DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-13-24
УДК 621.3.019.34

Д. В. Озеркин
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр. Ленина, д. 40, г. Томск, 634050, Россия
А. О. Чулков
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
пр. Ленина, д. 30, г. Томск, 634050, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЗА СЧЕТ АНИЗОТРОПНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. *Рассмотрен метод термостабилизации выходного напряжения прецизионного источника питания за счет анизотропности теплового поля его конструкции. Показана взаимосвязь схемотехнического и конструкторско-топологического аспектов обеспечения температурной стабильности прецизионного источника питания. В теоретической части исследования введено понятие локальной группы электрорадиоизделий, расположенных на изотермической линии плоскости несущей конструкции. Сформулированы свойства локальных групп и условия обеспечения топологической термокомпенсации. Поставлены две основные прикладные задачи, решение которых обеспечивает термостабилизацию выходных параметров электронных средств методом топологической термокомпенсации с применением регрессионного анализа. В экспериментальной части исследования проведен анализ температурной стабильности выходного напряжения двух конструктивных вариантов прецизионного источника, отличающихся отсутствием и наличием топологической термокомпенсации. Обосновано применение зарубежной элементной базы для целей экспериментальной части исследования. Показано, что математической моделью по обеспечению топологической термокомпенсации для конструктивного варианта с улучшенной температурной стабильностью является уравнение температурной погрешности. Сравнительный анализ двух конструктивных вариантов показал улучшение температурной стабильности выходного напряжения за счет применения топологической термокомпенсации на 8 %. Полученный результат может оказаться удовлетворительным в условиях ограничений в техническом задании на применение иной элементной базы и/или иных методов термостабилизации.*

Ключевые слова: электронное средство, электрорадиоизделие, температурная стабильность, топологическая термокомпенсация, схемотехнический симулятор, SPICE модель, факторный эксперимент, регрессионный анализ, уравнение температурной погрешности

Для цитирования: Озеркин Д. В., Чулков А. О. Повышение температурной стабильности выходного напряжения источника питания за счет анизотропности теплового поля его конструкции // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 13–24. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-13-24

Denis V. Ozerkin
Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
40, Lenin Pr., 634050, Tomsk, Russia
Arseniy O. Chulkov
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Pr., 634050, Tomsk, Russia

© Озеркин Д. В., Чулков А. О., 2018

IMPROVEMENT OF POWER SUPPLY OUTPUT VOLTAGE TEMPERATURE STABILITY BY MEANS OF ANISOTROPY OF ITS CONSTRUCTION THERMAL FIELD

Abstract. *The article considers the method of thermal stabilization for precision power supply output voltage by means of anisotropy of the construction thermal field. Interdependency between schematic and design-topological aspects of precision power supply temperature assurance is shown. In theoretical part of the paper, the concept of electronic component local group arranged on isothermal line of the supporting structure plane is introduced. The local group characteristics and conditions for ensuring topological thermocompensation are formulated. The authors propose the solution for two basic applied problems that provides temperature stabilization of electronic devices output parameters by topological temperature compensation using regression analysis. The experimental part of the paper provides the analysis of the output voltage temperature stability for two design versions which differ by availability of topological thermocompensation. The reason of foreign element base use for the purposes of the experimental part of the study is explained. It is shown that the global mathematical model for providing topological thermocompensation for a design option with improved temperature stability is the temperature error equation. A comparative analysis of the two construction options shows 8 % improvement of output voltage temperature stability due to topological thermocompensation. The obtained result may prove to be satisfactory under technical assignment for the use of a different element base and / or other methods of thermal stabilization.*

Key words: electronic device, electrical part, temperature stability, topological thermocompensation, circuit simulator, SPICE model, factor experiment, regression analysis, temperature error equation

For citation: Ozerkin D. V., Chulkov A. O. Improvement of Power Supply Output Voltage Temperature Stability by Means of Anisotropy of its Construction Thermal Field. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 13–24. (In Russian) doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-13-24

Введение. Термокомпенсация как метод повышения температурной стабильности основана на взаимном влиянии параметров электрорадиоизделий (ЭРИ) на выходной параметр электронного средства (ЭС). Пусть $a_1 = f_{ij}(T)$ и $a_2 = f_{pk}(T)$ – законы изменения *j*-го параметра для *i*-го ЭРИ и *k*-го параметра для *p*-го ЭРИ от температуры соответственно. Тогда для осуществления термокомпенсации должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} \left|f_{ij}(T)\right| = \left|f_{pk}(T)\right|; \\ \left|T_i - T_p\right| \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (1)$$

С расширением диапазона рабочих температур ΔT, как отмечается в [1], термокомпенсация затруднена, поскольку мала вероятность полного совпадения законов изменения термозависимых параметров ЭРИ $a_1 = f_{ij}(T)$ и $a_2 = f_{pk}(T)$. Условия (1) справедливы только для случая изначального равенства рабочих температур ЭРИ, т. е. равномерности температурного поля. Однако условия (1) не учитывают особенности реального конструктивного исполнения ЭС, следовательно, (1) – это случай схемотехнической термокомпенсации параметров ЭРИ. Иначе говоря, схемотехническая термокомпенсация подразумевает такую абстрактную несущую конструкцию ЭС (плата, подложка и т. п.), свойства которой не влияют на параметры ЭРИ. В большинстве практических случаев, наоборот, свойства несущей конструкции ЭС оказывают непосредственное влияние на размещенные ЭРИ и при некотором условии приводят к эффекту топологической термокомпенсации. Для обеспечения топологического аспекта термокомпенсации необходимо, чтобы помимо (1) выполнялось условие

$$\left|f_{ij}(T, x_i, y_i)\right| = \left|f_{pk}(T, x_p, y_p)\right|,$$

где x_i, y_i и x_p, y_p – координаты точек привязки *i*-го и *p*-го ЭРИ на несущей конструкции ЭС.

В отечественной печати существует ряд научных исследований, посвященных проблеме повышения температурной стабильности топологическими методами и средствами. Так, в [2] приведены многочисленные примеры проектирования ЭС, отличающихся устойчивостью к температурным воздействиям со стороны объекта установки и климатических воздействий, а также высокой температурной стабильностью параметров. В [3] введено понятие топологической локальной группы ЭРИ в условиях неравномерного температурного поля платы (подложки), обладающей малым коэффициентом теплопроводности. В [4] описан вариант гибридно-пленочного микротермостата, в котором повышение точности термостатирования достигается в том числе топологическими особенностями конструкции.

В зарубежных научных публикациях также исследуется влияние топологии конструкции на температурную стабильность выходных параметров ЭС. Например, в [5] описана технологическая процедура компенсации температурной погрешности, которая позволяет получить высокостабильный температурный датчик в интегральном исполнении. Авторы отмечают, что точность показаний датчика при этом повысилась в 5 раз в интервале температур от 0 до 100 °С.

Анализ [1]–[5] позволяет утверждать следующее:

– отечественные и зарубежные авторы отмечают зависимость пространственного расположения термочувствительных ЭРИ на температурную стабильность выходных параметров ЭС;

– проблема топологической термокомпенсации параметров ЭРИ, являясь актуальной, еще не исследована в должной степени;

– термокомпенсация наиболее эффективна в относительно узком температурном диапазоне.

В представленной статье поставлена следующая задача. Требуется достичь повышения температурной стабильности выходного напряжения прецизионного источника за счет рационального размещения ЭРИ на печатной плате, используя свойство анизотропности теплового поля конструкции.

Теоретическая часть исследования. Требования к заданной температурной стабильности выходного параметра $U_{\text{вых}}$ ЭС количественно определяет уравнение температурной погрешности [6]:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{\Delta T_i}{T_i}, \qquad (2)$$

где $a_i = \dfrac{b_i T_i^0}{\Delta T_i b_0}$ – коэффициент влияния i-го ЭРИ, отражающий схемотехнический аспект обеспечения заданной температурной стабильности (безразмерная величина); ΔT_i – интервал варьирования температуры; T_i – собственная температура i-го ЭРИ, температура поверхности его корпуса; $\dfrac{\Delta T_i}{T_i}$ – относительное изменение температуры i-го ЭРИ; b_0, b_i – эмпирические коэффициенты уравнения регрессии, являющиеся оценками соответствующих генеральных коэффициентов; T_i^0 – номинальная температура (нулевой уровень варьирования).

Цель настоящего исследования: требуется найти координаты (x_i, y_i) места расположения ЭРИ на несущей поверхности ЭС так, чтобы относительная погрешность выходного параметра стремилась к минимуму:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \sum_{i=1}^{n} a_i \frac{\Delta T_i}{T_i}(x_i, y_i) \Rightarrow \min. \qquad (3)$$

Для достижения цели (3) требуется решение следующих основных задач:

1. Анализ пространственного расположения ЭРИ на несущей поверхности ЭС с позиции температурной стабильности.

2. Разработка алгоритмов размещения ЭРИ с целью топологической термокомпенсации.

Взаимосвязь схемотехнического и топологического аспектов температурной стабильности графически представлена на рис. 1. По оси абсцисс отложены характерные моменты времени эксплуатации ЭС: момент начала работы ($\tau_{\text{н}}$); момент выхода на режим (τ_1); момент начала изменения температуры среды (τ_2); момент окончания изменения температуры среды (τ_3); момент окончания изменения рабочей температуры ЭРИ (τ_4); момент окончания работы ($\tau_{\text{кон}}$). На оси ординат показаны два уровня температуры среды ($T'_{\text{ср}}$ и $T''_{\text{ср}}$), а также два уровня рабочей температуры ЭРИ ($T'_{\text{эл}}$ и $T''_{\text{эл}}$). Изменения уровней температуры среды и рабочей температуры обозначены как $\Delta T_{\text{ср}}$ и $\Delta T_{\text{эл}}$ соответственно. Границы интервалов варьирования $T(-)$ и $T(+)$ в вычислительном эксперименте [6], при значениях которых были найдены коэффициенты влияния a_i уравнения температурной погрешности (2), задают область определения для функции $h(T, \tau)$. Под $h(T, \tau)$ будем понимать функцию, суммарно описывающую изменение температуры ЭРИ во времени в зависимости от собственного режима работы

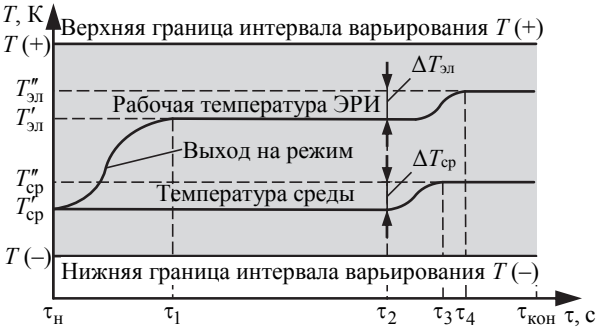


Рис. 1

$f\left(T_{\text{раб}}, \tau\right)$ и условий окружающей среды $g\left(T_{\text{ср}}, \tau\right)$:

$$h(T, \tau) = f\left(T_{\text{раб}}, \tau\right) + g\left(T_{\text{ср}}, \tau\right).$$

Относительное изменение температуры ЭРИ $\frac{\Delta T_i}{T_i}$ можно рассчитать как отношение максимальной разности рабочей температуры ЭРИ к среднему значению рабочей температуры:

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} = \frac{\max\left[T_i(\tau)\right] - \min\left[T_i(\tau)\right]}{\left[T_i(\tau_1) + T_i(\tau_2) + \ldots + T_i(\tau_n)\right]/n},$$

где n – количество отсчетов рабочей температуры i-го ЭРИ во время эксплуатации ЭС.

В простейшем случае для вычисления суммарной температурной погрешности по (2) достаточно двух значений рабочей температуры для каждого ЭРИ (n = 2), соответствующих двум граничным значениям температуры среды (см. рис. 1):

$$\frac{\Delta T_i}{T_i} = \frac{\left|T_i(\tau_1) - T_i(\tau_4)\right|}{\left[T_i(\tau_1) + T_i(\tau_4)\right]/2}.$$

Дальнейшие рассуждения будут справедливы с учетом следующих замечаний:

1. Отрезок времени $\left[0, \tau_1\right]$ не учитывается. Данный участок характеризуется выходом на рабочий режим ЭРИ. По продолжительности этот интервал занимает незначительное время относительно общего времени функционирования ЭРИ. Как правило, в техническом задании стабильность параметров ЭС на данном участке не нормируется.

2. Известно [7], что следствием линейности и однородности уравнения теплопроводности для относительно узкого температурного интервала является свойство суперпозиции температурных возмущений. Поэтому предполагаем, что изменение температуры окружающей среды равно изменению рабочей температуры ЭРИ:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{эл}}.$$

В [3] введено понятие локальная группа (ЛГ) ЭРИ – группа смежных ЭРИ, расположенных на изотермической линии. Понятие ЛГ иллюстрирует рис. 2, на котором условно показаны изотермические линии со значениями температуры T_1, T_3, … . Среди изотермических линий есть одна (со значением $T_{\text{ЛГ}}$), на которой располагается локальная группа ЭРИ. Рабочая температура каждого ЭРИ функционально зависит от мощности его тепловыделения $T\left(P_1\right)$, $T\left(P_2\right)$, … . Суперпозиция температурных возмущений ЭРИ ЛГ формирует значение $T_{\text{ЛГ}}$.

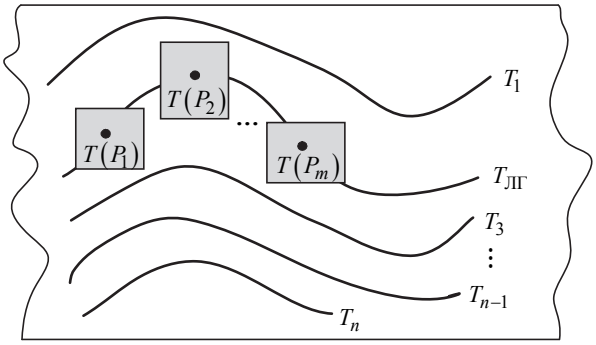


Рис. 2

Свойства ЛГ ЭРИ могут быть выведены из основных законов переноса тепловой энергии в твердых телах:

1. *Свойство ассоциативности*. Смежные ЭРИ с одинаковым порядком величины тепловыделения вносят суммарный вклад в установление температуры ЛГ:

$$P_1 \approx P_2 \Rightarrow T_{\text{ЛГ}} = T\left(P_1\right) + T\left(P_2\right). \quad (4)$$

2. *Свойство доминирования*. ЭРИ с большим порядком величины тепловыделения определяет температуру ЛГ:

$$P_1 \gg P_2 \Rightarrow T_{\text{ЛГ}} = T\left(P_1\right). \quad (5)$$

3. *Свойство изоповерхности*. Рабочая температура всех ЭРИ ЛГ примерно одинакова:

$$\left\{T_1, T_2, \ldots, T_n\right\} \in \mathbf{L} \quad \Rightarrow \quad T_1 \approx T_2 \approx \ldots \approx T_n, \quad (6)$$

где **L** – множество точек изоповерхности.

Сформулируем следствие из (4)–(6). Известно [7], что теплообмен кондукцией происходит согласно закону Фурье: плотность теплового потока q прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T. \quad (7)$$

Если предположить, что температурное поле изменяется только в направлении осей x и y, а также градиент температуры является постоянной величиной, то, используя (7), запишем выражение для коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{S\tau} \frac{l_{1,2}}{\left(T_1 - T_2\right)}, \quad (8)$$

где Q – количество тепла, протекающего за время τ через изотермическую поверхность, площадь которой S; $l_{1,2}$ – расстояние между изотермическими

поверхностями *1* и *2*; T_1, T_2 – значения температур на изоповерхностях *1* и *2* (причем $T_1 > T_2$).

Заметим, что значения коэффициентов теплопроводности для материалов плат (подложек), применяемых в ЭС, относительно малы и лежат в диапазоне от 0.2…0.3 Вт/(м · К) для стеклотекстолита и гетинакса до 25…30 Вт/(м · К) – для керамики [8]. При фиксированном расстоянии $l_{1,2}$ и наличии мощных тепловыделяющих ЭРИ согласно (8) получим значительный градиент температуры:

$$\begin{cases} \lambda \in [0.2...30]\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \\ l_{1,2} = \text{const}; \\ (T_1 - T_2) \to \max. \end{cases}$$

Таким образом, для обеспечения топологической термокомпенсации ЭС требуется соблюдение следующих условий:

– наличие источников значительного тепловыделения, формирующих градиент температуры на несущей конструкции ЭС;

– малый коэффициент теплопроводности материала несущей конструкции ЭС, что также способствует возникновению градиента температуры;

– наличие ЭРИ в составе ЭС, обладающих примерно равными по модулю коэффициентами температурной регрессии с противоположными знаками и обеспечивающих потенциальную возможность формирования ЛГ.

Термостабилизация ЭС методом топологической термокомпенсации с применением регрессионного анализа ставит перед разработчиком две основные задачи:

1. Синтез адекватных SPICE-моделей по отношению к реальным прототипам ЭРИ.

2. Анализ температурных полей конструкций ЭС методами физического эксперимента либо методами CAE-моделирования (Computer-Aided Engineering) [9].

Экспериментальная часть исследования. Прецизионные источники опорного напряжения (ПИОН) часто являются функциональными узлами, входящими в состав бортовой космической радиоаппаратуры (БКРА). При этом стабильность ПИОН в значительной степени определяет стабильность БКРА в целом. ПИОН как объект исследования температурной стабильности обычно представляет собой законченный функциональный узел, а также обладает всеми перечисленными ранее условиями, необходимыми для обеспечения топологической термокомпенсации.

В качестве прототипа объекта исследования выбран ПИОН из [2]. Модифицированная схема ПИОН, представленная на рис. 3, обладает следующими основными характеристиками:

– входное напряжение $U_{\text{вх}} = 13…20$ В;

– выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 10$ В;

– номинальный ток нагрузки $I_{\text{н}} =$ 50 мА;

– ток срабатывания схемы защиты от перегрузки $I_{\text{защ}} =$ 200 мА.

Входной сигнал ПИОН поступает на регулирующий элемент, представляющий собой составной транзистор VT3–VT4. Усилитель рассогласования, выполненный на операционном усилителе DA1, анализирует разницу между сигналом с датчика тока (делитель *R*7–*R*8) и сигналом с источника опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ (стабилитрон VD1). Условное графическое обозначение опера-

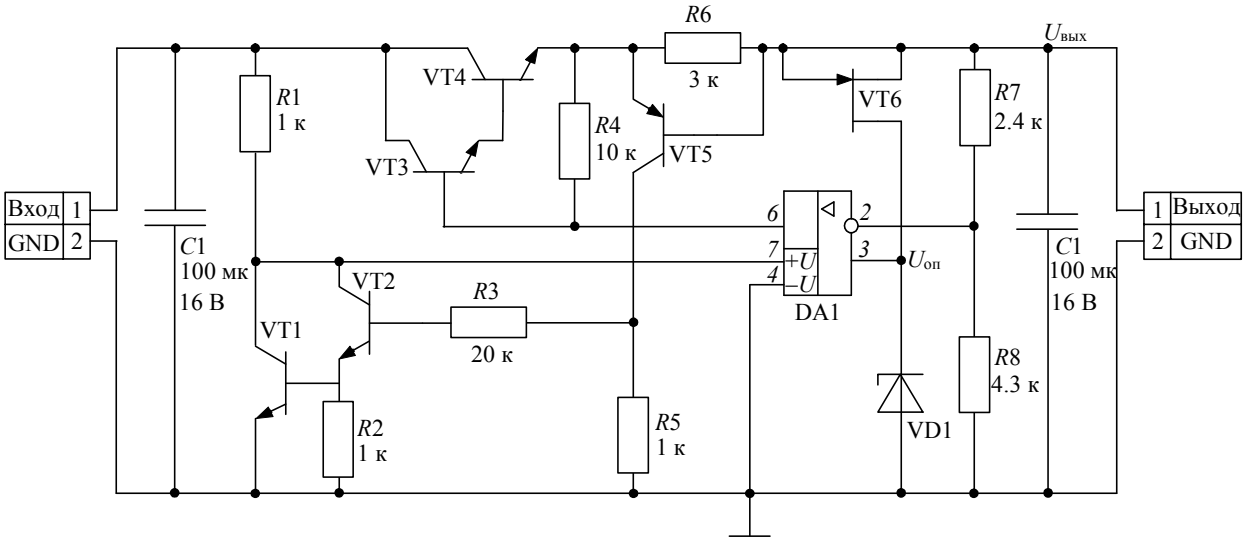


Рис. 3

ционного усилителя содержит номера его внешних выводов: *2* – инвертирующий вход; *3* – неинвертирующий вход; *6* – выход операционного усилителя; *4*, *7* – выводы напряжения питания. По цепи обратной связи сигнал рассогласования подается на базу составного регулирующего элемента VT3–VT4. Схема защиты от превышения допустимого тока нагрузки выполнена на транзисторах VT1, VT2, VT5. Если через резистор *R*6, служащий датчиком тока перегрузки, протекает ток более 200 мА, то падение напряжения база–эмиттер на транзисторе VT5 достигает 0.6 В, в результате чего он открывается. Это приводит к тому, что транзисторы VT2 и VT1 также открываются и выключают питание операционного усилителя DA1. При этом схема ПИОН переходит в аварийный режим работы. После установления допустимого тока нагрузки схема ПИОН автоматически возвращается в нормальный режим работы.

Натурный эксперимент. Первый конструктивный вариант ПИОН (исполнение № 1) представлен на рис. 4. Материал основания платы – стеклотекстолит FR4-35/35-1.5 (двухсторонний, толщина металлизации 35 мкм, толщина основания 1.5 мм) [8]. Печатный рисунок выполнен по 3-му классу точности. Размер печатной платы 30 × 24 мм. Технология изготовления печатной платы – комбинированный позитивный метод. Размещение ЭРИ на печатной плате в конструктивном варианте № 1 ПИОН проводилось по критерию минимизации суммарной длины электрических связей. Критерий температурной стабильности выходного напряжения специально не учитывался.

Тестовая работоспособность конструктивного варианта № 1 оценена с помощью амплитудной передаточной характеристики (рис. 5).

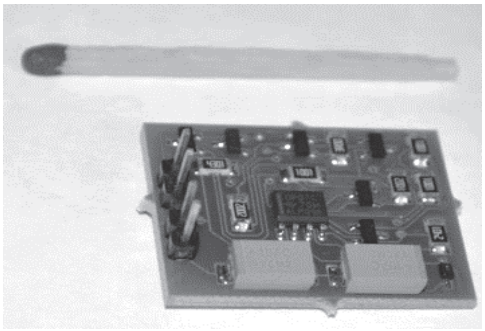


Рис. 4

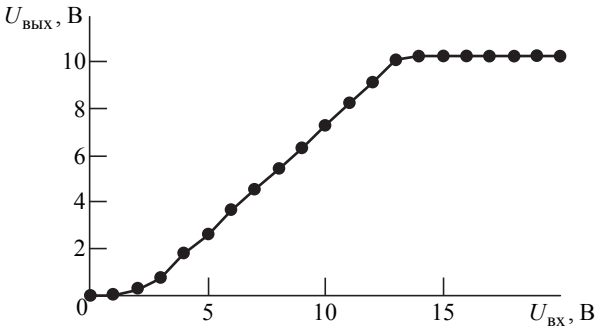


Рис. 5

Анализ температурного поля несущей конструкции ПИОН исполнения № 1 проведен с помощью измерительной установки, схема которой представлена на рис. 6. Основа экспериментальной установки – оптически прозрачная камера. Испытуемый образец ПИОН через разъемное соединение электрически связан с блоком питания Matrix MPS-3003LK-3. К выходу ПИОН подключен резистор нагрузки $(R_н = 200\ Ом)$, а также мультиметр Mastech MAS838. Блок питания позволяет плавно регулировать входное напряжение в диапазоне от 0 до 20 В. Мультиметр регистрирует выходное напряжение ПИОН. Температур-

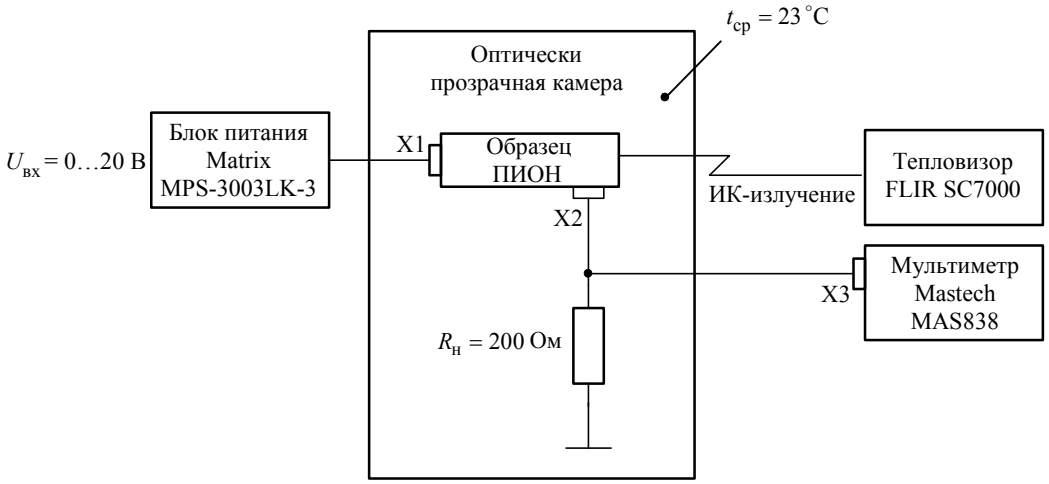
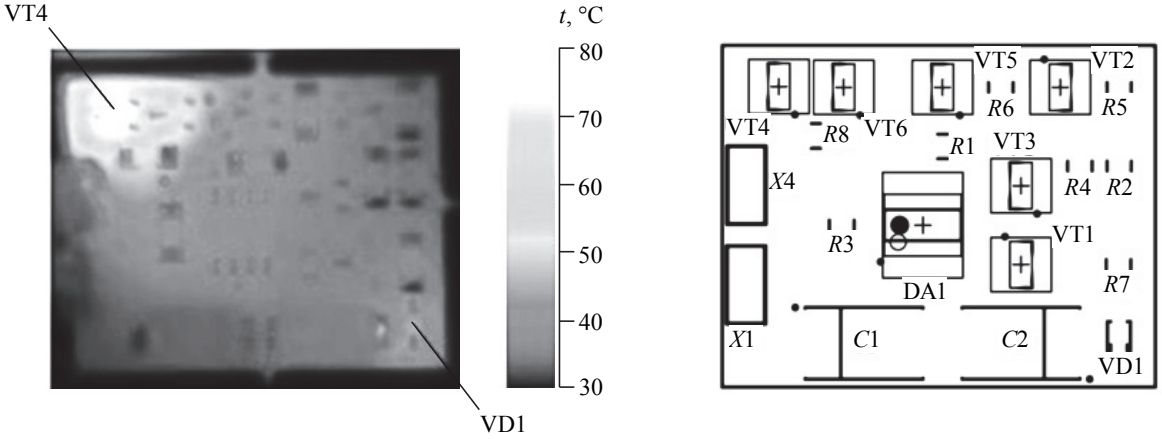


Рис. 6



а *б*

Рис. 7

ное поле несущей конструкции ПИОН анализируется бесконтактным методом – с помощью тепловизора FLIR SC7000.

Рассмотрим лабораторные условия, устанавливаемые для съемки термографической картины печатной платы ПИОН. Температура окружающей среды внутри измерительной камеры 23 °С. Стационарный тепловой режим печатной платы ПИОН спустя 5 мин после включения блока питания поддерживается при входном напряжении $U_{вх} = 16$ В. Выходное напряжение $U_{вых} = 10.137$ В, ток нагрузки $I_н = 50$ мА. В стационарном тепловом режиме у транзистора VT4 рассеиваемая мощность $P_{VT4} =$ 300 мВт, у стабилитрона VD1 мощность тепловыделения $P_{VD1} =$ 63 мВт; остальные ЭРИ имеют незначительную рассеиваемую мощность. Заметим, что максимальная рассеиваемая мощность применяемых в схеме транзисторов BC847B.215 $P_{max} =$ 330 мВт. В режиме реального времени с частотой 380 Гц в полнокадровом режиме ведется съемка термографической картины. Поток радиометрических изображений разрядностью 14 бит по технологии Gigabit Ethernet передается на персональный компьютер. Кадр такого изображения представлен на рис. 7, *а*.

На термограмме видны два температурных экстремума: глобальный, формируемый тепловыделением транзистора VT4, и локальный, формируемый тепловыделением стабилитрона VD1. При указанных ранее лабораторных условиях транзистор VT4 имеет рабочую температуру 80 °С, а стабилитрон VD1 – температуру 53 °С. Мощный тепловыделяющий элемент VT4 создает на несущей конструкции ПИОН градиент температуры и тем самым определяет потенциальные возможности для топологической термокомпенсации. Заметим, что тепловое "пятно" в окрестности транзистора VT4 имеет форму эллипса, вытянутого вдоль оси *x* (по горизонтали). Очевидно, что этот эффект вызван тем, что длинная сторона корпуса транзистора VT4 ориентирована по нормали к оси *x* (рис. 7, *б*). Ориентировочный размер большой и малой осей для эллипса теплового "пятна" по уровню 60 °С составляет 10 и 6 мм соответственно. Тепловыделяющий элемент VD1 обладает меньшими мощностью тепловыделения и градиентом температуры.

Модельный эксперимент. Как было отмечено, для целей регрессионного анализа электрической схемы необходимы адекватные SPICE-модели по отношению к реальным прототипам ЭРИ. Применение отечественной элементной базы для схемы ПИОН могло значительно усложнить настоящее исследование – потребовалась бы разработка SPICE-моделей практически всех ЭРИ. Использование зарубежной элементной базы снимает эту проблему, поскольку иностранные производители ЭРИ, как правило, размещают в открытом доступе текстовые описания SPICE-моделей на выпускаемую ими продукцию. Для целей моделирования были использованы SPICE-модели:

– чип-конденсатора TAJD107K016RNJ (C1, C2) [10];

– операционного усилителя OP-07C (DA1) [11];

– чип-резистора RC1206FR (R1-R8) [12];

– стабилитрона DDZ6V8ASF-7 (VD1) [13];

– транзистора BC847B.215 (VT1-VT4) [14];

– транзистора BC857A.215 (VT5) [14];

– транзистора MMBFJ177LT1G (VT6) [15].

В качестве схемотехнического симулятора при проведении вычислительной части эксперимента выбран продукт MicroCAP разработчика

Spectrum Software [12]. В среде MicroCAP реализована электрическая схема ПИОН, представленная на рис. 3. Цель моделирования – нахождение уравнения температурной погрешности (2) для электрической схемы ПИОН по методу полного факторного эксперимента. Критерий оптимизации – минимизация относительной погрешности выходного напряжения ПИОН как функции относительных изменений рабочих температур ЭРИ:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = f\left(\frac{\Delta T_i}{T_i}\right).$$

Независимые переменные (факторы) – рабочие температуры ЭРИ, входящих в электрическую схему. На предварительных этапах моделирования выявлено четыре ЭРИ, температурная зависимость которых значительно влияет на выходное напряжение ПИОН:

1) резистор *R*7;
2) резистор *R*8;
3) стабилитрон VD1;
4) транзистор VT6.

Число опытов в матрице планирования $N = 2^4 = 16$. Номинальные значения независимых переменных: $t_{\text{ЭРИ}}$ = 23 °С. Интервалы варьирования: $\Delta t_{\text{ЭРИ}}$ = 10 °С. Основные характеристики плана эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	Значение фактора z_i, °С	Кодовое значение фактора x_i
Верхний уровень, $z_{i\,\max}$	33	+1
Нижний уровень, $z_{i\,\min}$	13	–1

Основные характеристики плана эксперимента. Для ведения эксперимента применяется план 2^4 (табл. 2). Технология реализации вычислительного факторного эксперимента предложена в [6]. Результаты факторного эксперимента (SPICE-моделирования) записаны в столбец экспериментальных значений выходного параметра $y_{\text{э}}$. Столбцы теоретических значений выходного параметра $y_{\text{т}}$ и значений квадратов разностей $(\Delta y)^2$ заполняются позже.

Ортогональность столбцов матрицы планирования позволяет определить коэффициенты регрессии: $b_0 = 10.037$; $b_1 = 0.0036875$; $b_2 = -0.0036875$; $b_3 = 0.0208125$; $b_4 = -0.0021875$.

Следовательно, линейный полином имеет вид

$$U_{\text{вых}} = 10.037 + 0.0036875x_1 - 0.0036875x_2 + \\ + 0.0208125x_3 - 0.0021875x_4. \quad (9)$$

С помощью полученного линейного полинома (9) вычислено теоретическое значение выходного параметра $y_{\text{т}}$ в каждом опыте. Результаты занесены в столбец $y_{\text{т}}$ табл. 2. Столбец $(\Delta y)^2$ табл. 2 содержит значения квадратов разности между экспериментальным и теоретическим значениями выходного параметра. Итоговая сумма квадратов разности значений для линейного полинома составляет $(\Delta y)^2 = 1.11 \cdot 10^{-6}$. Полученное значение свидетельствует о хорошем соответствии линейной модели по отношению к экспериментальным данным. Следовательно, линейный полином (9) – адекватная регрессионная модель. Уравнение температурной погрешности в соответствии с (2) будет иметь вид

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = 0.011\frac{\Delta T_{R7}}{T_{R7}} - 0.011\frac{\Delta T_{R8}}{T_{R8}} + \\ + 0.062\frac{\Delta T_{\text{VD1}}}{T_{\text{VD1}}} - 0.0065\frac{\Delta T_{\text{VT6}}}{T_{\text{VT6}}}. \quad (10)$$

Синтез нового конструктивного исполнения. Из (10) следует, что наибольшее влияние на относительную погрешность выходного напряжения оказывает температурная погрешность стабилитрона VD1. Температурная зависимость выходного напряжения ПИОН имеет положительный тренд и определяется положительным знаком коэффициента влияния стабилитрона. Два ЭРИ – резисторы *R*7 и *R*8 – образуют комплементарную пару с точки зрения топологической термокомпенсации. Значения их коэффициентов

Таблица 2

№	x_1 (*R*7)	x_2 (*R*8)	x_3 (VD1)	x_4 (VT6)	$y_{\text{э}}$, В	$y_{\text{т}}$, В	$(\Delta y)^2$, В^2
1	–1	–1	–1	–1	10.0180	10.0181	$1 \cdot 10^{-8}$
2	–1	–1	–1	+1	10.0140	10.0137	$9 \cdot 10^{-8}$
3	–1	–1	+1	–1	10.0600	10.0597	$9 \cdot 10^{-8}$
…	…	…	…	…	…	…	…
16	+1	+1	+1	+1	10.0550	10.0553	$9 \cdot 10^{-8}$
						$\Sigma(\Delta y)^2 = 1.11 \cdot 10^{-6}$	

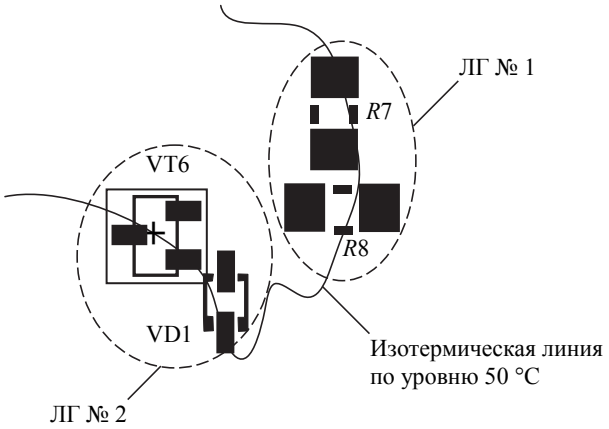


Рис. 8

влияния равны по модулю и противоположны по знаку. Два других ЭРИ – стабилитрон VD1 и транзистор VT6 – имеют менее выраженный эффект комплементарности, поскольку абсолютные значения их коэффициентов влияния отличаются примерно в 10 раз.

Рис. 8 поясняет концепцию топологической термокомпенсации, положенную в основу нового конструктивного исполнения № 2 ПИОН. Из всех ЭРИ, входящих в (10), только стабилитрон VD1 имеет рабочую температуру (53 °С), отличную от фоновой температуры печатной платы (33 °С). Под рабочей температурой стабилитрона понимается температура его поверхности, возникающая при эксплуатации в лабораторных условиях, описанных ранее. Удобно найти на плоскости несущей конструкции изотермическую линию, которая бы примерно совпадала по уровню с рабочей температурой стабилитрона VD1. При этом стабилитрон VD1 будет самостоятельно создавать себе рабочую температуру, равную уровню изотермы, а остальные ЭРИ из (10) будут находиться на заданной линии, благодаря наведенному перегреву от транзистора VT4. В результате на изотермической линии располагаются две комплементарные пары ЭРИ в соответствии с (10), которые обозначены как локальные группы № 1 и 2.

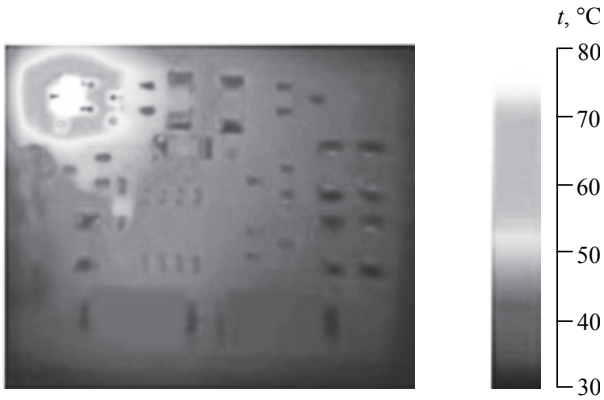
Концепция топологической термокомпенсации реализована в конструктивном варианте № 2 ПИОН (рис. 9, *а*, *б*). Размещение на плате ЛГ ЭРИ потребовало также изменить расположение нескольких других ЭРИ: VT5, *R*5, *R*3, *R*1.

Обсуждение результатов. Была исследована температурная стабильность выходного напряжения двух вариантов конструкции ПИОН (рис. 10). Кривая *1* соответствует температурной зависимости выходного напряжения для первого конструктивного варианта, кривая *2* – для второго конструктивного варианта. Уровень *3* показывает номинальное значение выходного напряжения ПИОН $U_{\text{вых. ном}} = 10$ В. Кривые *1* и *2* представляют близкие к линейным функциям зависимости. При этом угол наклона кривой *2* имеет меньший угловой коэффициент по сравнению с кривой *1*. Это свидетельствует о лучшей температурной стабильности второго конструктивного варианта.

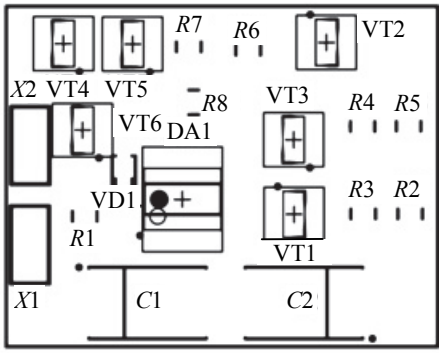
Учитывая линейный характер зависимостей, можно оценить температурный коэффициент напряжения двух вариантов как

$$\text{ТК}\,U_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1 \Delta T} = \frac{10.180 - 9.887}{10[30-(-40)]} = 4.19 \cdot 10^{-4}\ {}^\circ\text{C}^{-1},$$

$$\text{ТК}\,U_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2 \Delta T} = \frac{10.188 - 9.916}{10[30-(-40)]} = 3.89 \cdot 10^{-4}\ {}^\circ\text{C}^{-1}.$$



а



б

Рис. 9

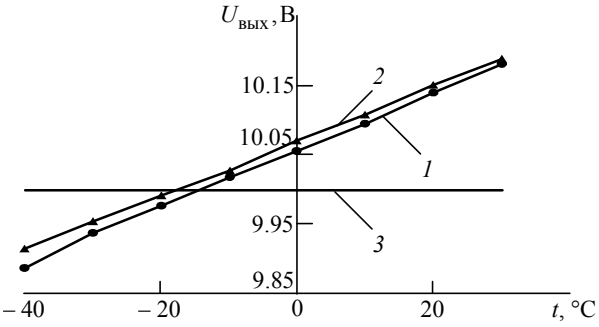
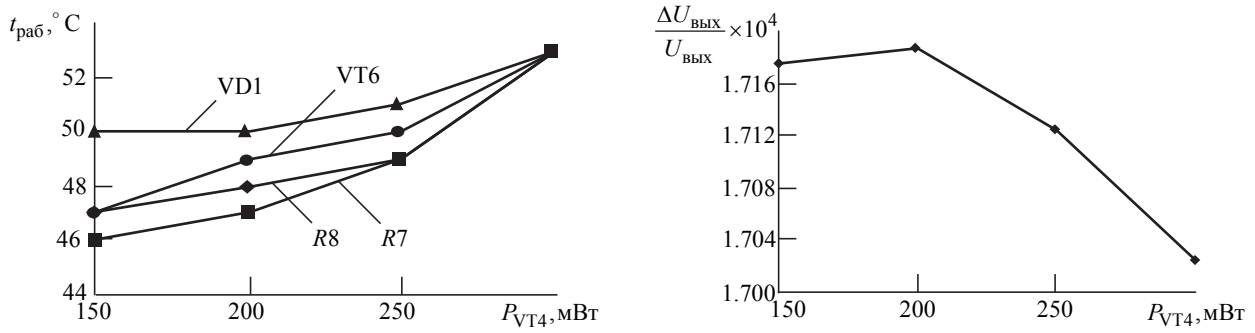


Рис. 10



а *б*

Рис. 11

В относительном количественном выражении улучшение температурной стабильности конструктивного варианта № 2 ПИОН по сравнению с вариантом № 1 составило 8 %. В диапазоне температур окружающей среды –30…+30 °С сравниваемые конструктивные образцы ПИОН практически не отличаются по термостабильности выходного напряжения. Отличие начинает проявляться в области низких температур (ниже –30 °С). Этот факт экспериментально подтверждает положение [1] о том, что метод термокомпенсации эффективен в относительно узком температурном диапазоне. Проявление эффекта топологической термокомпенсации в области низких температур окружающей среды для конструктивного варианта № 2 ПИОН ограничивает возможные условия его применения. Это эксплуатация в составе категорий изделий 1; 1.1; 2; 2.1; 3 исполнений У, ТУ, ХЛ, УХЛ, О, М, ОМ, В по ГОСТ 15150–69.

Полученное уравнение температурной погрешности (10) есть функция, зависящая от рабочих температур ЭРИ, входящих в уравнение. В свою очередь, рабочие температуры ЭРИ являются функциями, зависящими от мощности тепловыделения проходного транзистора VT4 (рис. 11, *а*). Функция рабочей температуры для стабилитрона VD1 имеет отличный от других функций вид, поскольку стабилитрон обладает также собственной значительной мощностью тепловыделения ($P_{VD1} = 63$ мВт). Подставим экспериментальные значения рабочих температур для ЭРИ VD1, VT6, *R*8, *R*7 в (10). При этом полагаем $\Delta t_{ЭРИ} = 1$ К, значения рабочих температур в (10) – в кельвинах. Получим зависимость относительной погрешности выходного напряжения ПИОН от рассеиваемой мощности проходного транзистора VT4 (рис. 11, *б*). Уменьшение рассеиваемой мощности транзистора VT4 приводит к увеличению относительной погрешности выходного напряжения. Закономерность следует из (10), поскольку относительное изменение выходного напряжения обратно пропорционально относительной температуре ЭРИ.

Выводы:

1. Введено понятие топологической локальной группы ЭРИ в условиях неравномерного температурного поля платы (подложки), обладающей малым коэффициентом теплопроводности. Сформулированы основные свойства локальной группы ЭРИ и условия для осуществления топологической термокомпенсации.

2. Экспериментально доказана возможность топологической термокомпенсации электронных средств с учетом конструктивной топологии электрорадиоизделий в условиях неоднородного температурного поля.

3. Топологическая термокомпенсация, как метод термостабилизации, позволяет улучшать температурную стабильность конструктивных образцов электронных средств на 8–10 %. Такой результат может оказаться удовлетворительным в условиях ограничений в ТЗ на применение иной элементной базы и/или иных (материалоемких) методов термостабилизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривоносов А. И. Температурная компенсация электронных схем. М.: Связь, 1977. 136 с.

2. Алексеев В. П. Системное проектирование термоустойчивых радиотехнических устройств и систем. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004. 316 с.

3. Озеркин Д. В. Анализ и синтез термостабильных радиотехнических устройств: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы и устройства. Томск, 2000. 24 с.

4. Пат. 2164709 РФ. Микротермостат с позисторным нагревателем / В. Г. Козлов, В. П. Алексеев, Д. В. Озер-

кин. № 99109421/09; заявл. 29.04.1999; опубл. 27.03.2001. Бюл. № 9. 9 с.

5. Technological Compensation Circuit for Accurate Temperature Sensor / R. Amador, A. Polanco, H. Hernandez, E. Gonzalez, A. Nagy // Sensors and Actuators A Physical. 1998. Vol. 69, № 2. P. 172–177.

6. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.

7. Кофанов Ю. Н., Сарафанов А. В., Трегубов С. И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат. М.: Радио и связь, 2001. 220 с.

8. Озеркин Д. В., Русановский С. А. Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 13, № 4. С. 90–97.

9. Тихомиров В. Г., Ломовцев Д. В., Янкевич В. Б. Математическое моделирование распределение теплового поля в полупроводниковых лазерах с вертикальным выводом излучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 3. С.109–113.

10. TAJ Series – AVX. URL: http://www.avx.com/products/tantalum/smd-tantalum-mno2/taj-series/ (дата обращения 27.07.2018)

11. SPICE Models – Simulation Models. URL: https://www.ti.com/adc/docs/midlevel.tsp?contentId=31690 (дата обращения 27.07.2018)

12. Spectrum Software – MicroCAP 11. URL: http://www.spectrum-soft.com (дата обращения 27.07.2018)

13. Diodes Incorporated. URL: http://www.diodes.com (дата обращения 27.07.2018)

14. Philips Semiconductors – Discretes – Concise Catalog 2000. URL:http://web.rfoe.net:8000/ziliaoxiazai/PHILIPS/pip/BC846B.html (дата обращения 27.07.2018)

15. SPICE Models – Interface Technologies. URL: https://www.i-t.com/spice-models/ (дата обращения 28.07.2018)

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

Озеркин Денис Витальевич – кандидат технических наук (2000), доцент (2003) кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Автор 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – экспериментальные методы и средства исследования технических систем; автоматизированное проектирование радиоэлектронных систем; проектирование термостабильных радиотехнических устройств.
E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

Чулков Арсений Олегович – кандидат технических наук (2016), научный сотрудник исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автор 54 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка методик и аппаратуры для активного теплового неразрушающего контроля композиционных материалов, в частности угле- и стеклопластика, используемых в авиакосмической отрасли.
E-mail: chulkovao@tpu.ru

REFERENCES

1. Krivonosov A. I. *Temperaturnaya kompensatsiya elektronnykh skhem* [Temperature Compensation of Electronic Circuits]. Moscow, *Svyaz*, 1977, 136 p. (In Russian)

2. Alekseyev V. P. *Sistemnoye proyektirovaniye termoustoychivykh radiotekhnicheskikh ustroystv i system* [System Design of Thermally Stable Radio Engineering Devices and Systems]. Tomsk, SB RAS Institute of Atmospheric Optics Publ., 2004, 316 p. (In Russian)

3. Ozerkin D. V. *Analiz i sintez termostabil'nykh radiotekhnicheskikh ustroystv: avtoref. dis. … kand. tekhn. n.* [Analysis and Synthesis of Thermostable Radio Engineering Devices: dis. abstract … PhD (tech. sciences)]. Tomsk, 2000, 24 p. (In Russian)

4. Kozlov V. G., Alekseyev V. P., Ozerkin D. V. *Mikrotermostat s pozistornym nagrevatelem* [Microthermostat with a Posistor Heater]. Patent RF, no. 2164709, 2001.

5. Amador R., Polanco A., Hernandez H., Gonzalez E., Nagy A. Technological Compensation Circuit for Accurate Temperature Sensor. Sensors and Actuators A Physical. 1998, vol. 69, no. 2, pp. 172–177.

6. Dul'nev G. N., Semyashkin E. M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* [Heat Exchange in Radioelectronic Devices]. Leningrad, *Energiya*, 1968, 360 p. (In Russian)

7. Kofanov Yu. N., Sarafanov A. V., Tregubov S. I. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya RES. Topologicheskoye proyektirovaniye pechatnykh plat* [CAD of Radioelectronic Devices. Topological Design of Pcbs]. Moscow, *Radio i svyaz*, 2001, 220 p. (In Russian)

8. Ozerkin D. V., Rusanovskiy S. A. Methodology for Modeling the Temperature Stability of Resistor Blocks B19K in SPICE-Like Simulators. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2017, vol. 13, no. 4, pp. 90–97. (In Russian)

9. Tikhomirov V. G., Lomovtsev D. V., Jankevich V. B. Thermal Analysis of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Journal of the Russian Universities: Radioelectronics. 2012, no. 3, pp. 109–113. (In Russian)

10. TAJ Series – AVX. Available at: http://www.avx.com/products/tantalum/smd-tantalum-mno2/taj-series/ (accessed 27.07.2018)

11. SPICE Models – Simulation Models. Available at: https://www.ti.com/adc/docs/midlevel.tsp?contentId=31690 (accessed 27.07.2018)

12. Spectrum Software – MicroCAP 11. Available at: http://www.spectrum-soft.com (accessed 27.07.2018)

13. Diodes Incorporated. Available at: http://www.diodes.com (accessed 27.07.2018)

14. Philips Semiconductors – Discretes – Concise Catalog 2000. Available at: http://web.rfoe.net:8000/ziliaoxiazai/PHILIPS/pip/BC846B.html (accessed 27.07.2018)

15. SPICE Models – Interface Technologies. Available at: https://www.i-t.com/spice-models/ (accessed 28.07.2018)

Received September, 10, 2018

Denis V. Ozerkin – Ph.D. in Engineering (2000), Associate Professor (2003) of the Department of Radioelectronic Technologies and Ecological Monitoring of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR). The author of 50 scientific publications. Area of expertise: experimental methods and means of researching technical systems; computer-aided design of radio electronic systems; design of thermostable radio engineering devices.
E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

Arseniy O. Chulkov – Ph.D. in Engineering (2016), Scientist in research school for physics of high-energy processes of National Research Tomsk Polytechnic University. The author of 54 scientific publications. Area of expertise: developing methods and equipment for active thermal non-destructive testing of composite materials, i.e. coal and fiberglass used in aerospace industry.
E-mail: chulkovao@tpu.ru