

УДК 681.5.08

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ПАРЫ «ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПОНЕНТ-ТЕРМОДАТЧИК»¹

Статья поступила в редакцию 25.11. 2014, в окончательном варианте 03.02. 2015

Аminev Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: aminev.d.a@yandex.ru

Манохин Александр Иванович, ведущий программист, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: asonika@list.ru

Семененко Александр Николаевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: asemenenko@hse.ru

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Обоснована целесообразность применения контактных методов контроля температуры элементов электронных средств при проведении их теплового диагностирования в закрытом конструктивном объеме. Предложены и исследованы топологические тепловые модели электронного компонента, установленного на печатную плату и пары «электронный компонент-термодатчик». Модели основаны на электротепловой аналогии и были реализованы в подсистеме теплового моделирования АСОНИКА-Т. Эти модели предлагается использовать в новом методе расчёта погрешности, вносимой датчиком, при контактном измерении температуры элемента. Подробно описаны технология (этапы) построения этих моделей. Показано, что разработанные топологические модели и метод удовлетворяют предъявляемым требованиям, в т.ч. в отношении точности. Проведена экспериментальная проверка предложенного метода. Сделан вывод, что его использование в процессе теплового диагностирования электронных средств позволит повысить точность измерений температуры за счет компенсации систематической погрешности, вносимой контактными термодатчиками. Это, в свою очередь, положительно скажется на достоверности определения (выявления) дефектных электронных компонентов и, как следствие, на повышении надёжности электронного средства в целом.

Ключевые слова: модель тепловых процессов, АСОНИКА-Т, погрешность, электронный компонент, термопара, результаты эксперимента, топологическая модель, тепловая модель, электронные средства, термодатчик

TOPOLOGICAL THERMAL MODEL OF THE COUPLE ELECTRONIC COMPONENT-SENSOR

Aminev Dmitriy A., Ph.D. (Engineering), National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: aminev.d.a@yandex.ru

Manokhin Aleksandr I., leading programmer, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: asonika@list.ru

Semenenko Aleksandr N., post-graduate student, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: asemenenko@hse.ru

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422 «Информационно-измерительная система численного моделирования и мониторинга температурных полей электронных средств»).

Uvaysov Saygid U., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Give proof of the expediency of application of the contact methods of temperature control elements of the electronic media during their thermal diagnostics in a closed structural volume. Proposed and investigated topological thermal models of electronic component mounted on the circuit Board, and a pair of "electronic component-sensor". The models is based on electro-thermal analogy and have been implemented in the subsystem thermal modeling ASONIKA-T. These models are encouraged to use the new method to estimate the error, introduced by the sensor, when the contact of element measurement temperature. Detail technology (stages) of constructing these models is written. It is shown that the developed topological model and method meet the requirements, including the accuracy. Experimental validation of the proposed method is given. The conclusion that its use in the process of thermal diagnostics of electronic means will allow to increase the accuracy of the temperature measurements due to the compensation of the systematic errors introduced by the contact sensor. This, in turn, will positively affect the reliability of determination (detection) defective electronic components and, consequently, to improve the reliability of the electronic means in general.

Keywords: model of thermal processes, ASONIKA-T, error, electronic component, thermocouple, results of the experiment, topological model, thermal model, electronic means, thermal sensor

Введение. Измерение температур комплектующих электронных компонентов является обязательной процедурой при контроле тепловых режимов печатных узлов электронных средств, выполняемой на этапах приемо-сдаточных и климатических испытаний. В настоящее время на предприятиях-изготовителях чаще прибегают к тепловизионному контролю. Однако существуют ситуации, когда необходимо проводить измерения температур электронных компонентов в закрытом конструктивном объеме, в котором невозможно разместить тепловизионные камеры. В этих случаях необходимо применение контактных методов контроля температуры. Однако в современных условиях стоит проблема повышения точности измерений тепловых режимов – для улучшения достоверности диагностирования качества печатных узлов [12]. Это, в свою очередь, повысит надежность электронных средств. Такая задача актуальна, например, при проектировании, приемо-сдаточных испытаниях и эксплуатации различных радиоэлектронных устройств – особенно в составе бортовой аппаратуры, где элементы расположены достаточно тесно. При этом естественная конвекция воздуха может отсутствовать из-за невесомости, а возможности организации принудительной конвекции в замкнутом объеме быть достаточно ограниченными.

Для решения указанной проблемы в работе предлагается новый метод расчёта погрешности, вносимой датчиком при контактном измерении температуры нагретых электро-радиоэлементов (ЭРЭ). Метод включает в себя построение топологических моделей электронного компонента и пары «ЭРЭ-термодатчик». Современные технологии математического и компьютерного моделирования позволяют достаточно точно и быстро провести расчет тепловых процессов, протекающих в указанных объектах. Среди зарубежных САПР для расчета тепловых процессов следует выделить FLoTHERM, HyperLynx Thermal и Sigrity [14, 15]. Однако их использование сопряжено с определенными трудностями: отсутствием базы данных отечественных электронных компонентов; сложностью освоения программ из-за нехватки справочных руководств и недостаточной технической поддержки, высокая стоимость. Поэтому разработка моделей в статье проведена с использованием отечественной подсистемы анализа и обеспечения тепловых характеристик радиоэлектронной аппаратуры АСОНИКА-Т [1, 2, 13], которая лишена указанных недостатков.

Метод расчёта погрешности при измерении температуры. Предлагаемый метод расчёта погрешности, вносимой датчиком, предназначен для повышения точности измерения температуры ЭРЭ. В его основе лежит проведение компьютерного моделирования теп-

ловых процессов. Метод имеет следующие особенности и достоинства [5, 8, 9]: основан на расчете моделей тепловых процессов (МТП); позволяет автоматически производить расчёт погрешности при измерении температуры ЭРЭ при помощи термодатчика.

Схема метода расчёта погрешности, вносимой термодатчиком при измерении температуры, представлена на рисунке 1. Для определения систематической погрешности, возникающей от термодатчика при измерении температуры ЭРЭ, составляются две модели: (1-ая МТП) ЭРЭ, установленного на печатной плате; (2-ая МТП) «ЭРЭ-датчик» – соответствует ЭРЭ, установленному на печатной плате и закреплённому на нем датчику температуры.

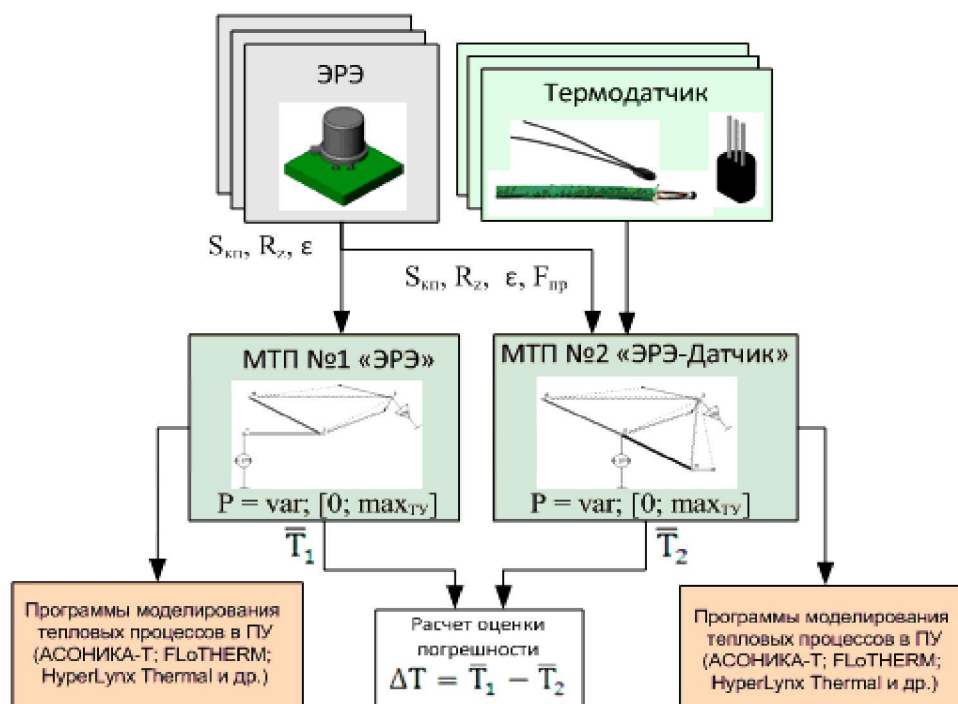


Рис. 1. Общая схема взаимодействия различных объектов в методе расчёта погрешности, вносимой термодатчиком при измерении температуры

Исходными данными для расчетов являются: площадь $S_{кп}$ [м²] контактирующей поверхности; контактное тепловое сопротивление R_z [С/Вт]; коэффициент черноты поверхности ϵ ; прижимная сила $F_{пр}$ [Н]. Дальнейшие расчеты выполняются посредством САПР с использованием метода конечных элементов двумерной или трехмерной постановки.

После проведения моделирования обеих МТП получаем две оценки температуры ЭРЭ: \bar{T}_1 (для первой МТП) и \bar{T}_2 (для второй МТП). Следует понимать, что полученные температуры \bar{T}_1 и \bar{T}_2 являются приближёнными. Так как в обеих моделях не учитывается тот факт, что контролируемый ЭРЭ окружен другими компонентами, которые оказывают влияние на его тепловой режим. К тому же точность соответствия МТП настоящему (реальному) ЭРЭ зависит от степени детализации его описания.

Погрешность, возникающая при измерении температуры ЭРЭ термодатчиком равна:

$$\Delta T = \bar{T}_1 - \bar{T}_2 . \quad (1)$$

Для того чтобы определить истинную температуру корпуса ЭРЭ (T_K), необходимо к измеренному при помощи термодатчика значению температуры $T_{ИЗМ}$ прибавить величину поправки ΔT :

$$T_K = T_{ИЗМ} + \Delta T. \quad (2)$$

В рамках метода возможно моделирование тепловых процессов для расчета поправки, вносимой в результаты измерений температуры как в стационарном режиме, так и в динамическом. Во втором случае необходимо заранее рассчитать время начала измерений $t_{ИЗМ0}$, которое определяется как время выхода самого инерционного ЭРЭ в изделии на стационарный температурный режим при отсутствии колебаний его температуры.

Для проведения экспериментальной проверки метода расчета погрешности, вносимой датчиком при измерении температуры нагретых ЭРЭ, авторы создали соответствующую модель.

Модель тепловых процессов электронного компонента и пары «ЭРЭ-термодатчик». Для проведения экспериментальной проверки метода расчета погрешности, вносимой датчиком при измерении температуры нагретых электронных компонентов, в качестве исследуемого объекта был взят распространенный транзистор КТ363А [7] без радиатора и принудительной конвекции воздуха. Предполагается, что данный транзистор установлен на печатной плате, а в роли термодатчика используется термопара типа «К». Для определения температуры транзистора необходимо построить его МТП. Формализуем некоторые процессы теплопередачи внутри транзистора и в термопаре [10], приняв предположение «изотермичности» для следующих объектов: корпус транзистора; кристалл транзистора; выводы транзистора; измерительный спай; провода термопары.

В соответствии с методом электротепловой аналогии [5] и выбранной идеализацией (формализацией) процессов теплопередачи разбиваем транзистор на изотермические объемы для МТП № 1 транзистора и МТП № 2 пары «транзистор-термопара».

Рассмотрим виды теплообмена между представленными узлами для обеих МТП. Узлы, находящиеся в состоянии теплообмена друг с другом, и вид взаимодействия для МТП транзистора, установленного на печатную плату, приведены в таблице 1. Характеристики транзистора имеются в работе Е.А. Москатова [6]. Разработанная МТП транзистора, установленного на печатной плате, в соответствии с обозначенными в таблице 1 номерами узлов и ветвей представлена на рисунке 2.

Таблица 1

Пары узлов для модели тепловых процессов (МТП №1) транзистора

Узлы	Тип взаимодействия	Номер ветви для схемы на рисунке 2
Кристалл (1) – Корпус (2)	Заданное тепловое сопротивление	1
Корпус (2) – Окружающая среда (3)	Естественная конвекция с передачей тепла неразвитой вертикальной цилиндрической поверхностью в окружающую среду	28
Корпус (2) – Окружающая среда (3)	Излучение с неразвитой цилиндрической поверхности	19
Кристалл (1) – Выводы №№ 1 - 3 (4, 6, 7)	Кондуктивный теплообмен в декартовой системе координат	2
Выводы №№ 1 - 3 (4, 6, 7) – Печатная плата (5)	Контактный теплообмен (прямоугольное пятно)	11
Выводы №№ 1 - 3 (4, 6, 7) – Окружающая среда (3)	Естественная конвекция с передачей тепла неразвитой вертикальной цилиндрической поверхностью в окружающую среду	28

Выводы №№ 1 - 3 (4, 6, 7) – Окружающая среда (3)	Излучение с неразвитой цилиндрической поверхности	19
Печатная плата (5) – Окружающая среда (3)	Естественная конвекция с передачей тепла плоской неразвитой поверхностью в окружающую среду	26
Печатная плата (5) – Окружающая среда (3)	Излучение с неразвитой поверхности	16
Кристалл (1) – (0)	Источник мощности	101
Окружающая среда (3) – (0)	Источник постоянной температуры	111

Примечание. Под «неразвитой» поверхностью понимается такая, для которой не были использованы специальные методы увеличения ее фактической площади на единицу поверхности (ионное травление в вакууме, пескоструйная обработка материала корпуса и пр.).

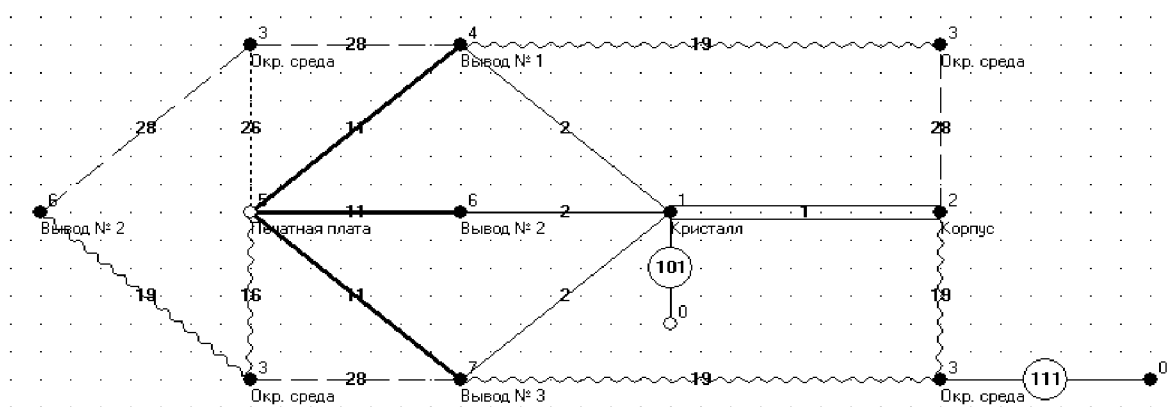


Рис. 2. Модель тепловых процессов транзистора, установленного на печатной плате

МТП транзистора с установленной на нем термпарой содержит те же самые пары взаимодействующих узлов, что и предыдущая МТП (табл. 1), но с добавлением некоторых новых пар (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Пары узлов для модели тепловых процессов (МТП №2) транзистор-термопара

Узлы	Тип взаимодействия	Номер ветви для схемы на рисунке 3
Корпус (2) – Измерительный спай (8)	Контактный теплообмен (круглое пятно)	12
Измерительный спай (8) – Окружающая среда (3)	Естественная конвекция с передачей тепла неразвитой вертикальной цилиндрической поверхностью в окружающую среду	28
Измерительный спай (8) – Окружающая среда (3)	Излучение с неразвитой цилиндрической поверхности	19
Измерительный спай (8) – Провода термопары (9)	Кондуктивный теплообмен в декартовой системе координат	2
Провода термопары (9) – Окружающая среда (3)	Естественная конвекция с передачей тепла неразвитой вертикальной цилиндрической поверхности в окружающую среду	28

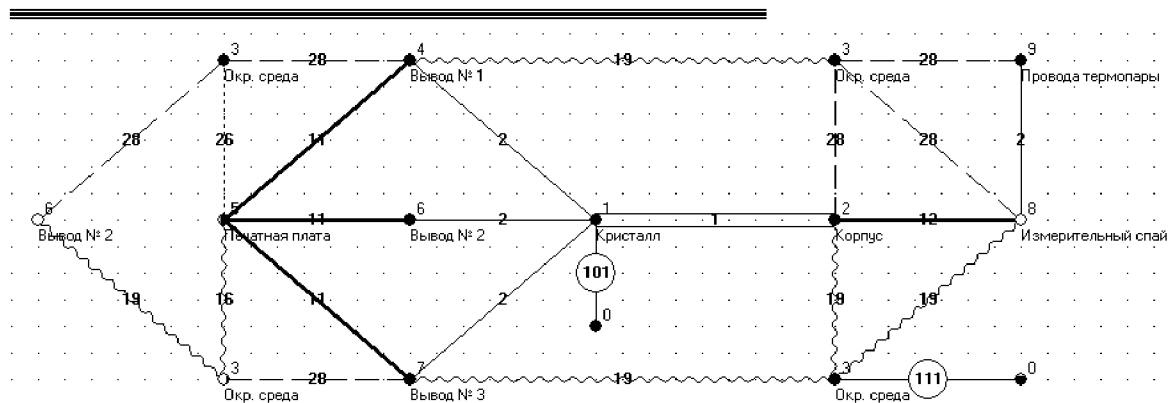


Рис. 3. Модель тепловых процессов транзистора с установленной на нём термопарой

Результаты вычислительных экспериментов для представленных моделей. В таблице 3 представлены результаты расчёта разработанных моделей МТП № 1 (рис. 2) и МТП № 2 (рис. 3) в подсистеме АСОНИКА-Т. Были заданы следующие исходные данные: мощность тепловыделения кристалла транзистора 0,2 Вт, температура окружающей среды 20 °С. Величина поправки для температуры корпуса транзистора составляет $\Delta T_{РАСЧ} = 72,5 - 61,7 = 10,8 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Таблица 3

Результаты моделирования разработанных МТП при стационарном тепловом режиме

Узел	Температура, [°C]	
	МТП № 1	МТП № 2
Кристалл	74,4	64,3
Корпус	72,5	62,1
Окружающая среда	20,0	20,0
Вывод № 1	71,4	63,6
Печатная плата	71,2	63,1
Вывод № 2	72,3	63,9
Вывод № 3	72,3	63,9
Измерительный спай	–	61,7
Провода термопары	–	57,9

Из таблицы видно, что использование термопары существенно влияет на тепловой режим всех узлов (частей) моделируемого объекта.

Результаты лабораторного эксперимента. В ходе проведения лабораторного эксперимента измерялась температура корпуса транзистора КТ363А, установленного на печатной плате. Питание транзистора осуществлялось поверенным источником питания Б5-3003 (рис. 4). Определение температуры производилось двумя способами [11]: при помощи поверенных тепловизора Fluke Ti9 и мультиметра АРРА-109N с термопарой типа «К» (рис. 4). На контакт между измерительным спаем термопары и корпусом транзистора был нанесен слой термопасты КПТ-8 толщиной порядка 0,1 мм. Значения, полученные при помощи тепловизора, рассматривались как эталонные. Цена деления шкалы тепловизора составляла 0,1 °С. Результаты представлены в таблице 4.



Рис. 4. Приборы, использованные для проведения экспериментальных исследований: термопара, мультиметр, источник питания, тепловизор

Таблица 4

**Сравнение результатов проведения измерений температуры
 в лабораторном эксперименте (градусы Цельсия)**

Показания тепловизора	Показания мультиметра
72,2	60,0
73,0	61,0
72,4	58,0
71,6	61,0
72,4	64,0
72,3	60,0
71,8	59,0
72,1	60,0
72,5	56,0
72,8	64,0
71,7	62,0
72,4	63,0
71,9	61,0
72,5	59,0
72,4	64,0
72,9	63,0
72,3	62,0
72,6	62,0
72,7	60,0
72,4	63,0

Среднее арифметическое значение температуры корпуса, измеренной при помощи тепловизора, составило $72,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, а при помощи термопары – $61,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. В соответствии с формулой (1) $\Delta T_{\text{ЭКСП}} = 72,4 - 61,1 = 11,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Температура корпуса транзистора согласно формуле (2) равна $T_K = T_{\text{ИЗМ}} + \Delta T_{\text{РАСЧ}} = 61,1 + 10,8 = 71,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Разность между расчётной и измеренной величинами поправок составляет $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, что существенно меньше величины самой поправки. Таким образом, представленный метод расчёта погрешности, вносимой датчиком при измерении температуры поверхности нагретых электронных компонентов, можно

считать экспериментально подтвержденным. Результаты проведенного эксперимента показали, что предложенный метод обладает достаточно высокой точностью применительно к данному транзистору. Этот вывод может быть очевидно распространен по крайней мере на транзисторы аналогичных конструкций и размеров.

Итак, предложенные топологические тепловые модели отдельного установленного электронного компонента и пары «электронный компонент-термодатчик» построены на основе электротепловой аналогии. Они используются в разработанном методе расчёта погрешности, вносимой датчиком, при оценке температуры поверхности нагретых электронных компонентов, путем сравнения результатов для двух предложенных моделей.

На основании проделанной работы были сделаны следующие **выводы**.

1. Предлагаемая модель электронный «компонент-термодатчик» позволяет исследовать протекание тепловых процессов в электронных средствах при контактировании его комплектующих элементов с датчиком в стационарном режиме.

2. Использование предложенных топологических моделей и метода позволяет повысить точность измерения температур элементов печатных узлов электронных средств за счет компенсации систематической погрешности, вносимой при измерении температуры контактным термодатчиком.

3. Предложенный метод позволил определить при помощи термопары «скорректированную» (на величину погрешности) температуру корпуса транзистора КТ363А, которая составила $71,9^{\circ}\text{C}$, что совпадает с показаниями тепловизора с учетом его погрешности $\pm 5\%$.

4. Целесообразно провести моделирование и лабораторные эксперименты с использованием других электронных компонентов (транзисторы иных типов, микросхемы, диоды и т.д.) для подтверждения «сферы» (области) работоспособности метода в целом.

5. Перспективой дальнейших исследований по тематике данной статьи можно считать изучение динамического теплового режима пары «электронный компонент-термодатчик».

Список литературы

1. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А. С. Шалумов, Н. В. Малютин, Ю. Н. Кофанов и другие ; под общ. ред. Ю. Н. Кофанова, Н. В. Малютина, А. С. Шалумова. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – Т. 1. – 368 с.

2. Асоника. Автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры // ООО «НИИ «АСОНИКА». – Режим доступа: <http://asonika-online.ru/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

3. Горячев Н. В. Тепловая модель учебной системы охлаждения / Н. В. Горячев, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2. – С. 197–209.

4. Ершов А. Б. Определение теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых диодов по переходной функции термочувствительного параметра / А. Б. Ершов, В. Я. Хорольский, А. Н. Хабаров, А. В. Ефанов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 3. – С. 169–187.

5. Кофанов Ю. Н. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств / Ю. Н. Кофанов, А. С. Шалумов, С. У. Увайсов, С. Ю. Сотникова ; под отв. ред. Ю. Н. Кофанова. – Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2013. – 392 с.

6. Москатов Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – Москва : Журнал «Радио», 2005. – 208 с.

7. ТУ 11-ЩТ0.336.014ТУ-85. Транзисторы типа КТ363.– 59 с.

8. Увайсов С. У. Исследование возможностей нестационарных тепловых процессов для выявления конструктивных дефектов аппаратуры / С. У. Увайсов, И. А. Иванов, Я. Л. Масленникова, О. П. Хацкевич // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий : материалы научно-практической конференции / под ред. В. Г. Домрачева, С. У. Увайсова. – Москва :

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, 2009. – С. 229–232.

9. Увайсов С. У. Методика обеспечения тепловой контролепригодности радиотехнических устройств на этапе проектирования / С. У. Увайсов, Н. К. Юрков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки (Российская Федерация). – 2012. – № 7. – С. 16–22.

10. Увайсов С. У. Моделирование тепловых процессов при проектировании, испытаниях и контроле качества радиоэлектронных средств / С. У. Увайсов, Ю. Н. Кофанов, А. И. Манохин. – Москва : Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, 1998. – 139 с.

11. Увайсов С. У. Применение компьютерного измерительного тепловизора КРИТ_Т и математического моделирования для обеспечения надежности и качества радиоэлектронных средств / С. У. Увайсов, А. В. Сегень, Ю. Н. Кофанов, Г. А. Пятницкая. – Москва : Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, 1997. – 121 с.

12. Хацкевич О. П. Инновационный подход к синтезу тестов для диагностирования аналоговых схем / О. П. Хацкевич, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Инновационные технологии, научные и технические достижения, их правовая защита : сборник статей IV Международной научно-практической конференции (г. Тольятти, 26–28 мая 2011 г.) / науч. ред. З. Ф. Мазур. – Тольятти – Москва, 2011. – С. 298–302.

13. Шалумов А. С. Моделирование тепловых процессов в технических объектах с помощью автоматизированной подсистемы АСОНИКА-Т : учебное пособие / А. С. Шалумов, А. И. Манохин, Н. А. Шалумова. – Ковров : Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева, 2002. – 140 с.

14. FloTHERM. Perform thermal analysis, create virtual models, and test design modifications of electronic equipment before physical prototyping // Mentor Graphics. – Available at: <http://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm/>.

15. HyperLynx Thermal. Fast, accurate 3D modeling and simulation of thermal impact of PCB placement and routing // Mentor Graphics. – Available at: <http://www.mentor.com/pcb/hyperlynx/thermal/>.

References

1. Shalumov A. S., Malutin N. V., Kofanov Y. N., et al. *Avtomatizirovannaya sistema ASONIKA dlya proektirovaniya vysokonadezhnykh radioelektronnykh sredstv na printsipakh CALS-tehnologiy* [The automated system ASONIKA for design of highly reliable radio-electronic means on the principles of CALS technologies], Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007, vol. 1. 368 p.

2. Asonika. Avtomatizirovannaya sistema obespecheniya nadezhnosti i kachestva apparatury [ASONIKA. Automated system reliability and quality of equipment]. *ООО «НИИ «АСОНИКА»* [LLC "SRI" ASONIKA"]. Available at: <http://asonika-online.ru/>.

3. Goryachev N. V., Petryanin D. L. Teplovaya model uchebnoy sistemy okhlazhdeniya [Thermal model of the cooling system of educational]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 2, pp. 197–209.

4. Yershov A. B., Khorolskiy V. Ya., Khabarov A. N., Yefanov A. V. Opredelenie teplovogo so-protivleniya perekhod-korpus silovykh poluprovodnikovyykh diodov po perekhodnoy funktsii termochuvstvitelnogo parametra [Determination of thermal resistance junction to case of power semiconductor diodes on a heat-sensitive transfer function parameter]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 3, pp. 169–187.

5. Kofanov Yu. N., Shalumov A. S., Uvaysov S. U., Sotnikova S. Yu. *Informatsionnye tehnologii proektirovaniya radioelektronnykh sredstv* [Information technologies of radio-electronic means design], Moscow, National Research University Higher School of Economics Publ. House, 2013. 392 p.

6. Moskatov Ye. A. *Spravochnik po poluprovodnikovym priboram* [Reference for semiconductor devices], Moscow, Zhurnal "Radio" Publ., 2005. 208 p.

7. TU-11 SCHT0.336.014TU-85. Type transistors KT363. 59 p.

8. Uvaysov S. U., Ivanov I. A., Maslennikova Ya. L., Khatskevich O. P. Issledovaniye vozmozhnostey nestatsionarnyykh teplovykh protsessov dlya vychisleniya konstruktivnykh defektov apparatury [Research of opportunities of non-stationary thermal processes for calculation of equipment constructive defects]. *Innovat-*

sii v usloviyakh razvitiya informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy : materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Innovations in the Conditions of Development of Information and Communication Technologies. Proceedings of the Scientific and Practical Conference], Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics Publ. House, 2009, pp. 229–232.

9. Uvaysov S. U., Yurkov N. K. Metodika obespecheniya teplovoy kontroleprigodnosti radiotekhnicheskikh ustroystv na etape proyektirovaniya [Technique of providing a thermal testability of radio engineering devices at design stage]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskoye nauki (Rossiyskaya Federatsiya)* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences (Russian Federation)], 2012, no. 7, pp. 16–22.

10. Uvaysov S. U., Kofanov Yu. N., Manokhin A. I. *Modelirovaniye teplovykh protsessov pri proyektirovanii, ispytaniyakh i kontrole kachestva radioelektronnykh sredstv* [Modeling of thermal processes at design, tests and quality control of radio-electronic means], Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics Publ. House, 1998. 139 p.

11. Uvaysov S. U., Segen A. V., Kofanov Y. N., Pyatnitskaya G. A. *Primeneniye kompyuternogo izmeritelnogo teplovizora KRIT_T i matematicheskogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadezhnosti i kachestva radioelektronnykh sredstv* [Use of computer measuring thermal imager KRIT_T and mathematical modeling for ensuring reliability and quality of radio-electronic means], Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics Publ. House, 1997. 121 p.

12. Khatskevich O. P., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Innovatsionnyy podkhod k sintezu testov dlya diagnostirovaniya analogovykh skhem [Innovative approach to synthesis of tests for diagnosing of analog schemes]. *Innovatsionnyye tekhnologii, nauchnyye i tekhnicheskoye dostizheniya, ikh pravovaya zashchita : sbornik statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Tolyatti, 26–28 maya 2011 g.)* [Innovative Technologies, Scientific and Technical Achievements, Their Legal Protection. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (Tolyatti, 26–28 May 2011)], Tolyatti, Moscow, 2011, pp. 298–302.

13. Shalumov A. S., Manokhin A. I., Shalumova N. A. *Modelirovaniye teplovykh protsessov v tekhnicheskikh obektakh s pomoshchyu avtomatizirovannoy podsistemy ASONIKA-T* [Modeling of thermal processes in technical objects by means of the automated ASONIKA-T subsystem], Kovrov, Kovrov State Technological Academy named Degtyarev Publ. House, 2002. 140 p.

14. FloTHERM. Perform thermal analysis, create virtual models, and test design modifications of electronic equipment before physical prototyping. *Mentor Graphics*. Available at: <http://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm/>.

15. HyperLynx Thermal. Fast, accurate 3D modeling and simulation of thermal impact of PCB placement and routing. *Mentor Graphics*. Available at: <http://www.mentor.com/pcb/hyperlynx/thermal/>.

УДК: 519.863

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ОСТАТКОВ ДЕНЕЖНЫХ СРЕДСТВ НА ЛИЦЕВЫХ СЧЕТАХ В ПРОЦЕССЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ НАЧИСЛЕНИЯ ПЛАТЫ ЗА ЖКУ

Статья поступила в редакцию 13.12. 2014, в окончательном варианте 04.02. 2015

Федосин Александр Сергеевич, аспирант, Мордовский государственный университет, 430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39, nsdfxela@gmail.com

В статье представлен метод решения проблемы издержек расщепления платежей, возникающей при осуществлении начисления платы за ЖКУ в крупных биллинговых системах. Приведено подробное описание сути проблемы, а также последствия, к которым она может привести на практике. Предлагаемый автором метод основан на использовании математических инструментов линейного