

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИКРОТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Д.В. Озеркин¹

ozerkin.denis@yandex.ru

В.О. Бондаренко²

dizelf3333@gmail.com

¹ ТУСУР, Томск, Российская Федерация

² ТПУ, Томск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен перспективный метод термостабилизации электронных средств — микротермостатирование, которое характеризуется поддержанием постоянства температуры на уровне отдельных электрорадиоизделий. Показано, что глобальной математической моделью для разработки электронных средств с микротермостатированием может быть уравнение температурной погрешности. Методы статистического анализа режимов работы электрической схемы электронного средства позволяют получить регрессионную модель, на основе которой выводится уравнение температурной погрешности. Предложено для сокращения временных затрат в процессе статистического анализа замещение физического факторного эксперимента вычислительным факторным экспериментом. Отмечено, что программным средством реализации вычислительного факторного эксперимента могут стать известные программные комплексы схемотехнического моделирования. Общий вид уравнения температурной погрешности позволяет сделать вывод о трех частных задачах, возникающих в процессе исследования температурной стабильности электронного средства: 1) задача синтеза адекватных математических моделей электрорадиоизделий; 2) задача схемотехнического моделирования электрической схемы; 3) задача топологического проектирования для расчета температурного поля. В экспериментальной части исследования предложена простая конструкция нагреваемого микротермостата стабилизатора напряжения. Отличительная особенность конструкции микротермостата — наличие

Ключевые слова

Бортовая электронная аппаратура, электрорадиоизделие, термостабилизация, микротермостатирование, уравнение температурной погрешности, температурная стабильность

микроконтроллера для формирования корректирующих воздействий на исполнительные элементы. В процессе исследования проведено сравнение двух конструктивных вариантов исполнения стабилизатора напряжения: 1) без термостатирования; 2) с применением микротермостатирования. Показано, что вариант с термостатированием обладает температурной стабильностью в 2,68 раз лучшей по сравнению с базовым вариантом

Поступила 19.12.2019

Принята 23.01.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. Одна из характерных особенностей бортовой электронной аппаратуры — широкий температурный диапазон функционирования ($-60\dots 125$ °C). Как следствие, при эксплуатации происходит значительное изменение параметров электрорадиоизделий (ЭРИ), входящих в состав такой аппаратуры, относительно номинальных значений. Термостатирование является одним из конструктивных методов обеспечения температурной стабильности бортовой электронной аппаратуры. Системы термостатирования осуществляют тепловое управление объектом в целях формирования в нем температурного поля с требуемыми характеристиками [1]. С развитием в конце XX в. цифровой вычислительной техники и микроминиатюризации ЭРИ произошло качественное изменение схемотехники и конструкций термостатов. В частности, появилась возможность применения цифровых ЭРИ и программных методов управления тепловым режимом электронных средств, все чаще стала применяться стабилизация температуры отдельных ЭРИ, наиболее чувствительных к изменению температуры окружающей среды. Указанные возможности привели к возникновению относительно нового конструктивного исполнения — микротермостатов, отличительной особенностью которых является статирование на уровне ЭРИ или группы ЭРИ.

В отечественной и зарубежной научной литературе описано большое число конструкций термостатов, предлагаемых для решения конкретных задач регулирования температуры электронной аппаратуры. Вопросам разработки гибридно-пленочных микротермостатов посвящено несколько работ В.П. Алексеева. Так, в [2] рассмотрены тепловые процессы регулирования температуры подложки в гибридно-пленочном микротермостате, содержащем термостабильную подложку, а также трехмерная модель на основе нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, приведены результаты решения для различных конструктивных размеров и материалов подложки. Инженерно-технические вопросы разработки дискретных микротермостатов с программным управлением температуры

статирования отражены в [3]. Отмечено, что цифровые микротермостаты с программным управлением обладают большей эффективностью, так как функции дискретных ЭРИ термостата полностью берут на себя микроконтроллер и встроенное программное обеспечение. Подавляющее большинство отечественных работ, посвященных вопросам термостатирования, составляют объекты патентного права. Например, различные конструкции гибридно-пленочных микротермостатов предложены в [4–7]. Эти конструкции относятся к технике регулирования температуры в прецизионных радиоэлектронных устройствах и могут быть использованы для поддержания постоянства параметров этих устройств в широком диапазоне значений температуры окружающей среды. Интегральный микротермостат с кольцевым транзисторным нагревателем рассмотрен в [8]. Микротермостатирование кварцевых резонаторов предложено в [9]. Конструктивные особенности такого микротермостата — два вакуумированных баллона совместно с траверсами из материала с низким коэффициентом теплопроводности. Процесс выхода на рабочий режим микротермостата проанализирован в [10], также предложен конструктивный вариант, ускоряющий этот процесс. Оригинальная конструкция микротермостата описана в [11]: в конструкции использованы две подложки, между которыми располагаются термостатируемые ЭРИ. Вопросы разработки микротермостатов-микророзоудильников на основе термобатарей рассмотрены в [12]. Системы термостатирования часто используют при проектировании бортовой космической радиоаппаратуры. Так, в [13] экспериментально исследована двухконтурная система термостатирования прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости космического назначения на двухстепенных поплавковых гироскопах. В зарубежной научной литературе можно найти значимые работы, посвященные разработке микротермостатов. Например, в [14] описана матричная конструкция микротермостата с памятью формы из никель-титанового сплава. Особенность конструкции — отсутствие внешних электрических источников регулирования. Интегральный микротермостат реверсивного принципа действия, способный работать в режимах нагрева и охлаждения, рассмотрен в [15]. Все функции микротермостата — измерение температуры, нагрев и охлаждение — реализованы с использованием встроенных в кристалл интегральной микросхемы термоэлектрических элементов. Конструкция высокоточного микротермостата, в котором вследствие временного разделения процессов измерения температуры и управления нагревом получена высокостабильная и точная система термостатирования, предложена в [16].

Анализируя результаты, приведенные в перечисленных выше отечественных и зарубежных работах, можно отметить, что в них отсутствуют ответы на системные вопросы, лежащие в основе разработки микротермостата:

– какова глобальная математическая модель по обеспечению заданной температурной стабильности электронного средства?

– по какому принципу осуществляется отбор того или иного ЭРИ, входящего в состав электронной аппаратуры и подлежащего микротермостатированию?

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Впервые комплексный подход к обеспечению требуемой температурной стабильности электронных средств предложен в [17] в качестве частной задачи при анализе производственных погрешностей и электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. Записано уравнение температурной погрешности:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} \alpha_i \right] \Delta T, \quad (1)$$

где $\frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)} = B_i$ — коэффициенты влияния.

Метод нахождения коэффициентов влияния B_i уравнения температурной погрешности (1) методом статистического планирования эксперимента в сочетании с регрессионным анализом рассмотрен в [18]. Получаемое по результатам эксперимента уравнение регрессии может быть представлено в общем виде

$$n = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i q_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} q_i^2 + \dots \quad (2)$$

Здесь n — оценка генерального значения выходного параметра N ; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} — эмпирические коэффициенты уравнения регрессии, являющиеся оценками соответствующих генеральных коэффициентов.

Для нахождения уравнения регрессии (2) и проверки его адекватности используются основные положения теории планирования факторного эксперимента [19–21]. Применяя операцию дифференцирования по каждому фактору b_i , получают уравнение температурной погрешности [18]:

$$\frac{\Delta n}{n} = \left[\sum_{i=1}^k A_i \alpha_{q_i} + \sum_{i < j}^k A_{ij} \alpha_{q_i} \alpha_{q_j} + \sum_{i=1}^k A_{ii} (\alpha_{q_i})^2 + \dots \right] \Delta T, \quad (3)$$

где $A_i = \frac{\partial n}{\partial q_i} \frac{q_{i0}}{n_0}$ — коэффициент влияния линейных членов; $A_{ij} = \frac{\partial^2 n}{\partial q_i \partial q_j} \frac{q_{i0} q_{j0}}{n_0}$ — смешанный коэффициент влияния второго порядка, характеризующий тепловое взаимодействие (i - j) пары факторов на выходной параметр; $A_{ii} = \frac{\partial^2 n}{\partial^2 q_i} \frac{q_{i0}^2}{n_0}$ — коэффициент влияния второго порядка.

В настоящей работе при реализации плана эксперимента предложено проводить варьирование не термозависимых параметров, как в [18], а непосредственно температуры ЭРИ ΔT_i . В этом случае уравнение температурной погрешности приводится к виду

$$\frac{\Delta N_{\text{ВЫХ}}}{N_{\text{ВЫХ}}} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\Delta T_i}{T_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \frac{\Delta T_i}{T_i} \frac{\Delta T_j}{T_j} + \dots \quad (4)$$

Здесь $a_i = b_i T_0 / (\Delta T b_0)$ — коэффициент влияния i -го ЭРИ, T_0 — номинальная температура (нулевой уровень варьирования), ΔT — интервал варьирования температуры; $\Delta T_i / T_i$ — относительное изменение рабочей температуры ЭРИ.

В целях снижения трудоемкости реализации факторного эксперимента в [22] предложена замена физического факторного эксперимента вычислительным факторным экспериментом. Основная трудность реализации вычислительного факторного эксперимента возникает при синтезе адекватной математической модели проектируемого электронного средства. Учитывая предельную формализацию факторного эксперимента и сопутствующих вычислительных процедур [19–21], можно комплекс автоматизированных операций по проектированию термостабильных электронных средств представить в виде трех задач: 1) задача синтеза адекватных математических моделей ЭРИ; 2) задача схмотехнического анализа (моделирования) электрической схемы; 3) задача топологического проектирования для расчета температурного поля и нахождения изменений рабочих значений температуры ЭРИ.

Результаты. Экспериментально докажем утверждение, которое следует из теоретической части исследования — применение термостатирования как метода термостабилизации позволяет снизить до минимума изменение относительных рабочих значений температуры ЭРИ $\Delta T_i / T_i$, вызванное изменением температуры окружающей среды, а следовательно, уменьшить суммарную температурную погрешность устройства в (4).

Цель экспериментальной части исследования — сравнение температурной стабильности напряжения стабилизации параметрического стабилизатора напряжения (рис. 1) для двух случаев: 1) отсутствие специальных методов термостабилизации; 2) применение микротермостатирования по отношению к источнику опорного напряжения (стабилитрону) VD5.

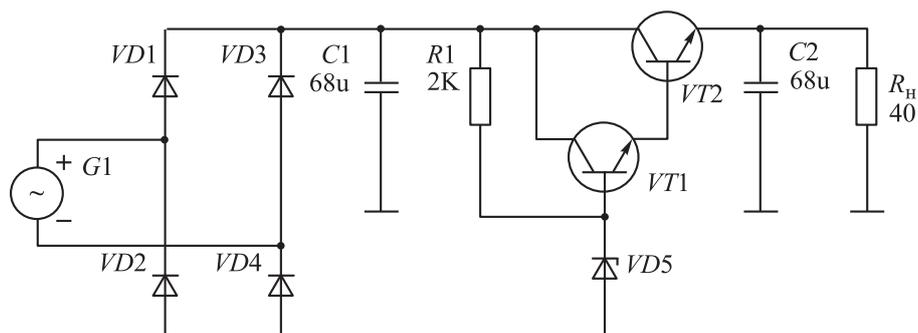


Рис. 1. Электрическая схема стабилизатора напряжения

Электрическая схема стабилизатора напряжения состоит из ЭРИ зарубежного производства. Основные параметры стабилизатора: амплитуда входного сигнала $U_{вх} = 30$ В; частота входного сигнала $f = 100$ Гц; напряжение стабилизации $U_{ст} = 13,7$ В; сопротивление нагрузки $R_H = 40$ Ом.

Технология вычислительного факторного эксперимента с использованием программы схемотехнического моделирования *MicroCAP* с последующим вычислением коэффициентов регрессии предложена в [22]. По этой технологии в настоящем исследовании реализован вычислительный факторный эксперимент по отношению к электрической схеме стабилизатора напряжения. При этом схемотехнический анализ проведен в программном комплексе *OrCAD PSpice*, статистические расчеты — в *MathCAD*. После проверки значимости коэффициентов регрессии окончательное уравнение температурной погрешности в соответствии с (4) имеет вид

$$\frac{\Delta U}{U} = -0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} - 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} - 0,207 \frac{\Delta T_{VD5}}{T_{VD5}}, \quad (5)$$

где $-0,077$; $-0,120$; $-0,207$ — значимые коэффициенты влияния для ЭРИ VT1, VT2, VD5.

Установлено, что коэффициенты влияния второго порядка в (5) пренебрежимо малы, поэтому адекватной регрессионной моделью признан линейный полином. Температурная погрешность напряжения стабилизации в основном зависит от температурной нестабильности транзисторов

$VT1$, $VT2$ и стабилитрона $VD5$. Остальные ЭРИ (факторы) электрической схемы оказывают незначительное влияние на температурную погрешность электронного средства. Для обеспечения заданной температурной стабильности этого устройства возможно применение термостатирования ЭРИ $VT1$, $VT2$, $VD5$.

Для упрощения экспериментального исследования проведем отбор единственного и наибольшего по абсолютной величине фактора — стабилитрона $VD5$ — для микротермостатирования. Экспериментальная установка для микротермостатирования конструктивно состоит из двух частей: 1) печатный узел стабилизатора напряжения, на котором расположена камера микротермостата (рис. 2, а); 2) управляющий блок, формирующий корректирующие воздействия микротермостата (рис. 2, б).

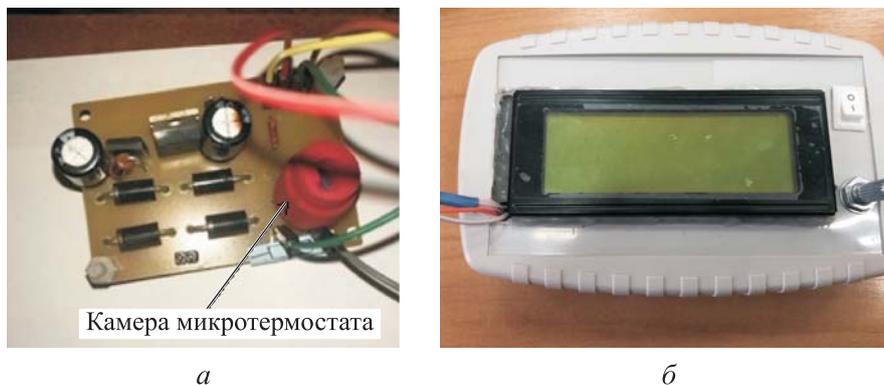


Рис. 2. Печатный узел (а) стабилизатора напряжения, на котором расположена камера микротермостата, и управляющий блок (б), формирующий корректирующие воздействия микротермостата

Камера микротермостата (рис. 3, а) представляет собой компактную цилиндрическую конструкцию диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Внутри камеры располагаются транзистор-нагреватель $BC337-25$, элемент термостатирования — стабилитрон $BZX84-C15$ и датчик температуры $LM35DZ$. Стабилитрон зафиксирован между плоскими гранями корпусов нагревателя и датчика теплопроводящим клеем $DOWSIL SE 9184$. Для надежной механической фиксации элементов микротермостата применены термоусадочная трубка, диаметр которой позволяет по касательной охватывать корпуса нагревателя и датчика, а также несколько спиральных витков медного провода для стягивания перечисленных элементов. Внутреннее пространство камеры микротермостата (полость внутри термоусадочной трубки) заполняется теплоизолирующим материалом — каолиновой ватой

МКРР-130. Элементы микротермостата вместе с элементами механической фиксации закрываются цилиндрическим пластиковым кожухом.

Управляющий блок выполнен в стандартном пластиковом корпусе *Gainta G500B* размером 145×90×32 мм. В крышке корпуса (рис. 3, б) предусмотрен прямоугольный вырез для жидкокристаллического дисплея *LCD-2004-A*. Кроме основной панели, дисплей имеет вспомогательную плату конвертера преобразования *I2C/SPI*, которая располагается на бобышках в правой верхней части панели. В корпусе размещена еще одна плата, на которой смонтированы микроконтроллер управления микротермостатом *Atmel ATmega8A* и кварцевый резонатор *HC-49S 10.00*. В левой части корпуса находятся кнопка выключения управляющего блока и переменный резистор для регулировки температуры нагревателя.

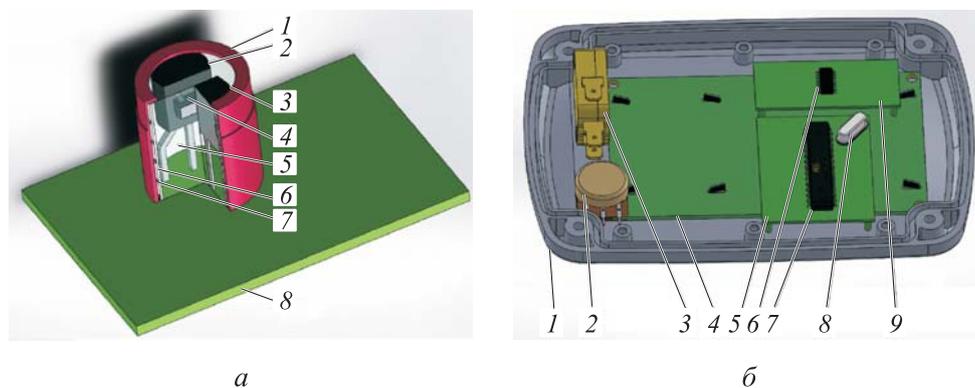


Рис. 3. Трехмерная компоновка установки микротермостатирования:

а — камера термостата (1 — кожух; 2 — датчик *LM35DZ*; 3 — транзистор-нагреватель *BC337-25*; 4 — стабилитрон *BZX84-C15*; 5 — теплоизоляционный материал МКРР-130; 6 — термоусадочная трубка; 7 — спиральный каркас; 8 — печатная плата);
б — управляющий блок (1 — корпус; 2 — переменный резистор; 3 — кнопка выключения; 4 — плата жидкокристаллического дисплея; 5 — плата микроконтроллера; 6 — контроллер дисплея; 7 — микроконтроллер *Atmel ATmega8A*; 8 — кварцевый резонатор *HC-49S 10.00*; 9 — плата конвертера преобразования *I2C/SPI*)

Электрическая схема управляющего блока микротермостата вместе с исполнительными элементами показана на рис. 4. Основа схемы — восьмиразрядный микроконтроллер *DD1* с 8 Кб внутрисистемно программируемой Flash-памятью *Atmel ATmega8A*. В качестве нагревателя используется транзистор *BC337-25*, на участке база-коллектор которого подключен переменный резистор *R3* сопротивлением 10 кОм. Регулировкой резистора *R3* изменяется ток коллектора транзистора-нагревателя *VT1*, что ведет к изменению его рабочей температуры и влияет на время выхода на режим микротермостата.

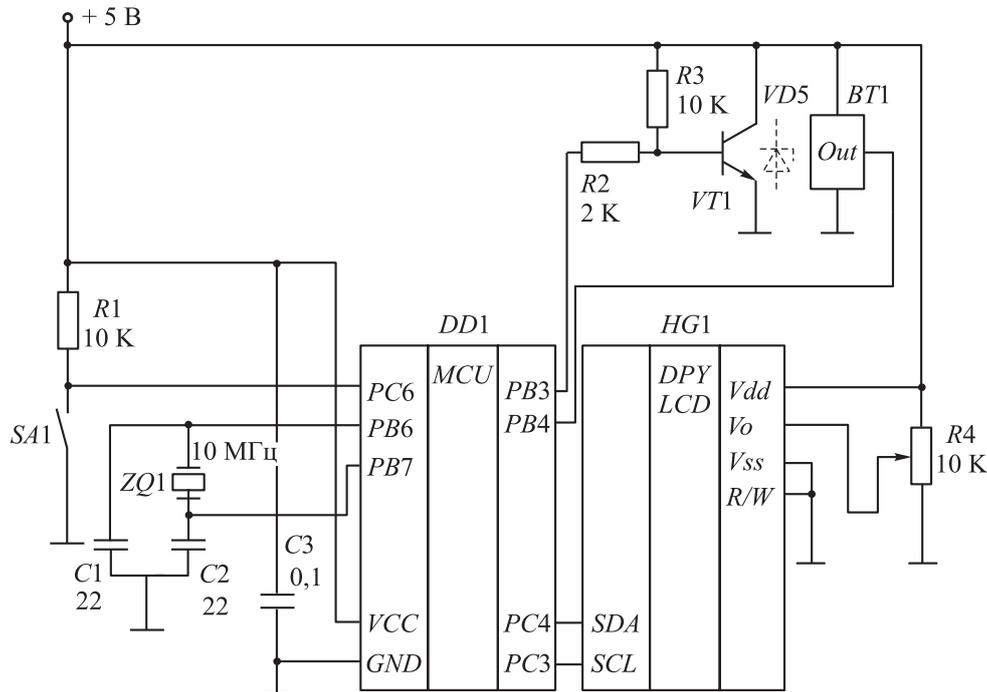


Рис. 4. Электрическая схема управляющего блока микротермостата

Выходное напряжение прецизионного интегрального датчика температуры *BT1* модели *LM35DZ* пропорционально температуре по шкале Цельсия. Для визуального контроля за температурой статирования к микроконтроллеру через порты *PC4* и *PC5* подключен жидкокристаллический дисплей *LCD-2004-A*. Переменный резистор *R4*, установленный на плате конвертера, позволяет регулировать яркость подсветки дисплея. Питание управляющего блока происходит от стандартного зарядного устройства *DEXP IET002048* для мобильных устройств.

С цифрового выхода *PB4* микроконтроллера *DD1* подается сигнал на базу транзистора *VT1*. Применяется позиционный способ регулирования: сигнал логической единицы ($U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$) в активном режиме и сигнал логического нуля ($U_{\text{вых}} = 0$) в пассивном режиме. Датчик *BT1* отслеживает температуру в термостатируемом объеме с точностью $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Выходное напряжение датчика *BT1* изменяется линейно с коэффициентом $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. Устанавливаемая программно температура статирования $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основа измерительной установки для исследования температурной стабильности схемы стабилизатора напряжения — комплекс для температурных испытаний *Thermostream TP04310A* [23]. Принцип работы комплекса построен на температурном воздействии сжатого воздуха с боль-

шим расходом на испытываемый образец (микросхему или печатную плату). Большой расход воздуха и давление позволяют комплексу менять температуру на образце за считанные секунды в очень широком диапазоне. Главное преимущество комплекса ТР04310А — очень высокая точность контроля температуры ($\pm 0,1$ °С), этот параметр превышает показатели самых качественных климатических камер.

Испытываемый образец стабилизатора напряжения подключался на входе к источнику питания переменного тока *Napui PW-500*, а на выходе — к мультиметру *Mastech MAS838*. Прибор *Napui PW-500* представляет собой одноканальный трансформаторный (линейный) источник питания с плавной регулировкой переменного тока и напряжения. Выходное напряжение линейного источника точное, стабильное и не содержит высокочастотных пульсаций.

Обсуждение полученных результатов. Результаты измерений представлены в графическом виде. На координатной плоскости (рис. 5, а) приведена температурная зависимость напряжения стабилизации для двух

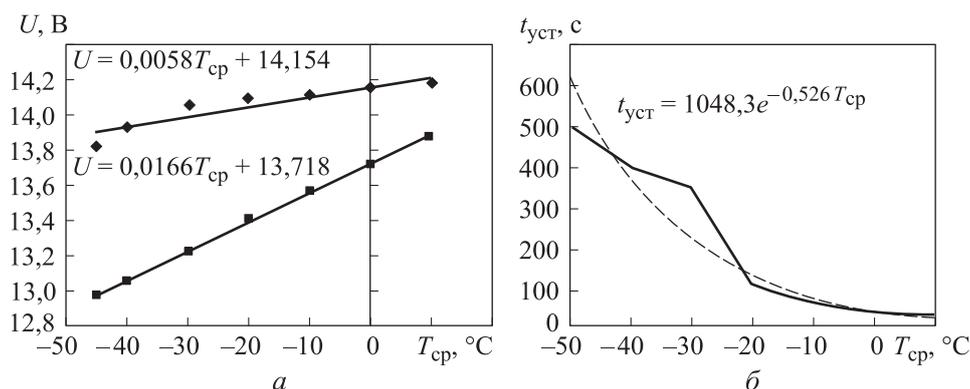


Рис. 5. Температурная зависимость напряжения стабилизации для двух конструктивных вариантов стабилизатора напряжения (а) и зависимость времени пускового режима микротермостата от температуры окружающей среды (б):

- — без термостатирования, линейная; ♦ — с микротермостатированием, линейная

конструктивных исполнений стабилизатора напряжения: 1) без применения термостатирования; 2) с применением микротермостатирования стабилизатора VD5. Диапазон изменения температуры окружающей среды варьировался в эксперименте от -45 до 10 °С. Каждая экспериментальная кривая аппроксимирована линейно. Линейность характеристик позволяет оценить температурный коэффициент напряжения (ТКН) двух конструктивных вариантов по формуле:

– для варианта без термостатирования

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U}{U \Delta T} \cdot 100 \% = \frac{12,96 - 13,87}{13,72(-45 - 10)} = 0,1206 \frac{\%}{^\circ\text{C}};$$

– для варианта с микротермостатированием

$$\text{ТКН} = \frac{13,82 - 14,17}{14,15(-45 - 10)} \cdot 100 \% = 0,045 \frac{\%}{^\circ\text{C}}.$$

Сравнение ТКН свидетельствует об увеличении температурной стабильности в 2,68 раза для конструктивного варианта с микротермостатированием. Дальнейшее повышение температуры окружающей среды снижает эффективность применения микротермостата, поскольку перестает выполняться условие [1]:

$$P < \sigma_{\text{экв. ср}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{ср max}}),$$

где P — мощность тепловыделения термостатируемого объекта (стабилизатора VD5); $\sigma_{\text{экв. ср}}$ — эквивалентная тепловая проводимость от объекта в окружающую среду; $T_{\text{ст}} = 35^\circ\text{C}$ — температура статирования; $T_{\text{ср max}}$ — максимальное значение температуры окружающей среды.

Анализ пускового режима микротермостата (рис. 5, б) предполагает определение интервала времени $t_{\text{уст}}$, по истечению которого система термостатирования после ее включения входит в установившийся режим. Полученная зависимость имеет нелинейный убывающий характер с минимальным временем выхода на режим 30 с при температуре 10°C и максимальным временем выхода на режим 500 с при температуре -45°C . Изменение времени выхода на режим происходит по регулярному закону, близкому к экспоненциальному. Применяя метод экспоненциальной аппроксимации, получаем

$$t_{\text{уст}} = 1048,3e^{-0,526T_{\text{ср}}}.$$

Фиксация времени выхода на режим сопровождалась достижением напряжения стабилизации, соответствующего значению текущей температуры (см. рис. 5, а). Увеличение времени выхода на режим при уменьшении температуры окружающей среды связано со значительным температурным перепадом и, как следствие, возрастающими тепловыми потерями в камере микротермостата. Особенность конструкции камеры микротермостата (см. рис. 3, а) заключается в наличии шести тепловых стоков — штыревых контактов нагревателя и датчика, выполненных из металла,

которые при увеличении перепада температуры начинают более интенсивно отводить тепловую энергию в окружающую среду.

Экспериментальное положение точек зависимости относительной погрешности напряжения стабилизации от температуры окружающей среды $\Delta U/U = f(T_{cp})$ хорошо аппроксимируется линейными выражениями (рис. 6, а). Для конструктивного случая без термостатирования при $T_{cp} = T_{ном} = 0$ ($T_{ном}$ — номинальная температура окружающей среды) устройство имеет нулевую погрешность; для случая с микротермостатированием при $T_{cp} = 0$ погрешность $\Delta U/U = 3,2$ %. Значения угловых коэффициентов различаются в 3 раза.

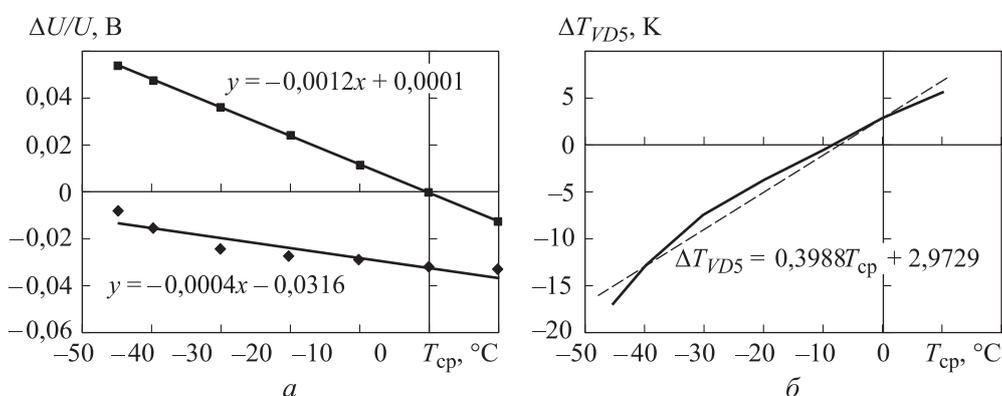


Рис. 6. Относительная погрешность напряжения стабилизации для двух конструктивных вариантов (а) и абсолютное отклонение рабочей температуры стабилизатора в камере микротермостата (б):

- — без термостатирования, линейная; ♦ — с микротермостатированием, линейная

Имея в распоряжении первичные экспериментальные данные (см. рис. 5) и аналитический вид уравнения температурной погрешности (5), перейдем к оценке температурной погрешности двух конструктивных исполнений стабилизатора напряжения. Перегрев ЭРИ ($VT1$, $VT2$, $VD5$), входящих в (5), находится по выражению

$$\Delta T = R_T P,$$

где R_T — тепловое сопротивление ЭРИ.

Тепловое сопротивление является паспортным значением ЭРИ и может быть найдено в соответствующей технической документации на ЭРИ (*datasheet*). Мощность тепловыделения ЭРИ наиболее просто можно определить на этапе проведения вычислительного факторного эксперимента [22] по нахождению коэффициентов влияния (5). Современные программные комплексы схемотехнического моделирования [24, 25] позволяют полу-

чать карту режимов электрической схемы, в том числе, мощность тепловыделения ЭРИ при проведении анализа по постоянному току (*DC Analysis*).

Рабочая температура ЭРИ находится как $T_p = \Delta T + T_{\text{ном}} = \Delta T$. Нулевое значение $T_{\text{ном}}$ принято для упрощения расчетов.

Для первого конструктивного варианта (без термостатирования) абсолютное отклонение рабочей температуры стабилитрона VD5 равно отклонению температуры окружающей среды от номинального значения:

$$\Delta T_{VD5} = \Delta T_{VT1} = \Delta T_{VT2} = \Delta T.$$

Проведем анализ величины ΔT_{VD5} для второго конструктивного варианта. Из уравнения температурной погрешности (5) выразим ΔT_{VD5} :

$$\Delta T_{VD5} = \frac{T_{VD5} \left(0,077 \frac{\Delta T_{VT1}}{T_{VT1}} + 0,120 \frac{\Delta T_{VT2}}{T_{VT2}} - \frac{\Delta U}{U} \right)}{-0,207}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) экспериментально найденные значения величин, табулированные для температуры окружающей среды из диапазона значений $-40 \dots 10$ °C, получаем зависимость абсолютного отклонения рабочей температуры стабилитрона VD5 для второго конструктивного варианта стабилизатора напряжения (рис. 6, б). Среднее значение отклонения рабочей температуры в указанном диапазоне значений температуры составляет $\Delta T_{\text{cp}} = -4,7$ °C. Полученная экспериментальная характеристика $\Delta T_{VD5} = f(T_{\text{cp}})$ аппроксимируется линейным выражением

$$\Delta T_{VD5} = 0,3988T_{\text{cp}} + 2,9729.$$

Следовательно, микротермостат будет иметь нулевое отклонение от температуры статирования ($\Delta T_{VD5} = 0$) при температуре окружающей среды $T_{\text{cp}} = -7,45$ °C. Задавая допустимый уровень температурной погрешности выходного напряжения в (5), по аналогии выводятся эмпирические функциональные зависимости температуры статирования $T_{\text{ст}}$ и мощности тепловыделения объекта статирования P в зависимости от температуры окружающей среды:

$$T_{\text{ст}} = f(T_{\text{cp}}) \Big|_{\frac{\Delta U}{U} = \text{const}}; \quad P = f(T_{\text{cp}}) \Big|_{\frac{\Delta U}{U} = \text{const}}.$$

Таким образом, уравнения (4), (5) при заданных уровнях температурной погрешности выходного параметра электронного средства могут служить для определения основных конструктивных параметров микротермостата.

Заключение. Предложена конструкция микротермостата стабилизатора напряжения, лишенная значительной материалоемкости и позволяющая увеличить температурную стабильность выходного напряжения не менее чем в 2 раза по сравнению с конструктивным вариантом без термостатирования.

Применение микроконтроллера для формирования корректирующих воздействий микротермостата дает несколько эксплуатационных преимуществ: программирование температуры статирования; возможность программного изменения закона регулирования; рациональное использование свободных аппаратных ресурсов микроконтроллера, входящего в состав электронного средства.

Уравнение температурной погрешности позволяет обоснованно подходить к вопросу обеспечения заданной температурной стабильности электронного средства. С помощью уравнений температурной погрешности (4), (5) можно проводить аналитическую оценку степени неравномерности температурного поля внутри камеры микротермостата.

Абсолютное отклонение температуры статирования в камере микротермостата в пределах $-15...5$ °С в диапазоне значений температуры окружающей среды $-45...10$ °С позволяет обеспечить погрешность напряжения стабилизации стабилизатора напряжения не менее 3,5 %.

Рекомендации. Сформулируем рекомендации, направленные на дальнейшее улучшение эксплуатационных свойств рассмотренной конструкции микротермостата.

Для ускорения выхода на режим и более точного поддержания температуры статирования целесообразно применить пропорциональный закон регулирования исполнительного элемента.

Применение датчика и нагревателя, выполненных в корпусах с планарным расположением выводов, позволит снизить эффект теплового стока по штыревым выводам в первоначальной конструкции.

Уменьшение температурной погрешности рассмотренного стабилизатора напряжения возможно достичь путем термостатирования всей группы ЭРИ ($VT1$, $VT2$, $VD5$), входящих в (5), путем размещения их в термостатируемом объеме.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам за помощь в техническом обеспечении представленного исследования: генеральному директору АО «НПЦ «Полюс» С.А. Русановскому; начальнику испытательного технического центра (ИТЦ) АО «НПЦ «Полюс» В.В. Вавилову; инженеру-электронике ИТЦ АО «НПЦ «Полюс» Е.А. Яковлеву.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М., Радио и связь, 1990.
- [2] Алексеев В.П. Трехмерное моделирование регулирования температуры подложки в гибридно-пленочном микротермостате. *Новые исследования в разработке техники и технологий*, 2018, № 1, с. 12–30.
- [3] Бабанин В. Термостатирование элементов микроконтроллерных устройств. *Радиолоцман*, 2016, № 8 (63).
URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=277869>
- [4] Козлов В.Г., Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Микротермостат с позисторным нагревателем. Патент РФ 2164709. Заявл. 29.04.1999, опубл. 27.03.2001.
- [5] Козлов В.Г., Озеркин Д.В., Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры микросборок. Патент РФ 2459231. Заявл. 30.09.2010, опубл. 20.08.2012.
- [6] Козлов В.Г., Алексеев В.П., Озеркин Д.В. и др. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок. Патент РФ 2461047. Заявл. 05.07.2011, опубл. 10.09.2012.
- [7] Козлов В.Г., Озеркин Д.В., Козлова В.Г. Устройство для стабилизации температуры элементов микросборок. Патент РФ 2439746. Заявл. 01.06.2010, опубл. 10.01.2012.
- [8] Гаджиев Н.Д., Гарибов М.А., Гусейнов Н.Л. и др. Микротермостат для интегральных схем. Патент СССР 514278. Заявл. 05.05.1974, опубл. 15.05.1976.
- [9] Цыганко П.Я., Орлов О.М., Голиков А.Н. и др. Микротермостат. Патент СССР 515095. Заявл. 10.09.1974, опубл. 25.05.1976.
- [10] Бегота Р.В., Сидоров М.Н., Тарасов В.П. Микротермостат. Патент СССР 826297. Заявл. 09.08.1979, опубл. 30.04.1981.
- [11] Панин Н.В., Панин В.В. Гибридно-пленочный микротермостат. Патент СССР 1164679. Заявл. 19.05.1983, опубл. 30.06.1985.
- [12] Шварц В.П., Лабжинский С.И., Гольдштейн Е.И. и др. Устройство для термостатирования. Патент СССР 748216. Заявл. 01.04.1981, опубл. 28.02.1983.
- [13] Бордачев Д.А., Шустов И.Е., Подчезерцев В.П. Экспериментальные исследования системы термостатирования прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 1 (112), с. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-1-24-34>
- [14] Shin D.D., Lee D.G., Mohanchandra K.P., et al. Thin film NiTi microthermostat array. *Sens. Actuator. A Phys.*, 2006, vol. 130-131, pp. 37–41.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.010>
- [15] Wijngaards D.D.L., de Graaf G., Wolffenbuttel R.F. Single-chip micro-thermostat applying both active heating and active cooling. *Sens. Actuator. A Phys.*, 2004, vol. 110, iss. 1-3, pp. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.10.084>
- [16] Симонян Р.А., Саноян А.А., Гулян А.Г. Высокоточный микротермостат. *Известия НАН РА. Технические науки*, 2010, т. 63, № 3, с. 302–305.

- [17] Гусев В.П., Фомин А.В., ред. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. М., Сов. радио, 1963.
- [18] Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М., Сов. радио, 1973.
- [19] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 1976.
- [20] Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА. М., Радио и связь, 1983.
- [21] Сыпчук П.П., Талалай А.М. Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА. М., Сов. радио, 1979.
- [22] Озеркин Д.В., Русановский С.А. Регрессионный анализ в исследовании температурной стабильности электронных схем. *Динамика сложных систем — XXI век*, 2017, т. 11, № 1, с. 65–72.
- [23] Мобильная температурная система для испытаний электронных компонентов и печатных плат, “ThermoStream” TP04300A. *equipnet.ru: веб-сайт*. URL: https://www.equipnet.ru/equip/equip_41737.html (дата обращения: 05.12.2019).
- [24] Кеуон Дж. OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей. М., ДМК Пресс; СПб., Питер, 2008.
- [25] Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования MicroCAP 8. М., Горячая линия–Телеком, 2007.

Озеркин Денис Витальевич — канд. техн. наук, декан радиоконструкторского факультета ТУСУР (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 40).

Бондаренко Виталий Олегович — студент магистратуры инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности ТПУ (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 30).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Озеркин Д.В., Бондаренко В.О. Применение метода микротермостатирования для повышения температурной стабильности бортовой электронной аппаратуры. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 3 (132), с. 18–36. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-3-18-36>

USING MICROTHERMOSTATTING TO INCREASE THERMAL STABILITY OF ON-BOARD ELECTRONICS

D.V. Ozerkin¹

ozerkindenis@yandex.ru

V.O. Bondarenko²

dizelf3333@gmail.com

¹**Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, Russian Federation**

²**Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation**

Abstract

The paper considers a promising temperature control method for electronic equipment, that is, microthermostating, which is characterised by maintaining a stable temperature in specific electric and radio devices. We show that the temperature error equation may be the most universal mathematical model for developing microthermostatted electronics. Statistical analysis methods concerning operation modes of an electronic circuit used in a device make it possible to obtain a regression model that forms the basis for deriving the temperature error equation. We propose to replace a physical factorial experiment with a numerical factorial experiment in order to reduce the time spent performing the statistical analysis. We note that it may be possible to implement this numerical factorial experiment using well-known circuit simulation software packages. The general form of the temperature error equation enables us to conclude that in the process of investigating the thermal stability of an electronic device there arise three subproblems: 1) the problem of synthesising fitting mathematical models for the electric and radio equipment; 2) the circuit modelling problem regarding the circuit used; 3) the topology design problem for computing the temperature field. In the experimental part of our investigation, we propose a simple design for a heater microthermostat in a voltage regulator. A feature of the microthermostat design is a microcontroller to form corrective actions affecting the actuators. In our studies we compared two voltage regulator designs: 1) without thermostating; 2) using microthermostating. We show that the thermostatted option displays thermal stability that is 2.68 times higher than that of the basic option

Keywords

On-board electronics, electric and radio equipment, temperature control, microthermostating, temperature error equation, thermal stability

Received 19.12.2019

Accepted 23.01.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Metody rascheta teplovogo rezhima priborov* [Calculation methods for thermal equipment of devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990.
- [2] Alekseev V.P. 3D modeling of substrate temperature control in a hybrid-film microthermostat. *Novye issledovaniya v razrabotke tekhniki i tekhnologiy*, 2018, no. 1, pp. 12–30 (in Russ.).

- [3] Babanin V. Thermostating of microcontroller devices elements. *Radiolotsman*, 2016, no. 8 (63) (in Russ.).
Available at: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=277869>
- [4] Kozlov V.G., Alekseev V.P., Ozerkin D.V. Mikrotermostat s pozistornym nagrevatelem [Microthermostat with a posistor heater]. Patent RU 2164709. Appl. 29.04.1999, publ. 27.03.2001 (in Russ.).
- [5] Kozlov V.G., Ozerkin D.V., Kozlova V.G. Ustroystvo dlya stabilizatsii temperatury mikrosborok [Device for stabilizing temperature of micro-assemblies]. Patent RU 2459231. Appl. 30.09.2010, publ. 20.08.2012 (in Russ.).
- [6] Kozlov V.G., Alekseev V.P., Ozerkin D.V., et al. Ustroystvo dlya stabilizatsii temperatury elementov mikroskhem i mikrosborok [Device for stabilizing temperature of microcircuits and microassemblies elements]. Patent Ru 2461047. Appl. 05.07.2011, publ. 10.09.2012 (in Russ.).
- [7] Kozlov V.G., Ozerkin D.V., Kozlova V.G. Ustroystvo dlya stabilizatsii temperatury elementov mikrosborok [Device for stabilizing temperature of microassembly elements]. Patent RU 2439746. Appl. 01.06.2010, publ. 10.01.2012 (in Russ.).
- [8] Gadzhiev N.D., Garibov M.A., Guseynov N.L., et al. Mikrotermostat dlya integral'nykh skhem [Microthermostat for integrated circuits]. Patent SU 514278. Appl. 05.05.1974, publ. 15.05.1976 (in Russ.).
- [9] Tsyganko P.Ya., Orlov O.M., Golikov A.N., et al. Mikrotermostat [Microthermostat]. Patent SU 515095. Appl. 10.09.1974, publ. 25.05.1976 (in Russ.).
- [10] Begota R.V., Sidorov M.N., Tarasov V.P. Mikrotermostat [Microthermostat]. Patent SU 826297. Appl. 09.08.1979, publ. 30.04.1981 (in Russ.).
- [11] Panin N.V., Panin V.V. Gibridno-plenochnyy mikrotermostat [Hybrid-film microthermostat]. Patent SU 1164679. Appl. 19.05.1983, publ. 30.06.1985 (in Russ.).
- [12] Shvarts V.P., Labzhinskiy S.I., Goldshteyn E.I., et al. Ustroystvo dlya termostatirovaniya [Device for thermostating]. Patent SU 748216. Appl. 01.04.1981, publ. 28.02.1983 (in Russ.).
- [13] Bordachev D.A., Shustov I.E., Podchezertsev V.P. Experimental research of temperature control system of a precision gyroscopic meter of angular velocity vector. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 1 (112), pp. 24–34 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-1-24-34>
- [14] Shin D.D., Lee D.G., Mohanchandra K.P., et al. Thin film NiTi microthermostat array. *Sens. Actuator. A Phys.*, 2006, vol. 130-131, pp. 37–41.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.010>
- [15] Wijngaards D.D.L., de Graaf G., Wolffenbuttel R.F. Single-chip micro-thermostat applying both active heating and active cooling. *Sens. Actuator. A Phys.*, 2004, vol. 110, iss. 1-3, pp. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.10.084>
- [16] Simonyan R.A., Sanoyan A.A., Gulyan A.G. High-accuracy micro-thermostat. *Izvestiya NAN RA. Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of the NAS RA: Technical Science], 2010, vol. 63, no. 3, pp. 302–305 (in Russ.).

- [17] Gusev V.P., Fomin A.V., eds. Raschet elektricheskikh dopuskov radioelektronnoy apparatury [Calculation of electrical tolerances for radioelectronic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963.
- [18] Fomin A.V., Borisov V.F., Chermoshenskiy V.V. Dopuski v radioelektronnoy apparature [Tolerances of radioelectronic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973.
- [19] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning of experiment at research for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976.
- [20] Gludkin O.P., Chernyaev V.N. Analiz i kontrol' tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva REA [Analysis and monitoring of technological processes for manufacturing radioelectronic devices]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1983.
- [21] Sypchuk P.P., Talalay A.M. Metody statisticheskogo analiza pri upravlenii kachestvom izgotovleniya elementov REA [Statistical analysis methods at quality management of manufacturing elements for radioelectronic devices]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979.
- [22] Ozerkin D.V., Rusanovskiy S.A. Regression analysis in the research of the temperature stability of electronic circuits. *Dinamika slozhnykh sistem — XXI vek* [Dynamics of Complex Systems — XXI century], 2017, vol. 11, no. 1, pp. 65–72 (in Russ.).
- [23] Mobil'naya temperaturnaya sistema dlya ispytaniy elektronnykh komponentov i pechatnykh plat, "ThermoStream" TP04300A. *equipnet.ru: website* (in Russ.). Available at: https://www.equipnet.ru/equip/equip_41737.html (accessed: 05.12.2019).
- [24] Keown J. OrCAD PSpice and circuit analysis. Prentice Hall, 2000.
- [25] Amelina M.A., Amelin S.A. Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya MicroCAP 8 [The program of circuit simulation MicroCAP 8]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007.

Ozerkin D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Dean, Radio Engineering Faculty, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Lenina prospekt 40, Tomsk, 634050 Russian Federation).

Bondarenko V.O. — Master's Degree Student, Engineering School of Non-Destructive Testing and Safety, Tomsk Polytechnic University (Lenina prospekt 30, Tomsk, 634050 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ozerkin D.V., Bondarenko V.O. Using microthermostatting to increase thermal stability of on-board electronics. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 3 (132), pp. 18–36 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-3-18-36>