

УДК 621.396.69

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.032](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.032)

Алгоритм оптимизации размещения элементов печатного узла с учетом тепловых режимов работы устройства

С.У.Увайсов¹, В.В.Черноверская¹, И.А.Флорова²

Дао Ань Куан¹, Занг Ван Тхань¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Российская Федерация
chernoverskaya@mirea.ru

Резюме: Задача оптимального размещения электрорадиоэлементов на монтажной плоскости печатного узла является одной из ключевых в вопросах обеспечения надежности и качества разрабатываемых электронных устройств. При ее решении специалисту приходится работать в пространстве противоречивых показателей, условий и ограничений. Для обеспечения нормальных тепловых режимов, например, необходимо учитывать значения рассеиваемой элементами мощности, их рабочие температуры, принимать во внимание тот факт, что компоненты различаются массогабаритными параметрами и характеристиками материалов. Подобные задачи необходимо решать и при обеспечении механической прочности разрабатываемого узла, и решении вопросов электромагнитной совместимости. Учитывать эти аспекты необходимо уже на ранних стадиях проектирования, поскольку они напрямую влияют на эксплуатационные характеристики готового изделия. В статье представлен алгоритм решения оптимизационной задачи размещения элементов на печатном узле с учетом температурных значений элементов и рассеиваемых ими мощностей, позволяющий улучшить тепловые режимы работы устройства без использования дополнительных конструктивных решений и средств принудительного охлаждения. Инструментом для разработки алгоритма послужили специализированные системы автоматизированного проектирования, включающие средства инженерного анализа и расчетов, а также высокоуровневый язык программирования C#. Материалы статьи представляют практическую ценность для разработчиков радиоэлектронных устройств, решающих задачи обеспечения их надежности и эксплуатационных характеристик на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, печатный узел, алгоритм размещения элементов, моделирование, оптимизация, электрорадиоэлемент, система автоматизированного проектирования, температурный режим, надежность

Для цитирования: Увайсов С.У., Черноверская В.В., Флорова И.А., Дао Ань Куан, Занг Ван Тхань. Алгоритм оптимизации размещения элементов печатного узла с учетом тепловых режимов работы устройства. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1079> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.032

An algorithm for optimizing the placement of the printing unit elements taking into account the thermal operating modes of the device

S.U.Uvaysov¹, V.V.Chernoverskay¹, I.A. Florova²

Dao An Kuan¹, Zang Van Than¹

¹MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russian Federation
²National Research Technological University "MISIS", Moscow, Russian Federation
chernoverskaya@mirea.ru✉

Abstract: The problem of optimal electrical radioelements placement on the mounting plane of the printed circuit assembly is one of the key ones in ensuring the reliability and quality of the electronic devices being developed. When solving it, a specialist has to work in a space of conflicting indicators, conditions and restrictions. To provide normal thermal conditions, for example, it is necessary to consider the values of the power dissipated by the elements, their operating temperatures, take into account the fact that the components differ in weight and size parameters and characteristics of materials. Similar tasks must be dealt with both when securing the mechanical strength of the developed unit and when addressing the issues of electromagnetic compatibility. These aspects must be regarded at the earliest stages of design as they directly affect the performance of the finished product. The article presents an algorithm for handling the optimization problem of placing elements on a printed circuit board with due regard for the temperature values of the elements and the power dissipated by them, which makes it possible to improve the thermal modes of the device operation without using additional design solutions and forced cooling means. The tool for developing the algorithm was specialized computer-aided design systems, including engineering analysis and calculation tools, as well as the high-level C # programming language. The materials of the article are of practical value for developers of radio-electronic devices, solving the problem of ensuring their reliability and performance characteristics at all stages of the product life cycle.

Keywords: radioelectronic device, printed circuit assembly, element placement algorithm, modeling, optimization, electric radioelement, computer-aided design system, temperature regime, reliability

For citation: Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Florova I.A., Dao An Kuan, Zang Van Thanh. An algorithm for optimizing the placement of the printing unit elements taking into account the thermal operating modes of the device. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1079> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.032 (In Russ).

Введение

Электроника прочно вошла в жизнь современного человека и сопровождает его практически во всех сферах деятельности, поэтому требования к надежности, безопасности и эргономичности электронных устройств неизменно возрастают, поскольку отказы электронного оборудования могут привести к непоправимым последствиям: спровоцировать аварии на производстве и транспорте, нарушить информационный обмен и телекоммуникации, изменить привычный ход событий.

Традиционно термин «надежность» ассоциируется со свойством технического объекта выполнять заложенные в нем функции в заданных условиях применения, сохраняя во времени допустимые значения всех параметров, т. е. надежность является комплексным показателем, объединяющим в себе как качественные, так и количественные характеристики объекта. Задача обеспечения высокой надежности электронного средства должна формулироваться на начальных стадиях разработки и поддерживаться на всех этапах его жизненного цикла [1].

Характерная особенность радиоэлектронного средства (РЭС) заключается в том, что в процессе его функционирования значительная часть энергии устройства (50-90 %) преобразуется в тепловую, т. е. РЭС является источником теплоты. Следовательно, еще на этапе проектирования радиоэлектронного средства наряду с другими задачами необходимо решать задачи обеспечения нормального теплового режима [2].

Тепловой режим РЭС зависит от пространственно-временного распределения температуры в нем. Такой режим определяется конструкцией устройства (наличием и

расположением внутренних источников тепла) и температурой окружающей среды. При выборе вариантов размещения элементов стремление снизить массогабаритные параметры РЭС может привести к увеличению удельной рассеиваемой тепловой мощности. Нормальная работа РЭС возможна только при условии поддержания температуры ЭРЭ в допустимых пределах, т. к. свойства большинства элементов зависят от температуры. Воздействие высоких температур может приводить к внезапно возникающим или постепенно проявляющимся изменениям, которые нередко оказываются необратимыми. Для иллюстрации температурных воздействий на Рисунке 1 показаны зависимости интенсивности отказов от температуры и нагрузки элементов электронных схем.

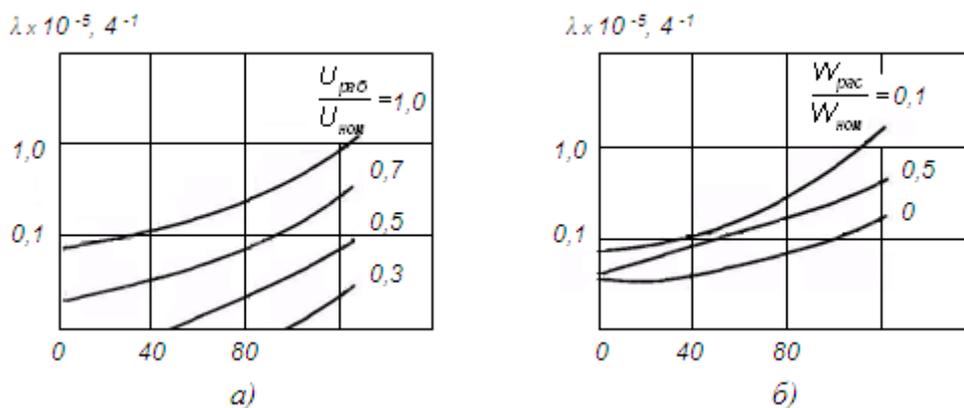


Рисунок 1– Графики зависимости интенсивностей отказов:

а) конденсаторов от температуры окружающей среды t^o , отношения рабочего напряжения $U_{раб}$ к номинальному $U_{ном}$;

б) углеродистых резисторов от температуры и отношения рассеиваемой мощности $W_{рас}$ к номинальной $W_{ном}$

Figure 1– Graphs of the dependence of the failure rates of:

a) capacitors on the ambient temperature t^o , the ratio of the operating voltage $U_{раб}$ to the nominal $U_{ном}$;

b) carbon resistors from the temperature and the ratio of the dissipated power $W_{рас}$ to the nominal $W_{ном}$

Известно, что если температура р-п-переходов полупроводниковых устройств ниже предельно допустимой на 10°C , то число отказов уменьшается в два раза. Отсюда следует необходимое требование, чтобы температура переходов всегда была ниже предельной.

В практике проектирования РЭС применяются различные конструктивные методы снижения тепловой нагрузки на элементы, которые, как правило, приводят к функциональному усложнению устройства, повышению его энергопотребления и включению дополнительных операций в технологический процесс производства, что неизменно сказывается на конечной стоимости изделия [6, 7].

В представленной работе приведены результаты исследования о возможности повышения надежности конструктивных узлов РЭС путем формирования в них однородного теплового поля на основе оптимального варианта размещения элементов на печатном узле (ПУ) электронного устройства.

Математическая модель процесса оптимизации размещения ЭРЭ для обеспечения рабочих тепловых режимов печатного узла

Основным критерием улучшения начального варианта размещения ЭРЭ является уменьшение разности температур между ними, что можно описать целевой функцией:

$$F(T) = \Delta T = (T_{max} - T_{min}); F(T) \rightarrow min. \quad (1)$$

Для решения задачи был разработан алгоритм оптимального размещения ЭРЭ, включающий процедуру равномерного начального распределения элементов по блокам на основе значений рабочих температур ЭРЭ, последующего объединения блоков в две группы и парных перестановок между этими группами для оптимизации целевой функции. Число блоков было принято четным, их линейные размеры определялись топологией печатного узла, размером дискреты (площадью посадочного места под самый миниатюрный ЭРЭ) и количеством распределяемых элементов. Следует отметить, что каждый новый вариант размещения проверялся в САПР на возможность трассировки проводников и соблюдения конструктивно-технологических ограничений топологии ПУ.

Алгоритм предполагает выполнение предварительного этапа по подготовке исходных данных, которыми являются значения температур ЭРЭ. Для этого было выполнено схемотехническое моделирование устройства в среде NI Multisim и получены значения рассеиваемых мощностей ЭРЭ, а построение 3D-модели печатного узла и расчет значений температур элементов – в САПР SolidWorks.

Первая часть алгоритма – равномерное начальное распределение – представлена на Рисунке 2. Ее суть заключается в упорядочивании ЭРЭ в порядке убывания их температур и последующем распределении по блокам так, чтобы температуры разных блоков отличались друг от друга незначительно.

Процесс работы описывается следующим образом: на первом шаге требуется расположить элементы массива в порядке убывания температуры; на втором шаге первый элемент упорядоченного массива помещается в первый блок, второй элемент помещается во второй блок, и так далее, k -й элемент помещается в k -й блок. Затем $(k+1)$ элемент тоже помещается в k -й блок, $(k+2)$ элемент - в $(k-1)$ блок, $(k+3)$ элемент помещается в $(k-2)$ блок и так далее; $(k+k)$ элемент помещается в первый блок, $(k+k+1)$ элемент тоже помещается в первый блок, $(k+k+2)$ элемент помещается во второй блок и так далее. В результате такого распределения всех элементов массива получаются блоки с незначительно различающейся температурой. Следует отметить, что чем больше элементов в блоке, тем меньше разность температур между блоками. Наименьшая разность температур достигается при одинаковом количестве элементов в блоках.

Вторая часть алгоритма - парные перестановки блоков между двумя группами. В результате начального распределения элементов схемы были сформированы две группы: группа А, содержащая блоки, обозначенные $a_1, a_2, \dots, a_i \dots, a_g$. и группа В, содержащая блоки, обозначенные $b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_h$. Задача - поменять местами два блока из разных групп таким образом, чтобы разница суммарных температур между двумя группами $\Delta T_{\Sigma} = T_A - T_B$ стала минимальной, т.е. достичь экстремума целевой функции [3]. Аналитическая модель для данного случая может быть представлена в виде двудольного графа, поскольку множество его вершин имеет разбиение на два непересекающихся подмножества А и В, а каждое ребро графа соединяет вершины из различных подмножеств (Рисунок 3).

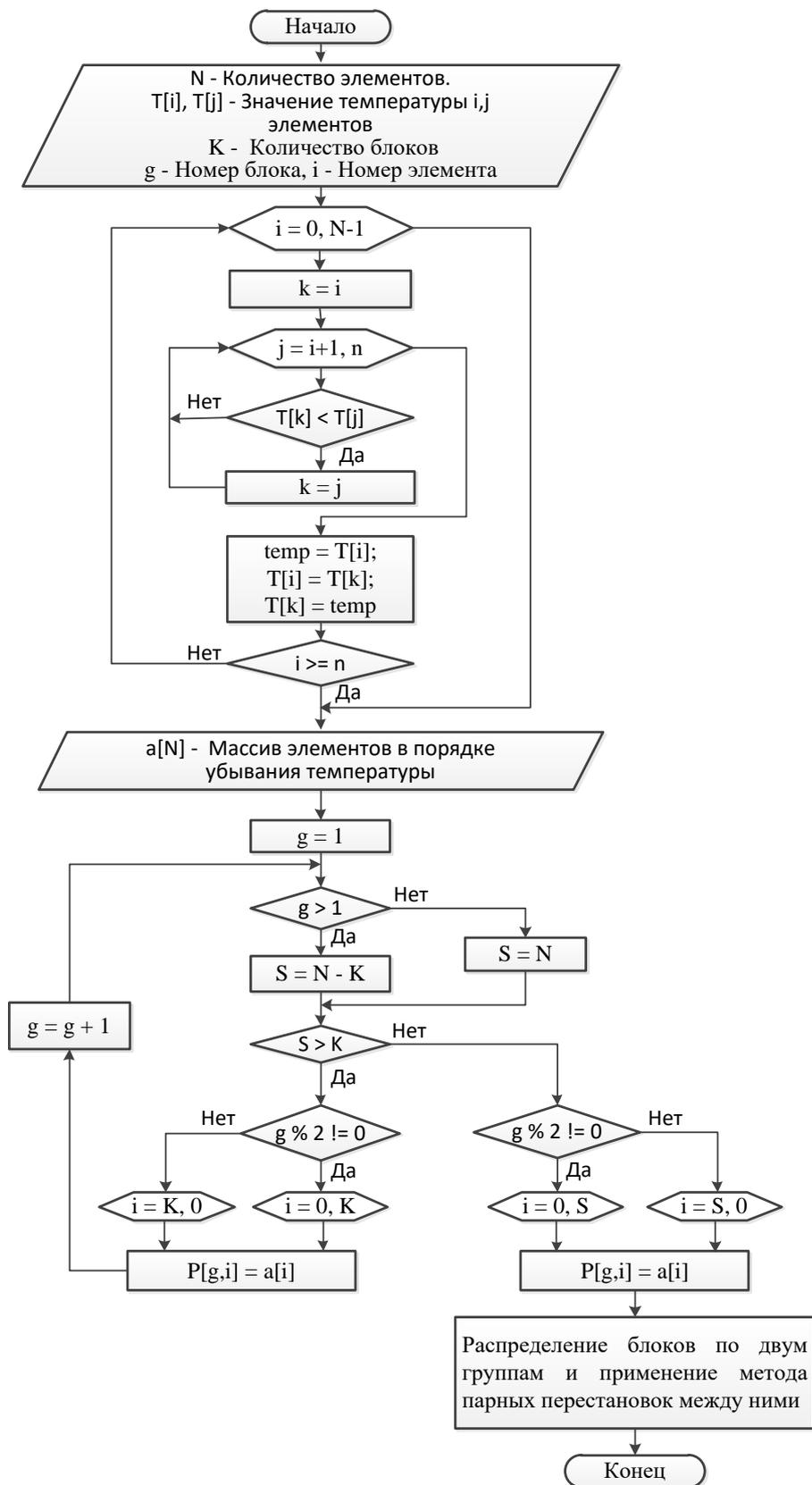


Рисунок 2 – Алгоритм равномерного начального распределения элементов по блокам
Figure 2 – Algorithm of uniform initial distribution of elements in blocks

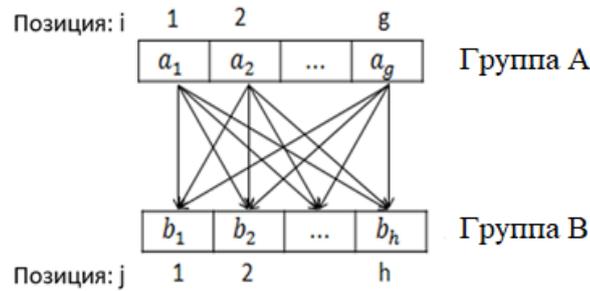


Рисунок 3 – Схема парных перестановок между двумя группами
Figure 3 – Scheme of paired permutations between two groups

Алгоритм выполняет последовательный перебор паросочетаний блоков из разных групп на предмет возможности их обмена для минимизации целевой функции. Перестановка, при которой достигается наименьшая разница температур между группами, фиксируется. В результате получают две новые группы А' и В' с наименьшей разницей температур. Если никакая из перестановок не приведет к уменьшению значения ΔT_{Σ} , то обмен производиться не будет (Рисунок 4).

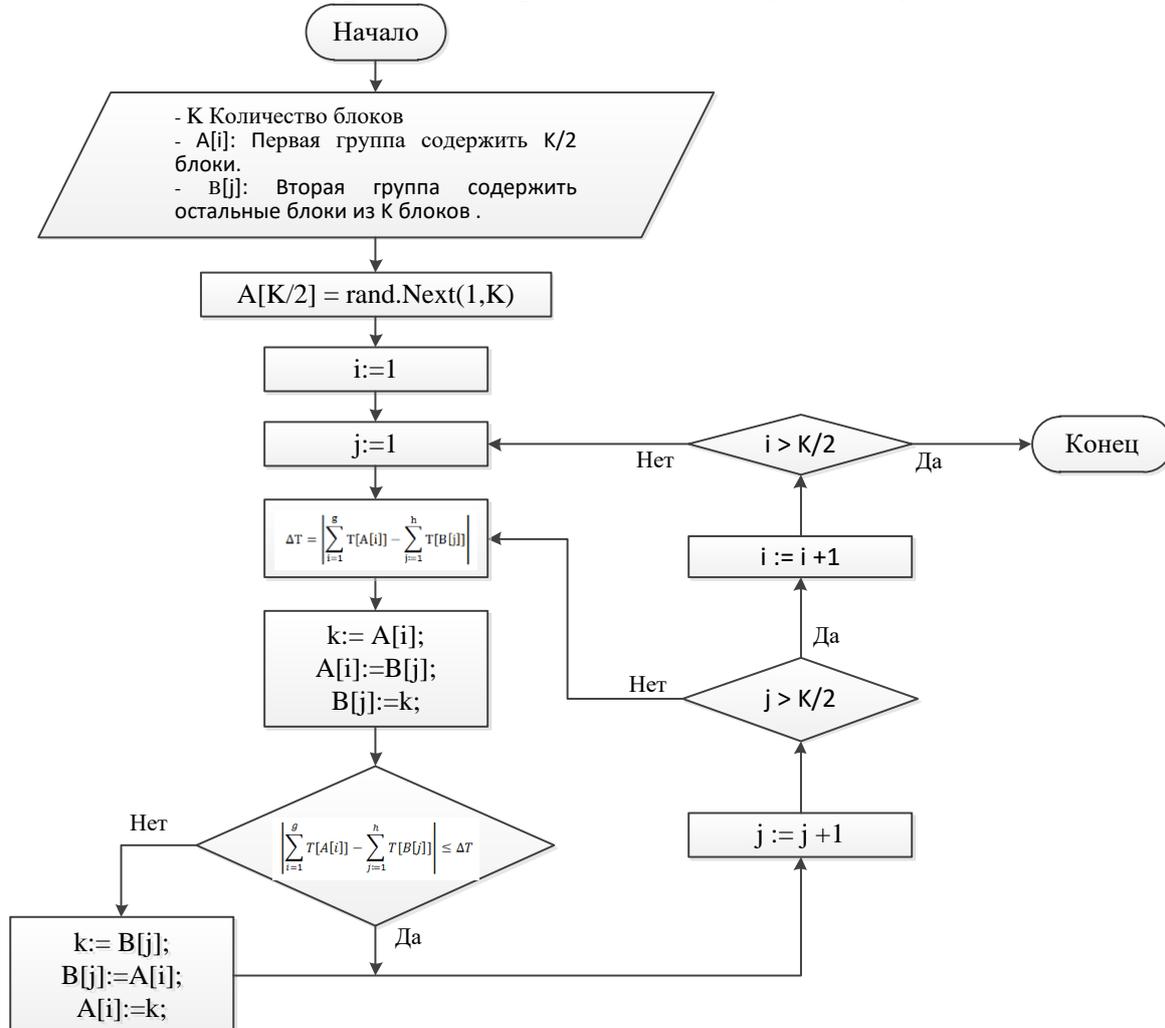


Рисунок 4 – Алгоритм парных перестановок между двумя группами для оптимизации размещения элементов на печатных узлах по температуре
Figure 4 – Algorithm of paired permutations between two groups to optimize the placement of elements on printed nodes by temperature

Экспериментальное исследование

Объектом для исследования послужил двухтактный усилитель HI-FI УМЗЧ 120 Вт с выходным каскадом на составных транзисторах, электрическая схема которого представлена на Рисунке 5, а результаты моделирования характеристик в среде NI Multisim – на Рисунке 6. Схема содержит 40 элементов с различающимися значениями мощностей рассеивания.

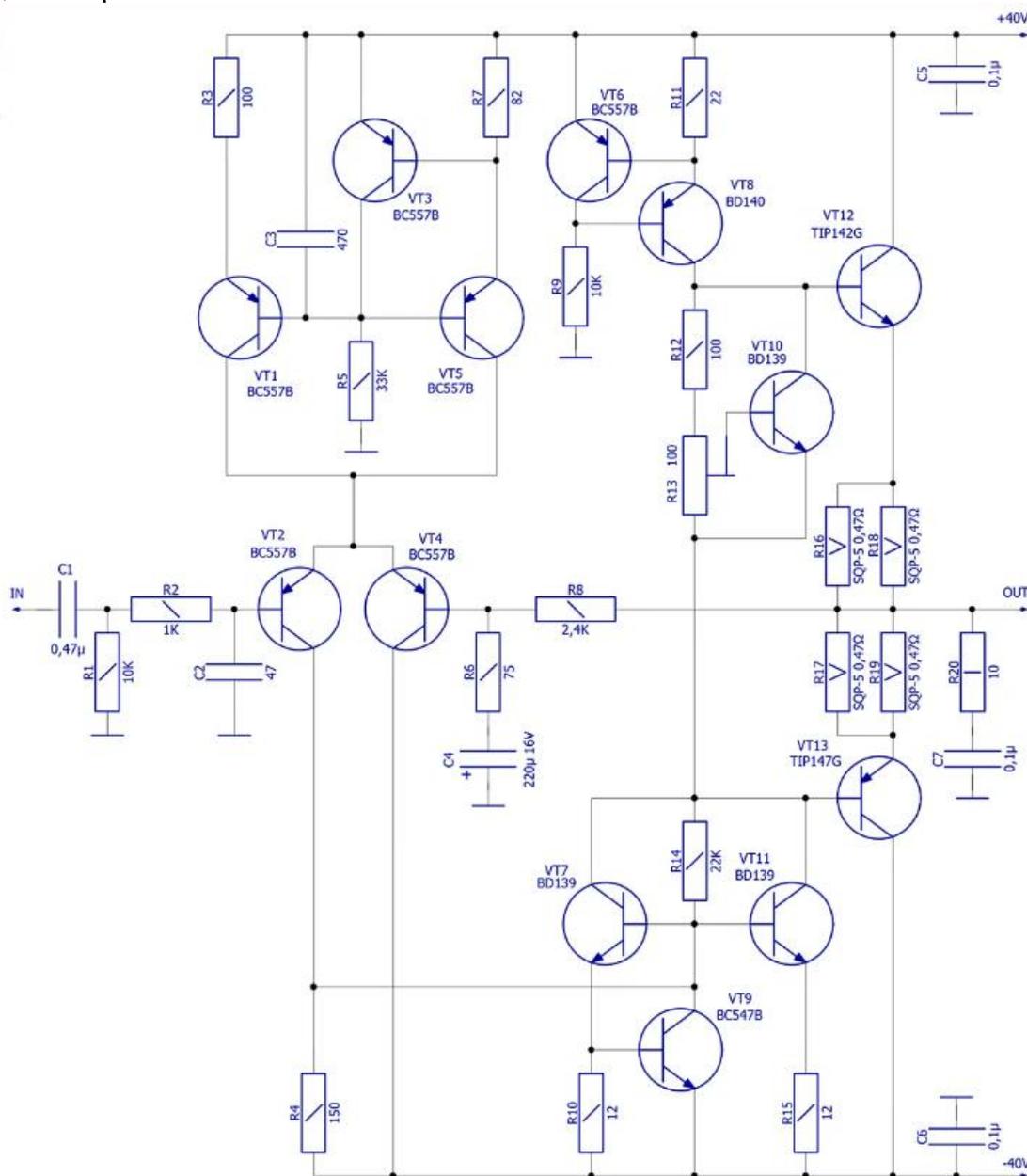


Рисунок 5 – Схема электрическая принципиальная HI-FI УМЗЧ 120 Вт с выходным каскадом на составных транзисторах

Figure 5 – Electrical schematic diagram of HI-FI UMZCH 120 W with an output stage on composite transistors

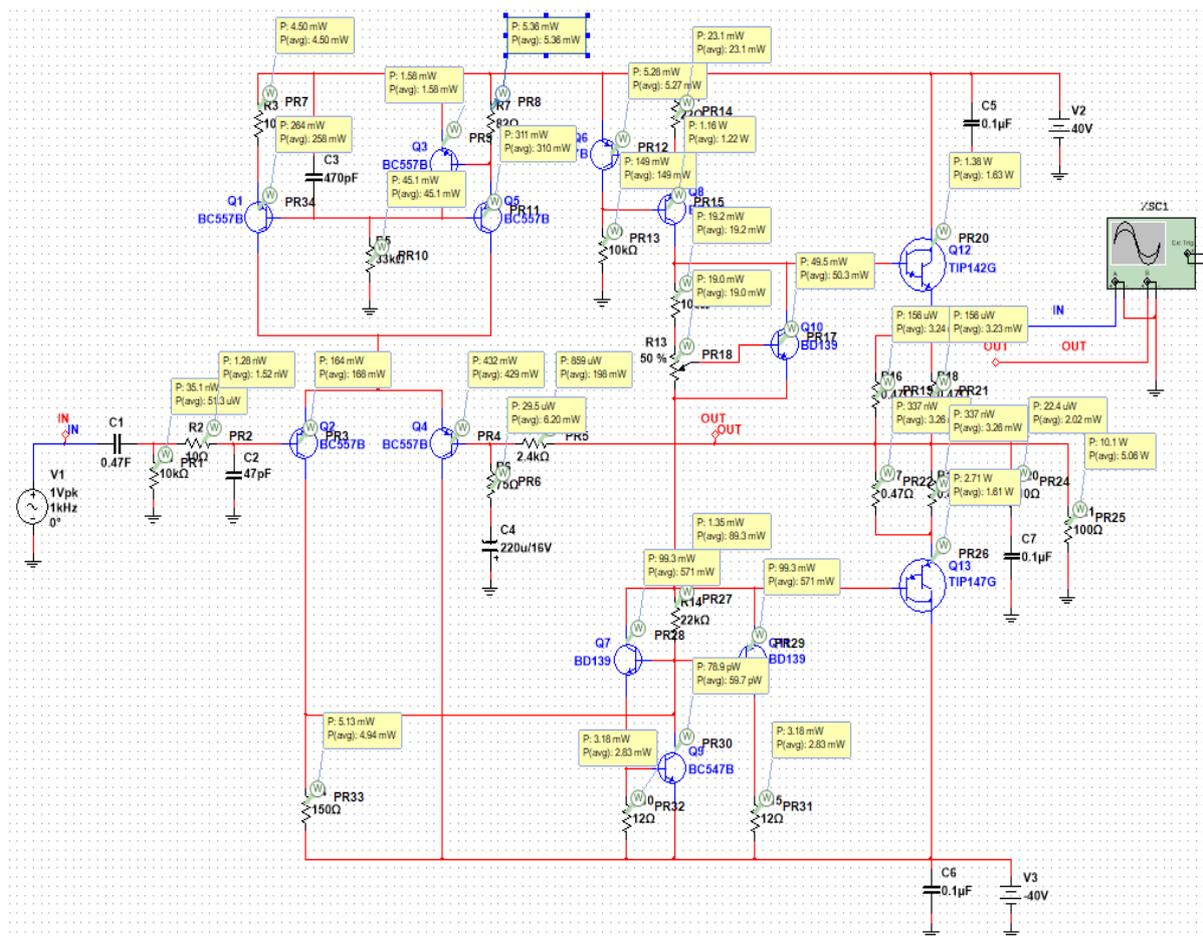


Рисунок 6 – Расчет параметров электрической принципиальной схемы
Figure 6 – Calculation of the parameters of the electrical circuit diagram

В процессе моделирования тепловых режимов печатного узла среди множества вариантов размещения ЭРЭ рассмотрено и проанализировано несколько наиболее характерных вариантов. Построение 3D-модели и тепловые расчеты для каждого варианта выполнены в САПР SolidWorks. Начальное размещение элементов выполнено с учетом топологии печатного узла и соблюдением конструктивно-технологических ограничений (Рисунок 7 и Рисунок 8) [5, 8].

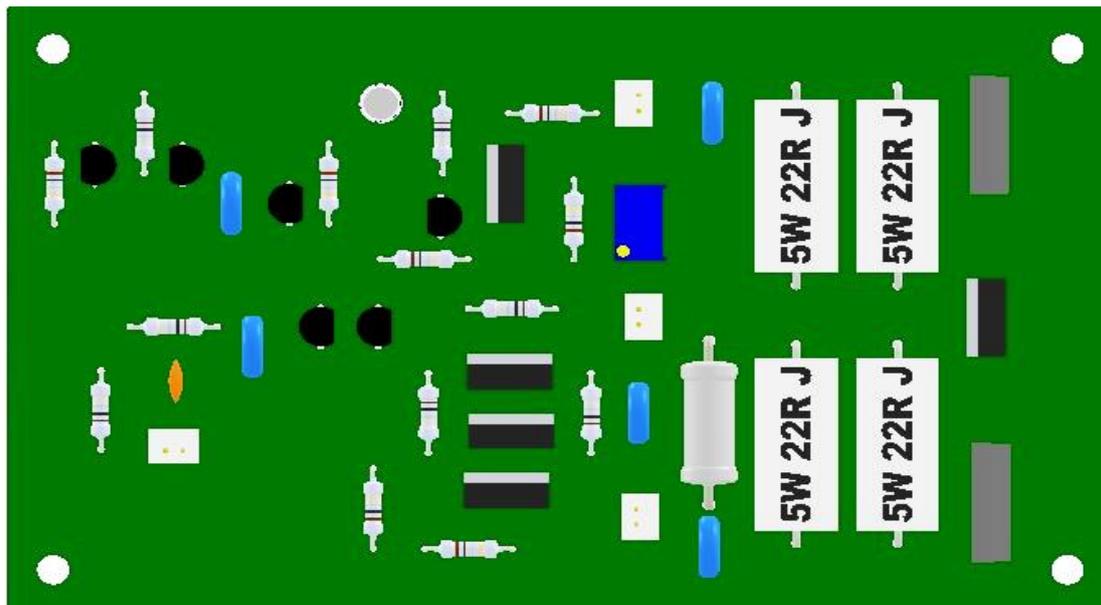


Рисунок 7 – 3D-модель печатного узла для начального варианта размещения ЭРЭ
Figure 7 – 3D-model of the printed node for the initial placement of the ERU

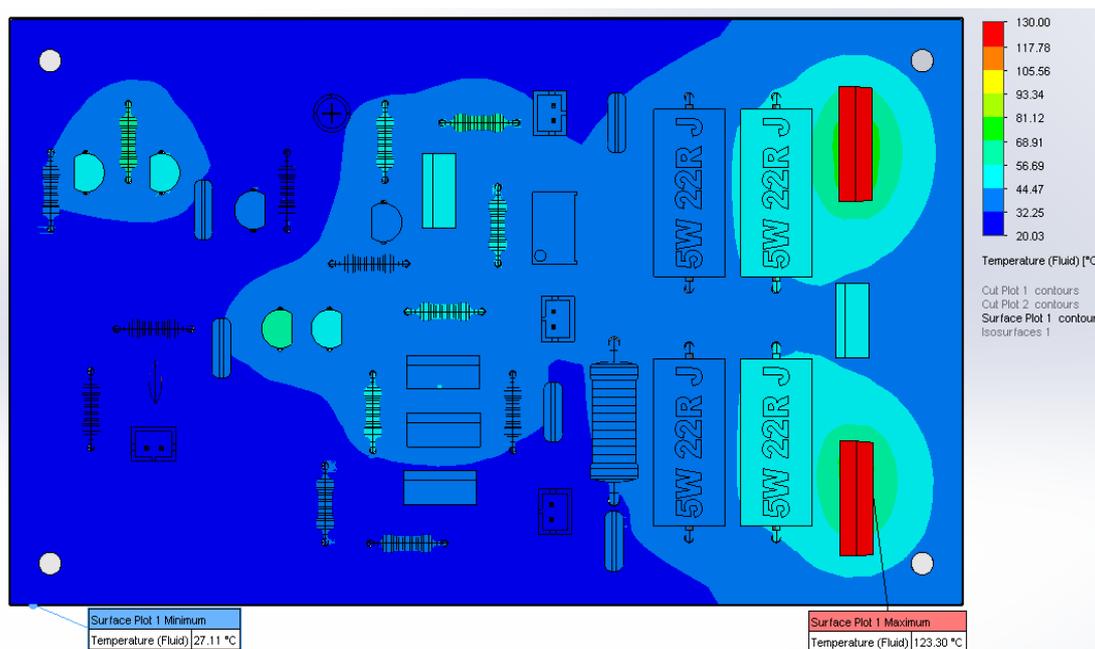


Рисунок 8 – Моделирование тепловых режимов печатного узла в САПР SolidWorks Simulation для начального вариантов размещения ЭРЭ
Figure 8 – Modeling of thermal modes of the printing unit in CAD SolidWorks Simulation for the initial placement of the ERU

Результатом моделирования тепловых режимов печатного узла в САПР SolidWorks является массив значений температур всех элементов схемы (Таблица 1) [4].

Таблица 1 – Температуры элементов в порядке убывания
Table 1– Temperatures of the elements in descending order

№ п/п	Наименование ЭРЭ	Температура ЭРЭ, °С	№ п/п	Наименование ЭРЭ	Температура ЭРЭ, °С
1	Q13	123,3	21	R18	40,3
2	Q12	120,6	22	R3	39,8
3	R5	68,1	23	R19	39,8
4	Q4	64,8	24	R13	38,5
5	R11	60,9	25	C5	38,2
6	R12	53,6	26	R15	36,3
7	R16	53,1	27	C7	35,3
8	Q10	53	28	R20	34,9
9	R8	53	29	R4	34,4
10	Q5	52,6	30	C6	34,3
11	R17	52,3	31	C3	34,2
12	Q2	52	32	Q9	33,6
13	Q8	51,3	33	Q3	33
14	Q1	49,3	34	R10	32,6
15	R9	46,8	35	C2	32,5
16	R14	44,6	36	R7	32,4
17	Q11	44,4	37	C4	32
18	Q7	42,2	38	C1	29,5
19	Q6	41,7	39	R2	29,5
20	R6	40,5	40	R1	27,8

Далее выполняется первая часть алгоритма – равномерное начальное распределение элементов по блокам. Необходимо распределить элементы в восемь блоков по пять элементов в каждом так, чтобы суммарная температура блоков была примерно одинаковой. Результаты распределения по блокам представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Распределение элементов по блокам и суммарные температуры блоков
Table 2 – Distribution of elements by blocks and total block temperatures

№ блока	ЭРЭ ₁	T ₁ , °С	ЭРЭ ₂	T ₂ , °С	ЭРЭ ₃	T ₃ , °С	ЭРЭ ₄	T ₄ , °С	ЭРЭ ₅	T ₅ , °С	ΣT _{блока} , °С
1	Q13	123,3	R14	44,6	Q11	44,4	Q9	33,6	Q3	33	278,9
2	Q12	120,6	R9	46,8	Q7	42,2	C3	34,2	R10	32,6	276,4
3	R5	68,1	Q1	49,3	Q6	41,7	C6	34,3	C2	32,5	225,9
4	Q4	64,8	Q8	51,3	R6	40,5	R4	34,4	R7	32,4	223,4
5	R11	60,9	Q2	52	R18	40,3	R20	34,9	C4	32	220,1
6	R12	53,6	R17	52,3	R3	39,8	C7	35,3	C1	29,5	210,5
7	R16	53,1	Q5	52,6	R19	39,8	R15	36,3	R2	29,5	211,3
8	Q10	53	R8	53	R13	38,5	C5	38,2	R1	27,8	210,5

Затем формируются две группы блоков (Таблица 3).

Таблица 3 – Распределение блоков по группам и суммарные температуры групп
Table 3 – Distribution of blocks by groups and total temperatures of groups

№ группы	№ блока	ΣТ _{блока} , °С	ΣТ _{группы} , °С						
Группа А	Блок 1	278,9	Блок 2	276,4	Блок 3	225,9	Блок 4	223,4	974,6
Группа В	Блок 5	220,1	Блок 6	210,5	Блок 7	211,3	Блок 8	210,5	852,4

Из Таблицы 3 видно, что разность суммарных температур блоков, упорядоченных по группам, остается весьма существенной и составляет $\Delta T_{\Sigma} = T_A - T_B = 122,2$ °С, поэтому на следующем этапе исследования применяется вторая часть алгоритма – парные перестановки блоков из разных групп, чтобы получить минимальную разность температур между группами ΔT_{Σ} (Таблица 4).

Таблица 4 – Перераспределение блоков по группам и суммарные температуры групп
Table 4 – Redistribution of blocks by groups and total temperatures of groups

№ группы	№ блока	ΣТ _{блока} , °С	ΣТ _{группы} , °С						
Группа А	Блок 1	278,9	Блок 4	223,4	Блок 5	220,1	Блок 8	210,5	932,9
Группа В	Блок 2	276,4	Блок 3	225,9	Блок 7	211,3	Блок 6	210,5	924,1

В результате применения парных перестановок блоков из всех возможных паросочетаний обмена между группами был получен оптимальный вариант (Таблица 4), для которого значение $\Delta T_{\Sigma} = T_A - T_B = 8,8$ °С. Такое расположение элементов обеспечивает нормальные тепловые режимы работы узла, исключая перегрев ЭРЭ.

Результаты теплового моделирования оптимального варианта размещения элементов в САПР SolidWorks приведены на Рисунке 9.

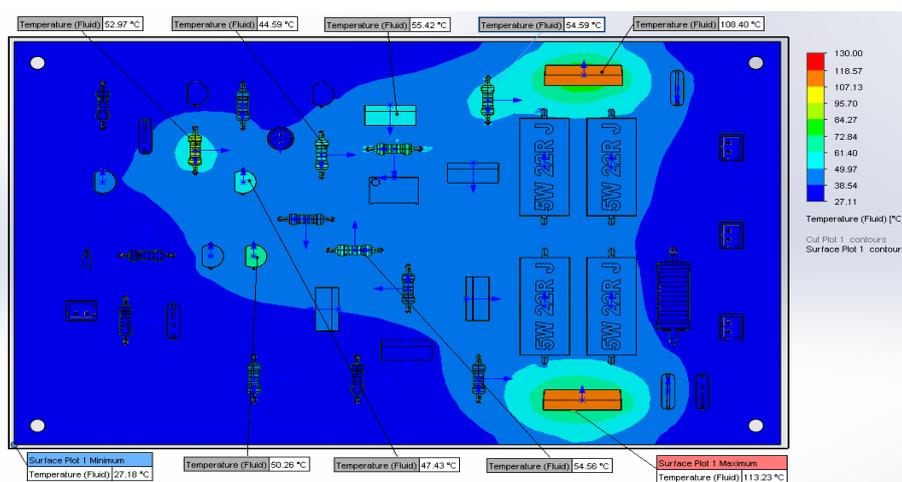


Рисунок 9 – Моделирование тепловых режимов печатного узла в САПР SolidWorks Simulation по результатам работы алгоритма

Figure 9 – Modeling of thermal modes of a printing unit in CAD SolidWorks Simulation based on the results of the algorithm

Для иллюстрации хода исследования ниже приведены тепловые модели для начального и двух промежуточных вариантов размещения элементов на печатном узле (Рисунок 10). Моделирование также выполнялось в САПР SolidWorks [10]. Тепловое моделирование, проведенное по результатам применения алгоритма, показано на Рисунке 11.

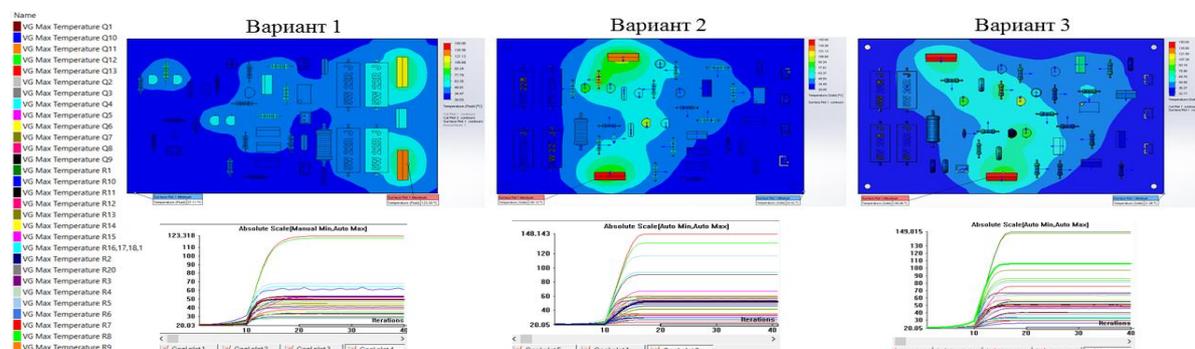


Рисунок 10 – Расчет значений температур ЭРЭ для трех вариантов размещения
 Figure 10 – Calculation of the EE temperature values for three placement options

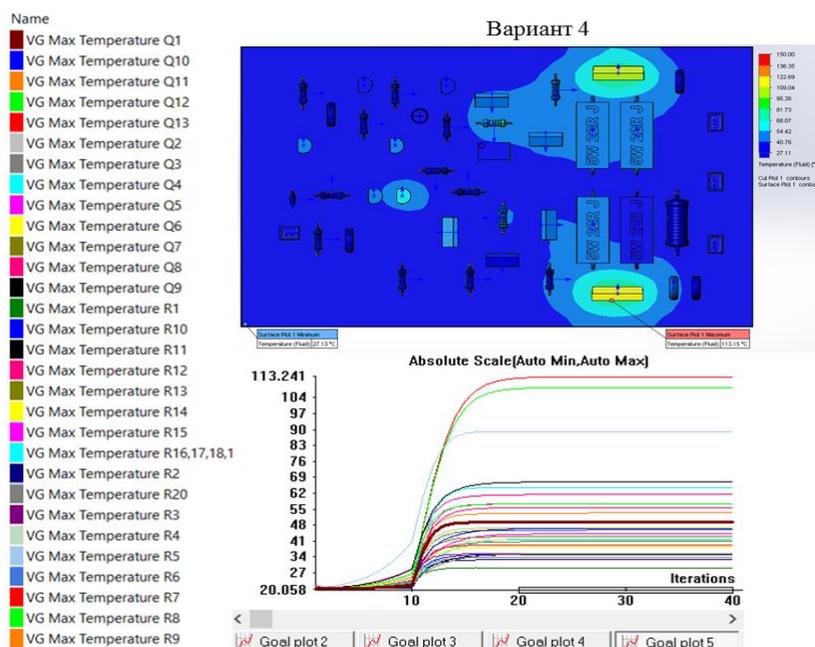


Рисунок 11 – Значения температуры оптимизированной компоновки
 Figure 11 – Temperature values of the optimized layout

В ходе исследования для каждого варианта размещения выполнялся расчет надежности узла. Формула для расчета надежности имеет вид:

$$P(t) = e^{-K_3 \lambda t} \quad (2)$$

где K_3 – температурный коэффициент эксплуатации, λ – интенсивность отказов элемента. Время безотказной работы t принято равным 10000 часов.

Надежность устройства в целом рассчитывается, как произведение надежностей всех его элементов.

Фрагмент исходных данных для расчета надежности узла при начальном и оптимальном вариантах размещения приведен в Таблице 5.

Таблица 5 – Фрагмент исходных данных для расчета надежности узла для начального варианта размещения и оптимального варианта размещения

Table 5 – A fragment of the source data for calculating the reliability of the node for the initial placement option and the optimal placement option

ЭРЭ	Температура, °C (начальный вариант)	Температура, °C (оптимальный вариант)	Максимально допустимая температура, °C	Интенсивность отказов, λ , ($\times 10^{-6}$ /час)	K_3 (коэффициент эксплуатации) (начальный вариант)	K_3 (коэффициент эксплуатации) Вариант 4	Вероятность безотказной работы, $P_1(t)$ (начальный вариант)	Вероятность безотказной работы, $P_4(t)$ (оптимальный вариант)
C5	38,2	40,15	105	0,213	0,3639	0,3824	0,9992	0,9992
Q5	52,6	41,71	150	1,440	0,3507	0,2781	0,9950	0,9960
R5	68,1	37,95	125	0,898	0,5448	0,3036	0,9951	0,9973
R15	36,3	40,69	125	0,898	0,2904	0,3255	0,9974	0,9971
C1	29,5	28,99	105	0,213	0,2810	0,2761	0,9994	0,9994
...

Надежность узла при начальном варианте размещения элементов составила $P_1(t)=0,848$, а надежность оптимального варианта равна $P_4(t)=0,892$. Промежуточные варианты размещения имели показатели надежности, равные $P_2(t)=0,864$ и $P_3(t)=0,882$ соответственно.

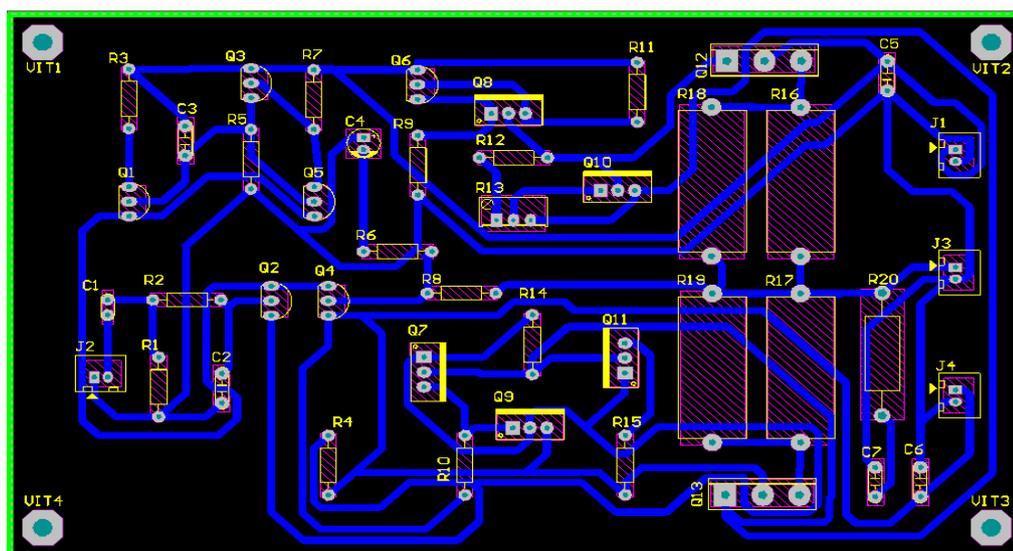


Рисунок 12 – Трассировка проводников печатного узла, созданная в САПР Altium Designer
Figure 12 – Tracing of printed node conductors created in Altium Designer CAD

Исходя из сравнения полученных значений, можно сделать вывод, что применение предложенного алгоритма позволяет повысить показатель надежности устройства.

На заключительном этапе исследования была спроектирована топология печатного узла с оптимальным, с точки зрения обеспечения тепловых режимов, вариантом размещения ЭРЭ и выполнена трассировка соединений в САПР Altium Designer (Рисунок 12 и Рисунок 13) [9].

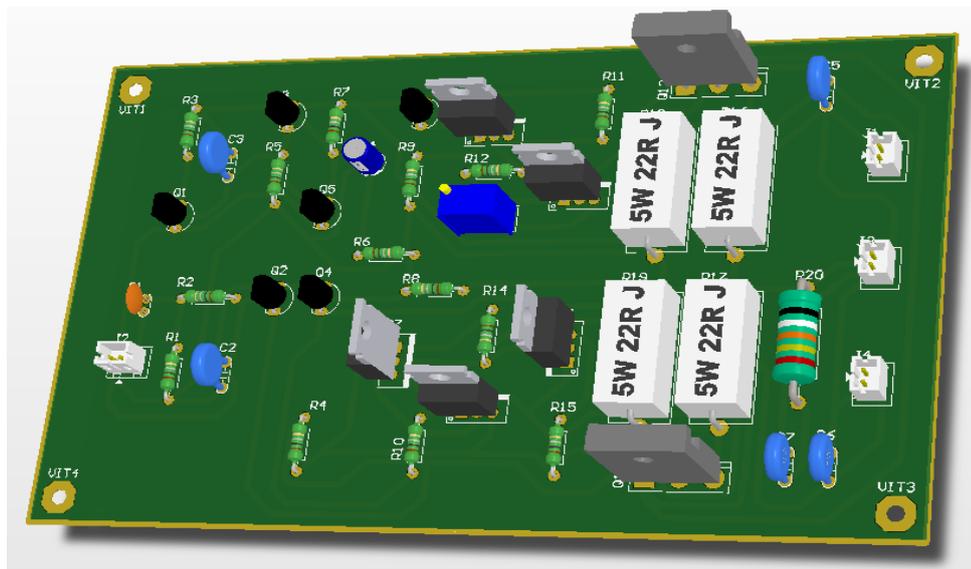


Рисунок 13 – 3D-модель печатного узла с размещенными ЭРЭ, созданная в САПР Altium Designer

Figure 13 – 3D model of a printed node with placed ERAS, created in Altium Designer CAD

Заключение

Выдвинутая в начале исследования гипотеза о возможности повышения показателей надежности электронного устройства за счет обеспечения нормальных тепловых режимов работы узла посредством выравнивания его температурных полей (уменьшения разности температур между наиболее и наименее нагретыми элементами схемы) путем поиска оптимального варианта размещения элементов на печатной плате, подтверждена моделированием и расчетами. Разработан алгоритм равномерного начального распределения элементов по блокам с последующей их группировкой и парными перестановками между группами, позволяющий определить наилучший вариант размещения ЭРЭ. Приведены примеры реализации алгоритма для печатного узла двухтактного усилителя HI-FI УМЗЧ с выходным каскадом на составных транзисторах. Расчет надежности узла для разных вариантов размещения ЭРЭ показал рост значения минимум на 0,01, что позволяет увеличить период безотказной работы электронного устройства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Меркухин Е.Н. Априорный критерий оценки эффективности оптимизации теплового режима путем рационального размещения электронных элементов. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;10:77–81. Доступно по: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37198> (дата обращения: 06.01.2020).

2. Кольтюков Н.А. *Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств: учебное пособие*. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та; 2009. 84 с.
3. Меркухин Е.Н. Использование графовых моделей пространства допустимых решений в задаче размещения электронных элементов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2009; 52(5):56–61.
4. Алямовский А.А. *Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation*. М.: ДМК-Пресс; 2010. 464 с.
5. Lombard M. *SolidWorks 2013 Bible*. Indianapolis. John Wiley & Sons Inc.; 2013. 1299 p.
6. Горячев Н.В. Подсистема расчета средств охлаждения радиоэлементов в интегрированной среде проектирования электроники. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2010;4:24–29.
7. Горячев Н.В., Кочегаров И.И., Гришко А.К. Выбор оптимального варианта построения электронных средств. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2015;2(10):153–159.
8. Меркухин Е.Н. Синтез тепловой модели на основе принципа суперпозиции температурных полей для платы микроблока электронной аппаратуры. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016;10(4):534–538. Доступно по ссылке: <https://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10384> (дата обращения: 08.01.2020).
9. Каленкович Н.И. *Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования: учебно-методическое пособие для студентов спец. «Моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование и производство РЭС»*. Минск: БГУИР; 2008. 200 с.
10. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. 2019;1. Доступно по: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8798407> DOI:10.1109/SED.2019.8798407 (дата обращения: 06.01.2020).

REFERENCES

1. Merkuhin E.N. Apriorniy criteriy ocenki effektivnosti optimizacii teplovogo rejima putem racionalnogo razmecheniya elektronnikh elementov. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2018;10:77–81. URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37198> (accessed: 06.01.2020). (In Russ.)
2. Kolyukov N.A. *Proektirovanie nesuchikh konstrukciy radioelektronnikh sredstv: uchebnoe posobie*. Tambov: Publishing House of TSTU; 2009. 84 p.
3. Merkuhin E.N. Ispolzovanie grafovikh modeley prostranstva dopustimikh resheniy v zadache razmecheniya elektronnikh elementov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2009; 52(5):56–61. (In Russ.)
4. Alyamovsky A.A. *Ingenierne rascheti v SolidWorks Simulation*. M.: DMK-Press; 2010. 464 p. (In Russ.)
5. Lombard M. *SolidWorks 2013 Bible*. Indianapolis. John Wiley & Sons Inc.; 2013. 1299 p.
6. Goryachev N.V. Podsystema rascheta okhlagdeniya radioelementov v integrirovannoy srede proektirovaniyz elektroniki. *Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Povolgskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2010;4:24–29. (In Russ.)
7. Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Grishko A.K. Vibor optimalnogo variant postroeniya elektronnikh sredstv. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo Universiteta*. 2015;2(10):153–159. (In Russ.)

8. Merkurukhin E.N. Syntez teplovoy modeli na osnove principa superpozicii temperaturnykh poley dlya plati microbloka elektronnoy apparatury. *Megdunarodniy jurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2016;10(4):534–538 URL: <https://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=10384> (accessed on 08.01.2020) (In Russ.).
9. Kalenkovich N.I. *Radioelektronnaya apparatura I osnovi ee konstruktorskogo proektirovaniya: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spec. «Modelirovanie I komputernoe proektirovanie» i «Proektirovanie I proizvodstvo RES»*. Minsk: BGUIR; 2008. 200 p. (In Russ.).
10. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. 2019;1. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8798407> DOI:10.1109/SED.2019.8798407 (accessed on: 06.01.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация
e-mail: uvajsov@mirea.ru
Scopus Author ID: 55931417100,
ResearcherID: H-6746-2015,
ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

Uvaysov Saygid Uvaysovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Черновская Виктория Владимировна, к.т.н., доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация
e-mail: chernoverskaya@mirea.ru

Chernoverskaya Victoria Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Флорова Ирина Анатольевна, старший преподаватель кафедры математики Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Российская Федерация
e-mail: florova.ia@misis.ru

Florova Irina Anatolyevna, Senior Lecturer of the Department of Mathematics, National Research Technological University "MISIS" Moscow, Russian Federation

Дао Ань Куан, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация
e-mail: anhquan.hvu@gmail.com

Dao An Kuang, post-graduate student, Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University Moscow, Russian Federation

Занг Ван Тхань, аспирант кафедры
конструирования и производства
радиоэлектронных средств, Институт
радиотехнических и телекоммуникационных,
МИРЭА – Российский технологический
университет, Москва, Российская Федерация
e-mail: giangvanthanh.92tb@gmail.com

Zang Van Thanh, post-graduate student,
Department of Design and Production of
Radioelectronic Devices of the Institute of Radio
Engineering and Telecommunication Systems,
MIREA - Russian Technological University
Moscow, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 06.11.2021; одобрена после рецензирования 22.12.2021;
принята к публикации 28.12.2021.*

*The article was submitted 06.11.2021; approved after reviewing 22.12.2021;
accepted for publication 28.12.2021.*