 5. – Распределение температуры УИП в заданном диапазоне температур при разных вариантах охлаждения: а) активное; б) пассивное

Исходя из полученных результатов моделирования тепловых процессов, протекающих на конструктивных элементах УИП, было выявлено основное выделение мощности на трансформаторной плате, поскольку производится трансформация энергии с разными потенциалами. Это, в свою очередь, позволяет оценить критические показатели установленного диапазона распределения температур для заданного теплового режима работы УИП [10].

В нашем случае вариант конструкции с активным охлаждением позволяет добиться снижения температурных показателей на компонентах УИП суммарно примерно на 10 – 20 °С.

В статье представлены результаты физико-математических расчетов конструкции универсального источника питания с цифровой системой регулирования параметров, выраженные в математических зависимостях САПР с CFD-анализом. Выполненные расчёты тепловых и воздушных потоков доказывают целесообразность применения системы охлаждения в конструкции УИП, поскольку наблюдается снижение температурного градиента в целом [11]. Это соответствует нормализации распределения тепла по всему объему занимаемого устройства для определенного диапазона температур эксплуатации: -40 до 60 °С [12].

Таким образом, по результатам моделирования тепловых и воздушных процессов, происходящих при работе универсального источника питания мощностью до 1300 Вт с цифровой системой регулирования выходных параметров, удалось выявить наиболее подходящие режимы работы источника питания с учетом эффективности применения активной системы охлаждения, а также определить вектор модернизации конструкции, путем сокращения массогабаритных показателей, за счет применения функциональных модулей, таких, как планарный трансформатор.

Литература

1. Терешкин В., Фантгоф Ж., Григорьева Л. Гальваническое меднение при производстве печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2005. Том 2. № 2. С. 20-22.
2. Naba T., Suzuki H., Yoshida H., Akahoshi H., Chinda A. Selective and anisotropic copper electroplating using copper overburden with an inhibiting additive // Electrochemical and Solid-State Letters. 2010. Vol.13. № 5. pp. 23-25.

3. Ермолаев Е.В. Способ формирования межслойных переходов в многослойной металлокерамической плате. Патент на изобретение № 2610302 С2., МПК H05K 3/42: № 2015127394: заявл. 07.07.2015: опубл.: 09.02.2017. URL: patents.google.com/patent/RU2610302C2/ru?q=ru2610302.

4. Ильин В.А. Химические и электрохимические процессы в производстве печатных плат. Москва. 1994. С. 35-57.

5. Васильева Н.Г., Грачева Л.Н. К вопросу автоматизации технологического процесса нанесения гальванических покрытий на примере анодного оксидирования // Технические науки: традиции и инновации. Челябинск: Два комсомольца. 2012. С. 58-62.

6. Конев В.В., Обухов А.Г., Созонов С.В. Разработка универсальной системы сбора данных с функциями управления на основе аналогово-цифрового преобразователя // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3156.

7. Petrov V., Vertyanov D., Timoshenkov S., Nikolaev V. Surface treatment of polyimide film for metal magnetron deposition in vacuum // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2014. pp. 1-9.

8. Румянцев А.В. «Метод конечных элементов» - Калининград. 1995. С. 14-16.

9. Clough R.W. The finite element method in plane stress analysis. J. Struct. Div., ASCE, Proc. 2nd A.S.C.E. Conf. on Electronic Computation. 1960. pp. 345-378.

10. Вертянов Д.В., Беляков И.А., Погудкин А.В., Тимошенко С.П., Сидоренко В.Н. Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 28-40.

11. Дьяченко А.С., Руденко Н.Н. Исследование и моделирование динамики потерь тепла // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4105.

12. Чугунов Е.Ю., Тимошенко С.П., Погалов А.И., Вертянов Д.В. Конструирование и расчеты трёхмерных микроэлектронных модулей с высокой степенью интеграции компонентов // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2020. № 2. С. 42-48.

References

1. Tereshkin V., Fantgof Zh., Grigoreva L. *Technologii v elektronnoj promyshlennosti*. 2005. Tom 2. № 2. pp. 20-22.

2. Haba T., Suzuki H., Yoshida H., Akahoshi H., Chinda A. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2010. Vol. 13. No. 5. pp. 23-25.

3. Ermolaev E.V. *Sposob formirovaniya mezhslojnyx perexodov v mnogoslujnoj metallokeramicheskoj plate*. [Method of formation of vias in a multilayer cermet board]. Patent na izobretenie № 2610302 C2, МПК H05K 3/42: № 2015127394: заявл. 07.07.2015: опubl. 09.02.2017. URL: patents.google.com/patent/RU2610302C2/ru?q=ru2610302.

4. Ilin V.A. *Ximicheskie i elektroximicheskie processy v proizvodstve pechatnyx plat*. [Chemical and electrochemical processes in the production of printed circuit boards]. Moskva. 1994. pp. 35-57.

5. Vasileva N.G., Gracheva L.N. *Texnicheskie nauki: tradicii i innovacii*. 2012. pp. 58-62.

6. Konev V.V., Obuxov A.G., Sozonov S.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2015. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3156.

7. Petrov V., Vertyanov D., Timoshenkov S., Nikolaev V. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2014. pp. 1-9.



8. Romyancev A.V. «Metod konechnyx elementov». [Finite element method]. Kaliningrad, 1995. pp. 14-16.
9. Clough R.W. The finite element method in plane stress analysis. 1960. pp. 345-378.
10. Vertyanov D.V., Belyakov I.A., Pogudkin A.V., Timoshenkov S.P., Sidorenko V.N. Izvestiya vuzov. Electronics. 2022. T. 27. № 1. pp. 28-40.
11. Dyachenko A.S., Rudenko N.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4105.
12. Chugunov E.Yu., Timoshenkov S.P., Pogalov A.I., Vertyanov D.V. Elektronnaya texnika. Seriya 3. Mikroelektronika. 2020. № 2. pp. 42-48.