

УДК 621.3.088

DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-159-165

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ТЕПЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. Н. Сяктерев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
В. В. Сяктерева, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
А. П. Бельтюков, доктор физико-математических наук, профессор, Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

Цель работы – исследование внутренней тепловой обратной связи в датчиках температуры – термопреобразователях сопротивления – путем компьютерного моделирования. Модель создана на основе электротепловой аналогии, то есть на сходстве математических уравнений описания тепловых и электрических процессов. Это позволило, с одной стороны, рассматривать тепловые процессы как электрические, с другой – одновременно при этом включить в рассмотрение электрические процессы в схемах включения термопреобразователей в термоизмерительной аппаратуре.

В качестве среды моделирования выбрана известная компьютерная программа Micro-Cap, разработанная фирмой Spectrum Software, которая позволяет осуществлять вычисления с погрешностью до десятых долей процента как в статическом, так и динамическом режимах. Существенным достоинством программы является возможность применять идеализированные компоненты с произвольно устанавливаемыми номиналами основных параметров, что ранее невозможно было сделать при физическом моделировании по методу электротепловой аналогии с применением реальных электрических компонентов, таких как резисторы, конденсаторы и др.

По результатам моделирования сделаны практические выводы по построению термометрических приборов и применению результатов в смежных областях. В частности установлено, что при питании термопреобразователя от источника тока или при сопротивлении последовательного ему резистора в мостовой схеме большего сопротивления, чем у термопреобразователя, наблюдается положительная тепловая обратная связь. При питании термопреобразователя от источника напряжения или небольших по сопротивлению последовательных термопреобразователю резисторах наблюдается отрицательная обратная связь. Существуют условия, при которых обратная связь не проявляется.

Исследована зависимость перегрева чувствительного элемента от значения измерительного тока. Установлено, что зависимость имеет нелинейный характер, и при относительно больших токах происходит резкое нарастание перегрева вплоть до расплавления чувствительного элемента. Установлено также, что для снижения внутренней тепловой обратной связи в термопреобразователях сопротивления необходимо снижать значение измерительного тока и уменьшать термическое сопротивление чувствительный элемент – среда.

Ключевые слова: термопреобразователь сопротивления, саморазогрев, измерительный ток, тепловая обратная связь, термическое сопротивление, электротепловая аналогия.

Введение
При использовании для измерения температуры термопреобразователей сопротивления (ТПС) с металлическим чувствительным элементом (ЧЭ) возникает систематическая погрешность, обусловленная саморазогревом ЧЭ под действием измерительного тока. Степень саморазогрева определяется значением измерительного тока, электрическим сопротивлением ЧЭ и термическим сопротивлением между ЧЭ и средой. Ранее впервые в работе [1] было показано, что в ТПС возникает также внутренняя тепловая обратная

связь. В частности, дополнительная погрешность от обратной связи проявляется при питании ТПС от источника тока с большим внутренним сопротивлением. Тогда обратная связь действует в чистом виде как положительная, и дополнительная погрешность оказывается максимальной. В работе [1] предложена и исследована тепловая схема ТПС с положительной обратной связью, которая, как оказалось, является частным случаем.

В общем случае обратная связь может быть и отрицательной, а также при определенных условиях может быть сведена к минимуму по

своему влиянию на результаты измерений. Исследованию этого более общего случая посвящена настоящая статья.

Оригинальность исследования заключается также в применении для моделирования тепловых процессов в ТПС метода электротепловой аналогии [2], реализованного с помощью программы схемотехнического моделирования Micro-Cap [3, 4]. Такая реализация метода позволила впервые достаточно просто решить задачу одновременного моделирования тепловых и электрических процессов, что особенно важно для исследования измерительных трактов термометрических электронных приборов.

Обоснование метода исследования тепловых процессов в термопреобразователях сопротивления

Методы решения тепловых задач подразделяются на две большие группы – методы математического моделирования и методы физического моделирования. Первые, в свою очередь, делятся на аналитические и численные.

Аналитически решить тепловую задачу удается в редких случаях и только при значительных упрощениях. Результаты решения, как правило, имеют ограниченную практическую ценность [5].

Численные методы применяются в случаях, когда не удается получить точное аналитическое решение. Численные методы эффективны при использовании компьютерных технологий и требуют применения достаточно производительных компьютеров [6].

Физическое моделирование является экспериментальным методом и основано на замещении объекта исследования его физической моделью. При этом исследованию подвергается не сам объект, а его физическая модель. Обоснованием возможности замещения объекта моделью служит аналогия (сходство) математических уравнений, относящихся к тепловым процессам, и математических уравнений, относящихся к процессам в модели другой физической природы [7].

Методы физического моделирования различаются по физической природе моделей. Применяются электрические, гидравлические и другие модели. Наибольшее распространение в моделировании получили электрические модели. Их можно разделить на две группы: модели на сплошных электропроводящих средах и модели в виде электрических схем на дискретных компонентах. Последние получили большее применение [8, 9].

Развитие вычислительной техники во второй половине XX века привело к созданию высокопроизводительных цифровых вычислительных машин и, в частности, персональных компьютеров, что существенно расширило возможности для численного решения уравнений теплопроводности. Этот метод исследования процессов теплообмена оказался основным. Однако, учитывая сложность подготовки задачи к программированию и сложность самого процесса программирования, использование его возможно только с привлечением специалистов в области вычислительной математики и программирования.

С другой стороны, в 80-х годах XX века получили развитие компьютерные программы, предназначенные для схемотехнического моделирования изделий электронной техники [10, 11, 12, 13], которые в настоящее время являются удобными средствами исследования электронных схем. Программы имеют достаточно простой пользовательский интерфейс и могут быть использованы для электрического моделирования тепловых процессов на основе электротепловой аналогии. При этом одновременно они могут применяться и для моделирования связанных с тепловыми электрических процессов.

Применение программ схемотехнического моделирования существенно упрощает процедуру подготовки и проведения экспериментов и обработки результатов. В отличие от моделирования на физических электрических моделях в компьютерных моделях нет ограничений на значения электрических величин (сопротивления, емкости, напряжения, тока и т. д.), поэтому в процессе моделирования может быть использовано прямое соответствие значений тепловых и электрических величин. Это означает, что фактически нет необходимости рассчитывать и использовать масштабы, связывающие тепловые и электрические величины. Кроме того, в компьютерных моделях легко реализуются все виды граничных условий теплообмена, например, постоянный тепловой поток может быть задан с помощью идеального источника тока, в то время как в моделях на физических компонентах в наборе возможных компонентов идеальные источники отсутствуют.

Таким образом, представляется, что моделирование на компьютерных электрических моделях является перспективным методом исследования тепловых процессов и выбрано в качестве метода исследований в настоящей работе.

Электротепловая модель термопреобразователя сопротивления

Для преобразования электрического сопротивления ТПС, которое зависит от измеряемой температуры, в напряжение с целью последующей оцифровки с помощью аналого-цифрового преобразователя используют мостовые схемы. Как правило, эти схемы для линеаризации функции преобразования выполняются с применением операционных усилителей [14]. Поскольку в данной работе внимание сосредоточено только на погрешности саморазогрева ТПС, то в модели воспользуемся схемой простого пассивного электрического моста без операционного усилителя, в котором ТПС включена в одно из плеч полумоста.

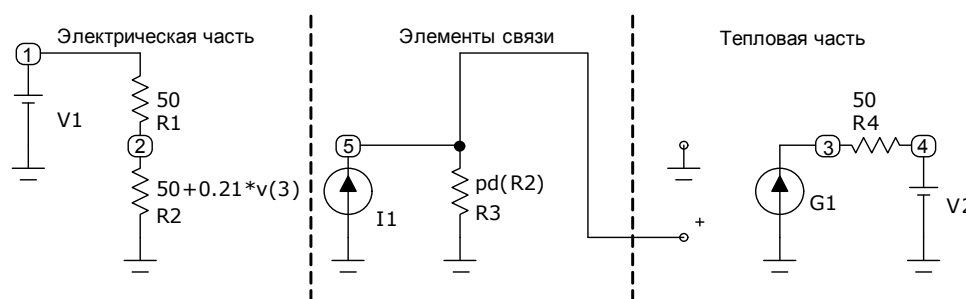


Рис. 1. Электротепловая модель термопреобразователя сопротивления в редакторе программы Micro-Cap

В схеме резистор $R1$ и ТПС $R2$ образуют электрический полумост, который питается от источника напряжения $V1$. Сопротивление $R2$ является зависимым от напряжения в точке 3, которое численно равно температуре ЧЭ ТПС. Предполагается, что ЧЭ изготовлен из медного провода с номинальным (начальным) сопротивлением 50 Ом и соответствующей ему чувствительностью к изменению температуры 0,21 Ом/К.

Идеальный источник тока $I1$ и резистор $R3$ с зависимым сопротивлением представляют собой схему преобразования мощности $pd(R2)$, выделяющейся в ЧЭ ТПС под действием измерительного тока, в напряжение.

Это напряжение подается на идеальный источник тока $G1$, управляемый напряжением, который моделирует внутренние тепловыделения в ЧЭ.

Термическое сопротивление ЧЭ – среда представлено резистором $R4$, сопротивление которого численно равно термическому сопротивлению, заданному на уровне 50 К/Вт. Идеальный источник напряжения $V2$ моделирует температуру среды. При этом напряжение источника численно равно температуре среды.

Таким образом, обратная связь в ТПС реализована с помощью цепочки зависимых (управ-

Для математического моделирования рассматриваемых процессов выбрана компьютерная среда моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap компании Spectrum Software (см. www.spectrum-soft.com). Чтобы это было возможно, все рассматриваемые физические процессы (электрические и тепловые) моделируются электрическими. Система Micro-Cap порождает соответствующую математическую модель, а затем – численную и компьютерную, поведение которой изучается.

Объединенная схема электротепловой модели ТПС, содержащая электрическую и тепловую части, а также элементы связи между ними, представлена на рис. 1.

ляемых) элементов и действует следующим образом.

При протекании через ТПС $R2$ измерительного тока, создаваемого источником $V1$, в нем выделяется мощность $pd(R2)$. С помощью источника тока $I1$ и зависимого сопротивления $R3$ эта мощность преобразуется в напряжение в точке 5, численно равное мощности:

$$U(5) = K_1 \cdot I1 \cdot pd(R2),$$

где K_1 – масштабный коэффициент с размерностью В/А·Вт. Далее напряжение подается в цепь управления источником тока $G1$. Ток источника численно равен мощности $pd(R2)$:

$$I(G1) = K_2 U(5) = K_1 \cdot K_2 \cdot I1 \cdot pd(R2), \quad (1)$$

где K_2 – масштабный коэффициент – параметр зависимого источника тока с размерностью А/В, задаваемый в программе Micro-Cap. Ток $I(G1)$ создает дополнительное падение напряжения на сопротивлении $R4$ и дополнительное напряжение в точке 3 модели. Это напряжение численно равно температуре чувствительного элемента и влияет на его электрическое сопротивление $R2$.

Адекватность электротепловой модели достигается при выполнении в выражении (1) условия

$K_1 K_2 I_1 = 1$ А/Вт, например, при $K_1 = 1$ В/А·Вт;
 $K_2 = 1$ А/В; $I_1 = 1$ А.

Результаты моделирования внутренней тепловой обратной связи в ТПС

В среде Micro-Cap для указанных выше электрических и тепловых параметров ТПС с помо-

щью электротепловой модели проведено моделирование перегрева чувствительного элемента относительно среды в результате действия внутренней тепловой обратной связи при изменении температуры среды от 0 до 100 °С при нескольких значениях сопротивления R_1 (рис. 2). При этом измерительный ток ТПС задан при температуре среды 0 °С равным 10 мА.

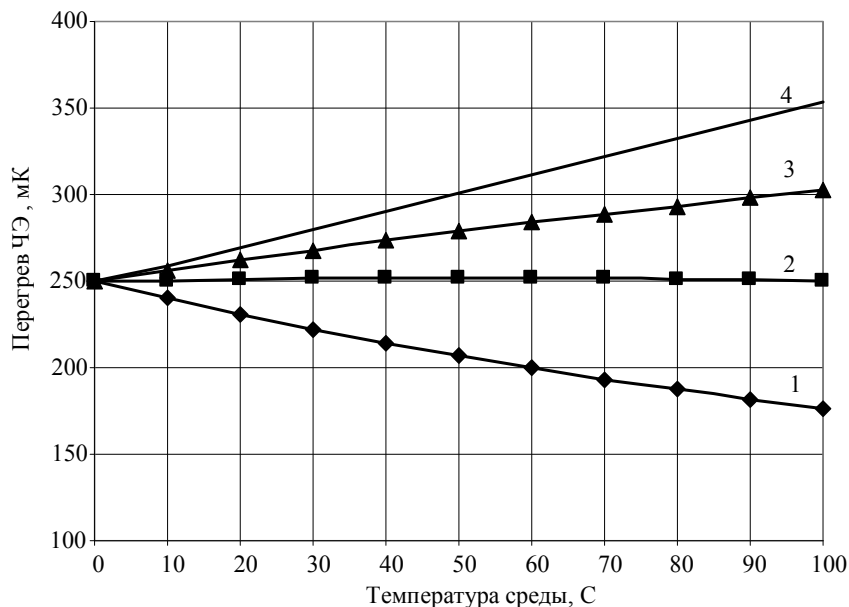


Рис. 2. Зависимость перегрева ЧЭ под действием обратной связи от температуры среды:
1 – $R_1 = 0$ Ом; 2 – $R_1 = 60$ Ом; 3 – $R_1 = 200$ Ом; 4 – $R_1 = \infty$

Установлено, что при нулевой температуре существует начальный перегрев ЧЭ на уровне 250 мК за счет выделения мощности при протекании измерительного тока. Далее в зависимости от соотношения сопротивлений резистора R_1 электрического полумоста и R_2 ЧЭ за счет действия обратной связи с ростом температуры наблюдаются нарастание или снижение перегрева ЧЭ. Тепловая обратная связь проявляется как положительная, так и отрицательная: при $R_1 > R_2$ связь положительная; при $R_1 < R_2$ – отрицательная; при $R_1 = R_2$ – не проявляется.

При положительной обратной связи с увеличением температуры среды перегрев чувствительного элемента увеличивается, при отрицательной – уменьшается, в третьем случае – остается неизменным. Изменение типа связи при изменении сопротивления R_1 объясняется следующим.

При больших сопротивлениях R_1 ТПС R_2 питается от источника тока (постоянным током), поэтому с увеличением температуры среды и электрического сопротивления ЧЭ тепловая мощность в ЧЭ возрастает. Отсюда

увеличивается саморазогрев за счет обратной связи.

При малых сопротивлениях R_1 ТПС R_2 фактически питается от источника напряжения (постоянным напряжением), поэтому при увеличении температуры среды (увеличении его электрического сопротивления) тепловая мощность в ЧЭ уменьшается и уменьшается саморазогрев за счет действия обратной связи.

Введено понятие коэффициента влияния изменения ΔT_{cp} температуры среды на изменение $\Delta T_{\text{чЭ}}$ температуры ЧЭ:

$$k = \frac{\Delta T_{\text{чЭ}}}{\Delta T_{\text{cp}}}$$

Путем моделирования получена зависимость этого коэффициента от сопротивления R_1 полумоста, представленная на рис. 3.

Как видно, для снижения перегрева необходимо уменьшать сопротивление R_1 до значения близкого к значению сопротивления ТПС. Однако в этом случае при преобразовании сопротивления ТПС в напряжение происходит сни-

жение чувствительности схемы к изменению температуры примерно в 2 раза за счет равноплечего делителя, образуемого сопротивлениями $R1$ и $R2$.

Обычно ТПС питают от источника тока с большим внутренним сопротивлением, т. е. при сопротивлении $R1$, много большим сопротивления $R2$. В этом случае коэффициент влияния k имеет максимальное значение. Для наших условий он составляет 1,05 мК/К. Это означает, что увеличение температуры среды от 0 до 100 °С ведет к дополнительному перегреву ЧЭ относительно среды за счет положительной обратной связи на 0,105 К.

Уменьшение степени перегрева ЧЭ относительно среды достигается за счет уменьшения измерительного тока ТПС и термического сопротивления ЧЭ – среда. Последнее не всегда возможно, так как значение этого сопротивления определяется не только конструктивными особенностями ТПС, но и свойствами самой среды, которая влияет на компонент термического сопротивления корпус ТПС – среда.

Для случая положительной обратной связи при питании ТПС током от идеального источника тока смоделирована зависимость перегрева чувствительного элемента от измерительного тока при малых и больших его уровнях (рис. 4).

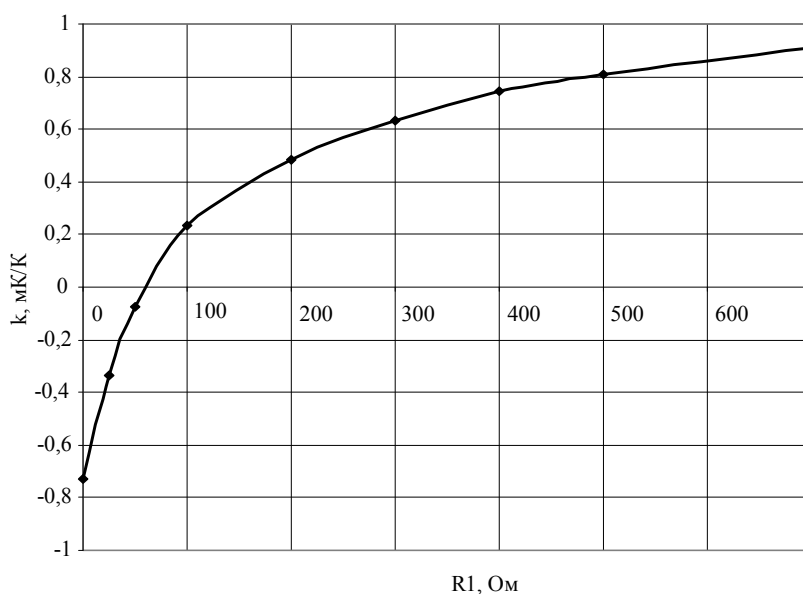


Рис. 3. Зависимость коэффициента k от сопротивления резистора $R1$

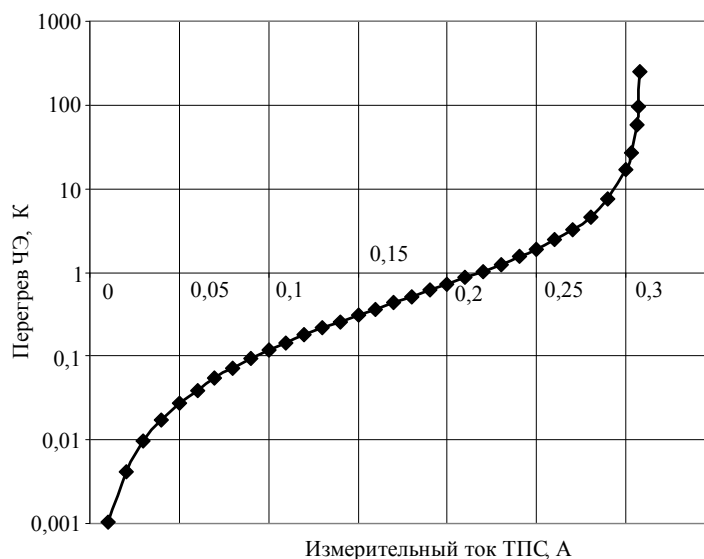


Рис. 4. Зависимость перегрева ЧЭ относительно среды от значения измерительного тока ТПС

Перегрев при увеличении тока нарастает по нелинейному закону. Установлено, что при малых значениях наблюдается квадратичная зависимость перегрева от тока, далее за счет возрастающего влияния положительной обратной связи зависимость становится более сильной, и в конечном итоге при некотором критическом значении измерительного тока происходит процесс лавинообразного нарастания температуры чувствительного элемента, что приводит к катастрофическому отказу ТПС по типу взрыва.

Подобные ситуации наблюдаются при работе ламп накаливания и плавких предохранителей, когда они питаются от источника тока или включаются в цепь с повышенным сопротивлением.

Заключение

Для исследования тепловых процессов в термопреобразователях сопротивления, в частности условий возникновения и степени проявления внутренней тепловой обратной связи, обоснована целесообразность использования метода компьютерного моделирования, основанного на электротепловой аналогии и применении программы Micro-Cap.

Путем моделирования исследована внутренняя тепловая обратная связь в термопреобразователях сопротивления с металлическим (медным) чувствительным элементом. Установлено, что при питании термопреобразователя от источника тока или при сопротивлении последовательного ему резистора в мостовой схеме большего сопротивления, чем у термопреобразователя, наблюдается положительная обратная связь. Наоборот, при питании термопреобразователя от источника напряжения или небольших по сопротивлению последовательных термопреобразователю резисторах наблюдается отрицательная обратная связь.

Существуют условия, при которых обратная связь не проявляется.

Также исследована зависимость перегрева чувствительного элемента от значения измерительного тока. Установлено, что зависимость имеет нелинейный характер, и при относительно больших токах происходит резкое нарастание перегрева вплоть до расплавления чувствительного элемента.

Для снижения внутренней тепловой обратной связи в термопреобразователях сопротивления необходимо снижать значение измерительного тока и уменьшать термическое сопротивление ЧЭ – среда.

Библиографические ссылки

1. Куликов А. В. Исследование саморазогрева термопреобразователей сопротивления на основе статических тепловых моделей // Вестник ИжГТУ. 2006. № 2. С. 68–70.
2. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. М.: Энергия, 1974. 416 с.
3. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. URL: <http://www.spectrum-soft.com/download/ug11.pdf> (дата обращения: 06.02.2018).
4. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.
5. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
6. Шун Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 238 с.
7. Коздоба Л. А., Круковский П. Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев: Наукова думка, 1982. 360 с.
8. Куликов А. В. Математическое моделирование тепловых процессов на виртуальных электрических моделях / ИжГТУ. Ижевск, 2006. 7 с. Деп. в ВИНТИ 17.04.06, № 509-B2006.
9. Кожухов В. А. Моделирование тепловых процессов резистивными схемами // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010. № 4. С. 150–155.
10. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. URL: <http://www.spectrum-soft.com/download/ug11.pdf> (дата обращения: 06.02.2018).
11. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 464 с.
12. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC: Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Пресс, 2003. 288 с.
13. Разевиг В. Д. Применение программ P-Cad и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. В 4 вып. М.: Радио и связь, 1992.
14. Куликов В. А., Никитин К. А. Канал измерения температуры высокого разрешения // Вестник ИжГТУ. 2013. № 1. С. 100–103.

References

1. Kulikov A. V. [Study of self-heating of resistance thermocouples based on static thermal models]. *Vestnik IzhGTU*, 2006, no. 2, pp. 68-70 (in Russ.).
2. Kuz'min M. P. *Elektricheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teploobmena* [Electrical modeling of non-stationary heat transfer processes]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 416 p. (in Russ.).
3. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide [Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide] (in Russ.). Available at:

<http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf> (accessed 06.02.2018).

4. Amelina M. A., Amelin S. A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8* [The program circuit simulation Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007, 464 p. (in Russ.).

5. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids]. Leningrad, Energiya Publ., 1976, 352 p. (in Russ.).

6. Shup T. *Reshenie inzhenernykh zadach na EVM: Prakticheskoe rukovodstvo* [Solving engineering problems on the computer: a Practical guide]. Moscow, Mir Publ., 1982, 238 p. (in Russ.).

7. Kozdoba L. A., Krukovskii P. G. *Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosy* [Methods for solving inverse problems of heat transfer]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 360 p. (in Russ.).

8. Kulikov A. V. *Matematicheskoe modelirovanie teplovyykh processov na virtual'nykh jelektricheskikh modelyah* [Mathematical modeling of thermal processes on virtual electric models]. Izhevsk, Izhevsk State Technical University, 2006, 7 p. (in Russ.).

9. Kozhuhov V. A. [Simulation of thermal processes by resistive circuits]. *Vestnik Krasnojarskogo*

gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2010, no. 4, pp. 150-155 (in Russ.).

10. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide [Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide] (in Russ.). Available at: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf> (accessed 06.02.2018).

11. Amelina M. A., Amelin S. A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8* [The program circuit simulation Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007, 464 p. (in Russ.).

12. Karlashhuk V. I. *Jelektronnaja laboratorija na IBM PC: Programma Electronics Workbench i ee primenenie* [Electronic laboratory on IBM PC: Electronics Workbench Program and its application]. Moscow, Solon-Press Publ., 2003, 288 p. (in Russ.).

13. Razevig V. D. *Primenenie programm P-Cad i PSpice dlja shemotekhnicheskogo modelirovaniya na PJeVM* [The application of P-Cad and PSpice for circuit simulation on a PC]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1992 (in Russ.).

14. Kulikov V. A., Nikitin K. A. [High Resolution Temperature Channel]. *Vestnik IzhGTU*, 2013, no. 1, pp. 100-103 (in Russ.).

Modeling of Intrinsic Thermal Feedback in Resistance Temperature Devices

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Syaktereva, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. P. Bel'tjukov, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Udmurt State University, Izhevsk, Russia

The purpose of work is a research of intrinsic thermal feedback in the temperature detector namely resistance temperature device by computer-aided engineering. The model is created based on the electrothermal analogy that is on similarity of the mathematical equations of the description of thermal and electric processes. On the one hand, it allowed for considering thermal processes as electric, but on the other hand at the same time to include in the electric processes in the connection circuit of thermal elements in the thermo measuring equipment.

The known computer Micro-Cap program is chosen as a simulation environment, it is developed by Spectrum Software, which makes it possible to measure to a precision of tenth of a percent in both the static and dynamic modes. The significant advantage of the program is the possibility to apply idealized components with arbitrarily set values of the main parameters that previously was not possible to do physical simulation by the method of electrothermal analogy using real electrical components, such as resistors, condensers, etc.

Practical conclusions on creation of thermometric devices and use of results in adjacent areas are made by results of modeling. In particular, it was found that there is a positive thermal feedback by feeding the thermal element from current power supply or in case of resistance series resistor in a bridge of bigger resistance than at the thermal element; the positive thermal feedback is watched. There is a negative feedback in case of a supply of the thermal element from a voltage source or small on resistance, serial resistors to the thermal element. There are conditions under which the feedback was not reflected. The dependence of overheating of a sensing element on value of survey current is investigated. It is established that the dependence has nonlinear character, and there is a sharp increase of thermal overload up to melting of a sensitive element. It is also established that to decrease in intrinsic thermal feedback in thermal elements of resistance it is necessary to reduce value of survey current and to reduce thermal resistance "a sensitive element – surroundings".

Keywords: resistance temperature device, self-heating, measuring current, thermal feedback, thermal resistance, electrothermal analogy.

Получено 02.11.2018