

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 214–224
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 5, pp. 214–224

Научная статья

УДК 629.7.018.3:536.24

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188858>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ATPAXG>

Тепловая математическая модель и расчетное исследование характеристик локальной системы обеспечения температурного режима космического аппарата на базе позисторного нагревателя, управляемого по току

Е.Ю. Котляров¹✉, Е.В. Леун², В.В. Луженков³, Д.В. Тулин⁴, Ю.В. Мозговой⁵,
В.С. Финченко⁶

^{1,2,3,4,5,6}Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, Химки, Российская Федерация

¹evgeny-1@list.ru✉

Аннотация. В статье с помощью относительно простой нестационарной тепловой математической модели (ТММ) моделируется и по результатам проведенных вычислительных экспериментов анализируется работа двух типов электронагревателей, поочередно обеспечивающих температурный режим оборудования, обособленно расположенного на борту автоматического космического аппарата (АКА). В результате сравнительного анализа динамики срабатывания и изменения температур резистивного и позисторного электронагревателей нагревателей (РЭН и ПЭН), функционирующих в составе АКА, показано какие уникальные и/или полезные свойства ПЭН могут представлять интерес при использовании в составе локальных систем обеспечения теплового режима. В процессе применения ТММ исследовано применение ШИМ-контроллера, модулирующего сигналы для (широтно-импульсного) управления мощностью электронагревателей рассматриваемых типов, а также воспроизведено управление ПЭН с обратной связью по току, что наглядно подтверждает возможность его использования в качестве чувствительного элемента.

Ключевые слова: тепловая математическая модель, вычислительный эксперимент, позисторный нагреватель, регулирование температуры, бортовое оборудование КА, тепловой режим

Для цитирования. Котляров Е.Ю., Леун Е.В., Луженков В.В., Тулин Д.В., Мозговой Ю.В., Финченко В.С. Тепловая математическая модель и расчетное исследование характеристик локальной системы обеспечения температурного режима космического аппарата на базе позисторного нагревателя, управляемого по току // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 5. С. 214–224. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188858>

Original article

Thermal mathematical model and computational study of the characteristics of a Local Thermal Control System for a spacecraft based on a current-controlled PTC heater

E.Yu. Kotlyarov^{1✉}, E.V. Leun², V.V. Luzhenkov³, D.V. Tulin⁴, Yu.V. Mozgovoy⁵, V.S. Finchenko⁶

^{1,2,3,4,5,6}*Lavochkin Association, Moscow, Khimki, Russian Federation*

¹*evgeny-1@list.ru✉*

Abstract. The article employs a relatively simple non-stationary thermal mathematical model (TMM) to simulate and analyze, based on the results of computational experiments, the operation of two types of electric heaters. These heaters alternately maintain the thermal regime of equipment separately located onboard an automatic spacecraft (AS). As a result of a comparative analysis of the activation dynamics and temperature changes of resistive and positive temperature coefficient (PTC) electric heaters (REH and PTCH) operating as part of the AS, the unique and/or useful properties of the PTCH that may be of interest for use in local thermal control systems are demonstrated. During the application of the TMM, the use of a PWM controller modulating signals for the pulse-width control of the heaters' power was investigated. Furthermore, the feedback current control of the PTCH was reproduced, which visually confirms its potential for use as a sensing element. The development of hardware reliably operating in outer space represents a complex interdisciplinary engineering task. A special role in its solution is assigned to systems and means for maintaining the thermal regime of equipment and the structure of space-grade products. It is known that overheating or overcooling of equipment are often the ultimate causes of the complete or partial loss of Automatic Spacecraft (AS) operating under space environmental factors, even if the initial damaging impact on the craft or its equipment was unrelated to the thermal regime. Any AS, from the earliest models to modern designs, is equipped with local thermal control systems. These systems ensure the thermal regime of equipment that is separately located, when for a number of reasons such equipment cannot be placed in the instrument compartment or on specially thermostated platforms. This necessity leads to equipping the equipment within the spacecraft with local thermal control means (in situ, locally), such as a heater, temperature sensor, and unregulated radiative heat exchanger, installed directly at the thermal control site – for example, on a fuel tank wall, next to an electronics unit, pyrovalve, navigation instrument, etc. The control schemes and algorithms for the Local Thermal Control Systems (LTCS) based on resistive heaters, applied in established practice, are well-developed. However, these developments are also applicable to PTC heaters (PTCH) operating in the temperature range below the active transition zone, i.e., below the T_{ref}/R_{ref} value. For such PTCH, the problem of cold start will not arise, and the PTCH itself, more precisely its heating element (HE), cannot burn out in off-nominal situations that would be associated with inadequate heat removal from the heater (for example, if the control temperature sensor becomes detached or the heater's contact with the mounting location deteriorates). The use of a PWM controller allows for a significant reduction in oscillations affecting the quality of temperature regulation. This effect can be achieved regardless of the type of heater used: REH or PTCH. The use of PWM controllers in spacecraft LTCS has its supporters and opponents. However, within AS equipment, the problems associated with using PWM can be considered on par with the use of other electronics. The thermal inertia of LTCS components allows for the use of pulses with a frequency on the order of 1 Hz and lower, which “localizes the discussion” on the electromagnetic noise of PWM. The use of PTC heaters in the transition (temperature) zone, combined with PWM as a heater for the Local Thermal Control System, holds certain promise for providing an actively regulated thermal regime for the peripheral equipment of an Automatic Spacecraft (AS). This is because such a solution would allow for the elimination of measurement cables and temperature sensors. The self-regulating capability of the PTC heater, combined with controlled regulation, could also

be in demand. Finally, three self-sufficient conditions that can prioritize the use of PTC heaters (PTCH) over traditionally used resistive heaters (REH) can be formulated: – for the specific LTCS being developed, there exist both nominal and off-nominal scenarios of the planned heater's operation, which are characterized by an objectively justified risk of its overheating and failure; – there is no possibility, or it is not feasible, to run a measurement cable with a control temperature sensor to the location of the thermostated equipment; – there is no possibility to use a controller (due to a shortage of controlled channels) and, simultaneously, there is no need to maintain the object's temperature with high accuracy. That is, the self-regulating capability of the PTC heater can be utilized here. The materials of this research can be useful for developers of LTCS for prospective automatic spacecraft.

Keywords: thermal mathematical model, computational experiment, PTC heater, temperature control, spacecraft onboard equipment, thermal mode

For citation. Kotlyarov E.Yu., Leun E.V., Luzhenkov V.V., Tulin D.V., Mozgovoy Yu.V., Finchenko V.S. Thermal mathematical model and computational study of the characteristics of a local thermal control system for a spacecraft based on a current-controlled PTC heater. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 5, pp. 214–224. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=188858>

Введение

Создание техники, надежно функционирующей в открытом космосе, являет собой сложную междисциплинарную инженерно-техническую задачу, в решении которой особую роль отводят системам и средствам поддержания температурного режима оборудования и конструкции изделий космического назначения. Известно, что перегрев или переохлаждение оборудования, часто являются окончательными причинами полной или частичной потери АКА, функционирующих в условиях воздействия космических факторов, даже если изначальное губительное воздействие на аппарат или его оборудование не имело отношения к тепловому режиму. Любые АКА, от первых образцов до современных конструкций, оснащают локальными СОТР (ЛСОТР), которые обеспечивают температурный режим обособленно расположенного оборудования, когда по ряду причин такое оборудование невозможно разместить в приборном отсеке или на специально термостатируемых платформах [1, 2], что и приводит к необходимости оснащения оборудования в составе КА средствами терморегулирования (по месту, локально), такими как, нагреватель, температурный датчик и нерегулируемый радиационный теплообменник (НРТО), располагаемых непосредственно у места термостатирования, например, на стенке топливного бака, рядом с блоком электроники, пироклапаном, навигационным прибором и т. п.

Концепция самой простой ЛСОТР АКА, предусматривает:

а) оснащение термостатируемого объекта НРТО с открытой в окружающее пространство (космос) поверхностью, имеющей заданное термооптическое покрытие и эффективное тепловое соединение с указанным объектом (прибором, блоком). Такая поверхность может быть организована на корпусе блока или на элементе конструкции АКА, на котором блок установлен. В идеале, НРТО должен сбрасывать, выделяемое постоянно работающим прибором тепло, с учетом воздействия внешних тепловых потоков, обеспечивая непревышение максимально разрешенной температуры в месте установки блока.

б) наличие нагревателя и управляющего датчика температуры, установленных рядом с объектом/блоком, либо на его корпусе, либо с нерабочей стороны НРТО. Мощность нагревателя должна быть достаточной для того, чтобы предотвратить переохлаждение блока, если он выключен, а внешние тепловые воздействия отсутствуют, то есть он должен компенсировать отсутствие тепловыделения блока и внешних потоков, не допустив падения температуры ниже минимально разрешенной.

Для обеспечения температурного режима приборов и блоков, имеющих небольшую собственную мощность тепловыделения, а также для оборудования, не выделяющего тепло, применение ЛСОТР в составе АКА широко распространено

в силу простоты, надежности и предсказуемости их функционирования. Для более мощного оборудования, а также для приборов, блоков и оборудования сгруппированных на термостатируемых панелях, разработчики СОТР АКА стремятся создавать регулируемые теплоотводящие тракты «от панелей к РТО». В рамках настоящей статьи настраиваемые термосопротивления и регулируемые РТО не анализируются, а исследуются возможность и способы управления регулируемых ПЭН в составе ЛСОТР вместо традиционно применяемых РЭН.

1. О параметрах, формально характеризующих ЛСОТР

Рассмотрим конкретные количественные параметры типовой ЛСОТР на базе НРТО и нагреватель для термостатирования отдельно расположенного прибора из состава оборудования АКА. Представим, что данный прибор может продолжительное время оставаться включенным, выделяя 20 Вт тепла и при этом должен функционировать в разрешенном интервале температур $-20...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примем, что теплоизоляция прибора идеальна, а его корпус соединен высокоэффективной нерегулируемой тепловой связью с НРТО, имеющим термооптическое покрытие (типа солнечный отражатель: $A_s = 0,25$, $\varepsilon = 0,9$). В случае, если солнечный поток может падать на РТО фронтально, расчетная площадь НРТО, $F_{НРТО}$, необходимая для решения задачи теплового режима (т. е. для непревышения рабочего максимума температуры), при определении из стационарного уравнения теплового баланса, составит:

$$F_{НРТО} \geq \frac{Q_{ПРИБ}}{\varepsilon \times \sigma \times (T_{НРТО}^4 - T_{ENV}^4) - q_s \times A_s} =$$

$$= \frac{20}{0,9 \times 5,67e^{-8} \times ((273 + 40)^4 - 4^4) - 1369 \times 0,25} \approx$$

$$\approx 0,136 \text{ м}^2.$$

Здесь, $Q_{ПРИБ}$ – мощность прибора во включенном состоянии, $T_{ENV}(4\text{K})$ – температура окружающей среды, солнечная постоянная q_s принята 1369 Вт/м^2 , причем НРТО и посадочное место прибора рассматриваются как единый температурный кластер. Однако, в холодных режимах, когда прибор выключен и нет воздействия внешних тепловых потоков, например, НРТО попал

в тень КА, нагреватель ЛСОТР должен компенсировать развиваемую холодопроизводительность НРТО на уровне не ниже разрешенной минимальной температуры (т. е. не ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Следовательно, расчетная мощность нагревателя должна быть не менее величины, определяемой из (2):

$$Q_{НАГР} \geq \varepsilon \times \sigma \times F_{НРТО} \times (T_{НРТО}^4 - T_{ENV}^4) = 0,9 \times$$

$$\times 0,15 \times 5,67e^{-8} \times ((273 - 20)^4 - 4^4) \approx 31 \text{ Вт.} \quad (2)$$

В инженерной практике расчетные параметры ($F_{НРТО}$, $Q_{НАГР}$) принято округлять, а их величины берутся в запас, с учетом ресурсной деградации термооптических покрытий, однако, с учетом лимитированных электроэнергетических ресурсов на борту КА, специалисты стремятся, по возможности, ограничивать мощность НГ локальных СОТР (ЛСОТР). В частности, используется т. н. «принцип замещения», построенный на том, что нагреватель (НГ) ЛСОТР прибора должен потреблять мощность не большую, чем сам прибор, когда прибор выключен (учитывая, что ресурсы под сам прибор выделяны). Итак, исходя из того, что для нагревателя нашей ЛСОТР доступна максимальная мощность 20 Вт, придем к тому, что в холодном режиме НРТО $0,136 \text{ м}^2$ понизит температуру приблизительно до $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если же хотим «удерживать» температуру нашего НРТО при минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью нагревателя 20 Вт, то площадь такого НРТО д. б. не больше $0,095 \text{ м}^2$. Но, в случае засветки такого НРТО солнцем и при одновременно работающем приборе, его температура станет подниматься до $+51\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. выше $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следовательно, придется на время отключать прибор. Для нашего вычислительного эксперимента выбираем вариант использования НРТО площадью $0,95 \text{ м}^2$ с вынужденным отключением прибора при достижении $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это позволит нам ограничиться мощностью нагревателя 20 Вт на холодном режиме. В реальной практике рабочий диапазон каждой ЛСОТР анализируется индивидуально: по умолчанию он принимается $-50...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а мощность нагревателей (для холодных режимов) может быть как выше, так и ниже мощности оборудования АКА, в зависимости от условий.

Включение и выключение нагревателя, как правило, выполняет бортовая автоматика АКА, используя показания соответствующего датчика

температуры. Данный режим регулирования относится к предельно-пропорциональным и известен как режим «ВКЛ/ВЫКЛ» или «ON/OFF». Разрешенное отклонение контролируемой температуры от температуры уставки « $T_{уст}$ » определяет так называемую «полосу нечувствительности» ($T_{уст} \pm \delta \rightarrow 2\delta$), изменение величины которой влияет на количество включений и выключений нагревателя. Очевидно, что сокращение его срабатываний, востребованное с целью повышения рабочего ресурса ЛСОТР, приводит к увеличению амплитуды пилообразных осцилляций температуры термостатируемого объекта, но это, в свою очередь, негативно отражается на качестве работы чувствительных приборов. С учетом сказанного, дальнейший анализ характеристик ЛСОТР здесь адресуется частному исследованию способов повышения качества и стабильности работы систем подобного типа.

2. О выборе характеристик нагревательных элементов для ПЭН

Нагревательные элементы (НЭ) позисторных электронагревателей (ПЭН) изготавливают из (спеченной керамики), материала на основе титаната бария ($BaTiO_3$), в который добавляют примеси, влияющие на температуру фазового перехода II рода (температура Кюри) [3]. При достижении этой температуры происходит изменение кристаллической структуры материала, в свою очередь, приводящее к кардинальному увеличению («шквальному росту») его электрического сопротивления. Это уникальное свойство $BaTiO_3$ успешно, повсеместно и долгие годы используется при производстве термисторов и ПЭН.

Рисунок 1 а демонстрирует типовые характеристики нагревательных элементов (НЭ), которыми оснащают ПЭН, в зависимости от химического состава спекаемой керамики [4]. Показанные здесь терморезистивные характеристики отражают то, как изменение соотношения долей спекаемых материалов может влиять на температуру перехода. Применительно к нашей задаче важно отметить три следующих момента:

– температурный уровень зоны активного перехода для ПЭН можно подбирать, но только на этапе изготовления НЭ: в дальнейшем на температуру Кюри для НЭ (в процессе их применения, как готовой продукции) влиять невозможно;

– существуют подтвержденные практикой пропорции спекаемого материала, которые обеспечивают переходную зону работы НЭ в (типичном, применяемом для оборудования КА) температурном диапазоне от минус 50 °С до +50 °С, что обуславливает определенные перспективы применения ПЭН для ЛСОТР КА;

– зоны перехода имеют существенную «растяжку» по температуре, что препятствует поддержанию высокой заданной точности температуры объекта в режиме саморегулирования [5], однако, если говорить о чувствительности электросопротивления от температуры, то для НЭ из титаната бария (в зоне перехода) она значительно выше, чем у традиционных термометров-сопротивлений.

В зоне перехода (т.е. крутого изменения электрического сопротивления НЭ), когда $R_{НЭ}$ выше т. н. величины R_{ref} ($R_{ref} = 2 \times R_{min}$) [7], температурный коэффициент сопротивления α можно считать относительно постоянной величиной. В пределах переходной зоны характер изменения $R_{НЭ}$ отвечает зависимости

$$R_2 = R_1 \times e^{\alpha \times (T_2 - T_1)}, \quad (3)$$

где R – электрическое сопротивление, T – температура, α – температурный коэффициент сопротивления.

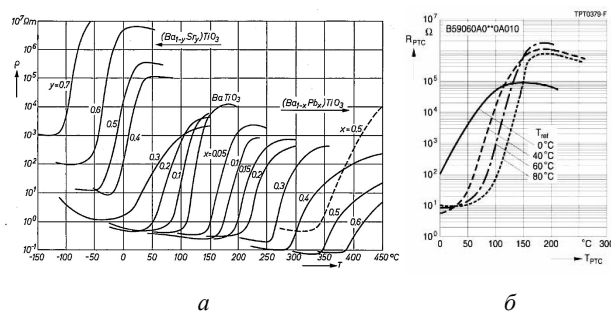


Рис. 1. Типичные характеристики нагревательных элементов ПЭН: а – зависимость зон перехода от состава материала; б – паспортные характеристики элементов, производимых компанией ТДК

Рисунок 1 б демонстрирует паспортные (типичные, экспериментальные) характеристики НЭ серийного промышленного производства [6]. Для нашего вычислительного эксперимента объективный интерес представляет характеристика НЭ для $T_{ref} = 0$ °С, так как в этом случае зона перехода попадает на рассматриваемый разрешенный диапазон температуры, в котором,

возможно, потребуется не только поддерживать, но и контролировать температуру с помощью самого НЭ. Линия тренда $R = f(T)$ (в диапазоне 0–40 °С, с ошибкой не более 3 %) для указанной характеристики описывается соотношением $R_{НЭ} = A \times \exp(B \times T)$, где $A = 119,700878331681$ и $B = 0,069974778824$ (автоматически сгенерирована Excel). Далее, указанная зависимость $R_{НЭ} = f(T)$ используется в компьютерной модели ЛСОТР для расчета температуры и мощности при выполнении вычислительного эксперимента.

3. Тепловая математическая модель ЛСОТР, расчетные сценарии и формализация алгоритмов управления

Простейшую тепловую математическую модель (ТММ), которая интерпретирует нестационарную работу ЛСОТР, можно представить тремя узлами: 1 – прибор с НРТО (объединенный узел), 2 – конструкция нагревателя (корпус и прилегающая зона конструкции), 3 – окружающая среда-космос (граничный узел). Нестационарные уравнения теплового баланса для узлов 1 (индекс «OBJ») и 2 (индекс «НАГР») имеют вид

$$C_{OBJ} \times \frac{dT_{OBJ}}{d\tau} = Q_{ПРИБ}(\tau) - Q_{НРТО} + Q_S(\tau) + \frac{T_{НАГР} - T_{OBJ}}{R_{Н-OBJ}}, \quad (4)$$

$$C_{НАГР} \times \frac{dT_{НАГР}}{d\tau} = Q_{НАГР}(T) - \frac{T_{НАГР} - T_{OBJ}}{R_{Н-OBJ}}. \quad (5)$$

Для их решения используются следующие исходные данные: температура космоса 4 К (граничное условие), мощность прибора ($Q_{НАГР}$) (во включенном состоянии) 20 Вт, Термическое сопротивление теплопередающей связи нагревателя с прибором $R_{Н-OBJ}$ 0,05 К/Вт (близко расположены на конструкции КА или соединены с помощью тепловой трубы), теплоемкость сборки прибор-НРТО $C_{OBJ} = 1700$ Дж/К, теплоемкость нагревателя $C_{НАГР} = 200$ Дж/К, площадь НРТО 0,15 м². ($As/\varepsilon \leftrightarrow 0,9/0,25$), номинальная мощность нагревателя $Q_{НАГР} = 20$ Вт (прежде всего, применяя для резистивного нагревателя, РЭН).

Для выполнения вычислительного эксперимента с помощью созданной ТММ рассмотрен следующий единый сценарий внутренних (работа прибора) и внешних тепловых воздействий на ЛСОТР:

(А) Время 0 с → старт расчета: здесь начальные температуры системы приблизительно соответствуют тепловому балансу в холодном режиме по выражению (2), прибор выключен, внешние тепловые воздействия отсутствуют.

(В) Время 1000 с → Выполняется включение прибора мощностью 20 Вт.

(С) Время 6000 с → Начинается монотонное (линейно) увеличивающееся воздействие солнечного теплового излучения на НРТО. Это воздействие интерпретируется как поглощенный тепловой поток, который растет с 0 Вт (в момент 6000 с), достигает максимума ~33 Вт (в момент 12000 с) и резко исчезает.

(D) Время 12000 с → Прекращение воздействия внешнего солнечного теплового излучения (например, НРТО попал в тень КА).

(Е) Время 16000 с → Выключение прибора мощностью 20 Вт. (Прибор непрерывно работал с момента 1000 с до момента 16000 с).

(F) Время 22000 с → Прекращение расчета, т.к. дальнейшие результаты выхода системы на холодный стационарный режим отвечают прогнозируемому ожиданию (и подтверждены предварительными расчетами).

Применительно к имеющемуся в составе ЛСОТР электронагревателю рассматривается четыре алгоритма управления величиной $Q_{НАГР}$:

1) РЭН с предельно-пропорциональным регулированием типа «ВКЛ/ВЫКЛ» по температуре

→ если $T_{НАГР} < (T_{УСТ} - \delta) \rightarrow Q_{НАГР} = 20$ Вт

→ если $T_{НАГР} > (T_{УСТ} + \delta) \rightarrow Q_{НАГР} = 0$ Вт;

2) ПЭН с предельно-пропорциональным регулированием «ВКЛ/ВЫКЛ» по температуре.

– определяем фактическую мощность ПЭН (по его температуре, измеряемой температурным датчиком ЛСОТР):

$$R_{ПЭН} = A \times \exp(B \times T_{НАГР}) / 5 \quad (5 - \text{количество НЭ})$$

$$I_{ФАКТ} = 28 / R_{ПЭН}, \quad (28 \text{ В напряжение системы электропитания}).$$

$$Q_{ФАКТ} = I_{ФАКТ} \times I_{ФАКТ} \times R_{ПЭН}.$$

Далее

→ если $T_{НАГР} < (T_{УСТ} - \delta) \rightarrow Q_{НАГР} = Q_{ФАКТ}$;

→ если $T_{НАГР} > (T_{УСТ} - \delta) \rightarrow Q_{НАГР} = 0$ Вт.

3) РЭН с пропорциональным управлением с помощью ШИМ-контроллера:

если $T_{НАГР} \leq (T_{УСТ} - \delta) \rightarrow$

$$\rightarrow S = S + K \times |(T_{НАГР} - T_{УСТ})|;$$

если $T_{НАГР} > (T_{УСТ} + \delta) \rightarrow$

$$\rightarrow S = S - K \times |(T_{НАГР} - T_{УСТ})|;$$

если $S \geq 1 \rightarrow S = 1,$

если $S \leq 0 \rightarrow S = 0 \quad S \in [0...1];$

$Q_{НАГР} = S \times 20$ (20 Вт – номинальная мощность нагревателя).

4) ПЭН с пропорциональным управлением по току с помощью ШИМ-контроллера и ограничением по мощности в случае холодного старта.

Определяем ток уставки (однократно)

$I_{УСТ} = 28 / (A \times \exp(B \times T_{УСТ})) / 5$ (5 – количество НЭ).

Определяем фактический ток и мощность ПЭН (по сопротивлению ПЭН) (в реальном устройстве будет измеряться ток, но в ТММ используется аппроксимация $R = f(T)$):

$$I_{ФАКТ} = 28 / (A \times \exp(B \times T_{НАГР})) / 5;$$

$$Q_{ФАКТ} = I_{ФАКТ} \times I_{ФАКТ} \times R_{ПЭН}.$$

Работаем с отклонением по току (K – коэффициент пропорциональности):

если $(I_{ФАКТ} \leq (I_{УСТ} - \delta I)) \rightarrow$

$$\rightarrow S = S - K \times |(I_{ФАКТ} - I_{УСТ})|;$$

если $(I_{ФАКТ} \geq (I_{УСТ} + \delta I)) \rightarrow$

$$\rightarrow S = S + K \times |(I_{ФАКТ} - I_{УСТ})|;$$

если $S \geq 1 \rightarrow S = 1/$ если $S \leq 0 \rightarrow S = 0;$

$Q_{НАГР} = S \times Q_{ФАКТ}$ (S – коэффициент заполнения для ШИМ $S \in [0...1]$).

Вводим ограничение по максимальной мощности

если $Q_{НАГР} > 25$, то $Q_{НАГР} = 25$ Вт.

4. Результаты вычислительного эксперимента и их анализ

Результаты вычислительного эксперимента отражают моделирование показательных 4-х нестационарных режимов с регулированием температуры по обратной связи, выполненных по сценарию, описанному в разделе 3:

1 – работа резистивного НГ в режиме ВКЛ/ВЫКЛ;

2 – работа резистивного НГ, управляемого ШИМ-контроллером;

3 – работа ПЭН (по температурному датчику) в режиме ВКЛ/ВЫКЛ;

4 – работа ПЭН, управляемого ШИМ-контроллером по току в НЭ.

Решение системы (4)–(5) выполнено с использованием разработанных авторами программных кодов, в которых реализован численный метод Кранка–Николсон. Применяемая температура уставки для всех режимов имеет значение $T_{УСТ} = 5$ °С. Для предельно пропорционального регулирования применяемое допустимое отклонение составляло $\delta = 0,5$ К. При регулировании НГ с помощью ШИМ применялся коэффициент пропорциональности $K = 0,01$ и величина допустимого отклонения $\delta = 0,3$ К. Обратная связь по измеряемому в цепи нагревателя току, с применением ШИМ для управления ПЭН, использовала отклонения $\delta = 10$ мА и $K = 0,01$.

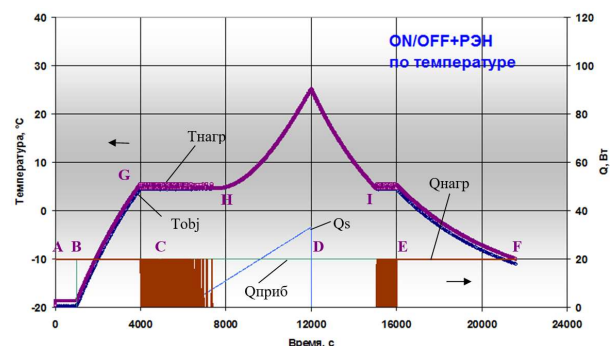


Рис. 2. Работа резистивного электронагревателя в режиме «ВКЛ/ВЫКЛ»

Кроме параметров регулирования, при управлении ПЭН по току необходимо учитывать, что температура НЭ (в которых генерируется тепло) может заметно отличаться от температуры корпуса ПЭН [8], поэтому при моделировании соответствующих режимов между объектом и ПЭН термическое сопротивление было дополнительно увеличено с 0,05 К/Вт до 0,25 К/Вт (так, без введения дополнительного узла в матмодель, было учтено сопротивление НЭ–корпус).

Рисунок 2 отражает результаты моделирования работы обычного резистивного нагревателя (РЭН), работающего в режиме ВКЛ/ВЫКЛ. Буквенная маркировка («А», «В», «С», «Д», «Е», «Ф») находится в однозначном соответствии со сценарием вычислительного эксперимента, описанным в разделе 3. Дополнительно маркированы, привлекающие к себе внимание, события отклики системы, в моменты «Г», «Н» и «І».

Рассмотрим по порядку: горизонтальные кривые на участке «А»–«В» подтверждают, что здесь тепловой баланс является квазистационар-

ным, т. е. нагреватель мощностью 20 Вт работает постоянно, чтобы удерживать систему в холодном режиме у нижней границы интервала допустимых температур. Включение прибора в точке «В» приводит к нагреву и выходу на уровень температуры уставки в районе 5 °С. Разности температур узлов и $T_{уст}$ подтверждают наличие небесконечных тепловых проводимостей между узлами ТММ, а также наличие полосы нечувствительности шириной 1 К. На участке «С»–«Н» наблюдаются частые срабатывания РЭН по датчику температуры, однако постепенный рост внешнего теплового потока к моменту подхода к точке «Н» выводит систему из зоны регулирования 5 ± 1 °С и обеспечивает дальнейший росту температуры к точке «Д». Прекращение солнечного излучения на участке «Д»–«І» возвращает систему в зону терморегулирования с использованием обратной связи. Однако, в момент «Е» мощность НГ становится недостаточной для работы на уровне $T_{уст}$ и, поэтому, на участке «Е»–«F» система начинает постепенно возвращаться в состояние «А», где РЭН вынужден оставаться постоянно включенным.

Рисунок 3, при прочих равных, по отношению к рисунку 2, демонстрирует применение пропорционального регулирования РЭН, осуществляемого с помощью ШИМ-контроллера. Без необходимости детального, пошагового описания всего процесса можно видеть, что локальные и переходные температурные состояния системы остаются практически такими же, однако неисчислимы срабатываний НГ на участках «G»–«Н» и «І»–«Е» мы уже не наблюдаем. Работа НГ происходит спокойно с плавным выбором необходимой мощности нагрева в диапазоне от 0 до 20 Вт.

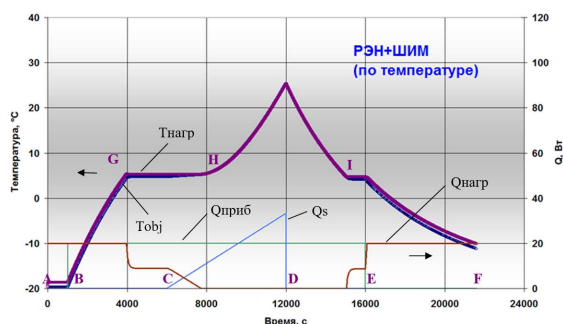


Рис. 3. Работа резистивного нагревателя с ШИМ-контроллером

Рисунок 4 показывает работу ПЭН, который применяется здесь как и обычный РЭН в режиме

ВКЛ/ВЫКЛ и также управляется по температуре, с помощью соответствующего датчика. Сравнение рисунков 2 и 4 позволяет увидеть, что для ПЭН имеет место проблема т. н. «холодного старта», при котором низкое электрическое сопротивление холодного ПЭН с напряжением 28 В дает мощность ~133 Вт. Т. е. мощность ПЭН, сконструированного из 5 параллельных НЭ при температуре +5 °С дает ~23 Вт, а при повышении температуры до +25 °С снижается до ~6 Вт и продолжает падать с ростом температуры. Вывод: чтобы ПЭН работал как обычный нагреватель необходимо брать НЭ с высокой точкой Кюри («существенно правее» рабочего температурного диапазона), но при этом, использовать НЭ в качестве управляющего термистора уже будет невозможно. Если же управлять НЭ в зоне перехода, используя сам ПЭН, в качестве термистора, придется проектировать конструкцию ПЭН под конкретную температуру уставки – таким образом, чтобы его номинальная мощность при выбранной температуре соотносилась с расчетной.

Рисунок 5 демонстрирует работу ПЭН с ШИМ. Здесь уже применяется ограничение по мощности для холодного старта (< 25 Вт): ограничение может выполняться, в частности, с помощью ШИМ. Сравнивая результаты на рисунках 4 и 5 (по аналогии с рис. 2 и рис. 3) можно также заключить, что температурное состояние системы, оснащенной ПЭН, при управлении ВКЛ/ВЫКЛ и при управлении ШИМ имеет сходство. Тем не менее, можно наблюдать и важные отличия. На рисунке 5 с помощью ШИМ осуществляется ограничение по току на холодном старте так, что предельная мощность ПЭН не может превысить величину 25 Вт: «шоковую нагрузку» величиной 132 Вт удалось предотвратить. Кроме того, здесь демонстрируется отличие, связанное с управлением по температуре и по току. Так, во втором случае, разница температуры уставки и температуры объекта более значима.

Теперь сравним рисунки 3 и 5. С помощью ПЭН температура объекта поддерживается в более узком диапазоне (благодаря саморегулированию), однако, это следствие того, что мощность РЭН ограничена 20 Вт, а ПЭН – величиной 25 Вт, что и позволяет эффекту саморегулирования проявиться в положительном качестве. Данный пример, все же, наглядно показывает, что ПЭН можно использовать одновременно как нагреватель и как датчик температуры, а обыч-

ный РЭН – нет, причем «цена такой опции» – «жесткая привязка» конструкции ПЭН к температуре уставки, а также более заметное отличие температуры термостатируемого объекта от $T_{уст}$.

Далее, с помощью рисунков 6 и 7, выполнен дополнительный вычислительный эксперимент, в котором, применительно как к РЭН, так и к ПЭН, исследуются режимы ВКЛ/ВЫКЛ с широкой зоной нечувствительности ($0\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Причем, в случае использования ПЭН регулирование выполнялось по току. Для РЭН алгоритм управления, в целом, похож на применяемый в режиме рис. 2, но для ПЭН регулирование выполнено по току и, в силу высокой нелинейности характеристики $I = f(T)$, при выполнении команд ВКЛ/ВЫКЛ используется не отклонение от $I_{уст}$, а граничные значения $I_1(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ и $I_2(15\text{ }^{\circ}\text{C})$.

Рисунок 6 показывает работу РЭН, где результирующий диапазон расчетных температур T_{OBJ} составляет $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для ПЭН, с помощью рисунка 7 можем видеть, что T_{OBJ} лежит в диапазоне $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В качественном выражении характер изменения температур для варианта с установкой ПЭН можно определить как более сглаженный, хотя количество включений нагревателей, в цикле, не отличается.

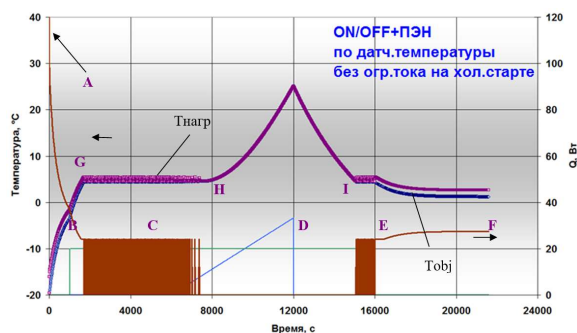


Рис. 4. Работа ПЭН в режиме ВКЛ/ВЫКЛ (по датч. температуры)

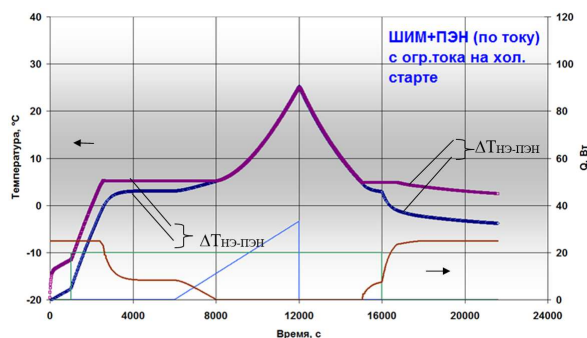


Рис. 5. Работа ПЭН с ШИМ-контроллером (с управлением по току)

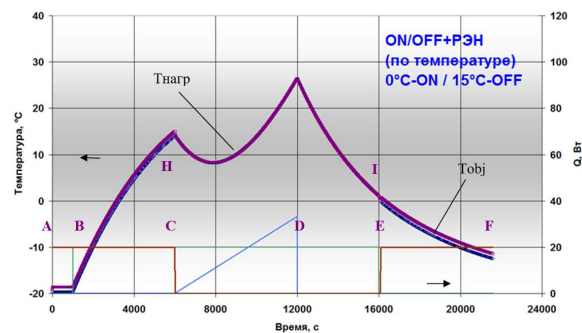


Рис. 6. Работа РЭН в режиме ВКЛ/ВЫКЛ по температуре с зоной нечувствительности в диапазоне $0 \dots 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

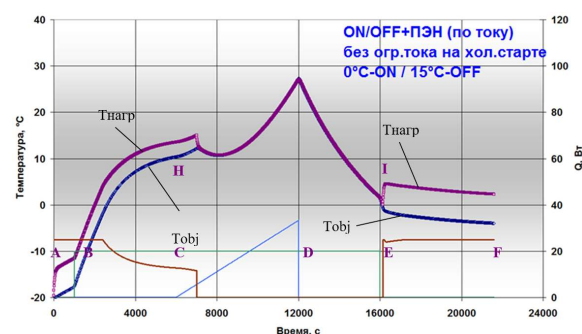


Рис. 7. Работа ПЭН в режиме ВКЛ/ВЫКЛ по току с зоной нечувствительности в диапазоне $0 \dots 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

5. О некоторых особенностях, касающихся конструкции корпусного позисторного нагревателя и алгоритма управления его мощностью

При разработке конструкции корпусных (т. е. выполненных в теплопроводном корпусе наподобие контактных теплообменников) позисторных нагревателей, количество применяемых НЭ ограничивают, руководствуясь, очевидно, экономическими соображениями (с целью уменьшения затрат на материалы, на составные элементы, соединители и т. п.). Однако, для применения в ЛСОТР необходимо добиваться снижения плотности теплового потока не только от нагревателя к конструкции КА, но и от НЭ к корпусу нагревателя. Этого можно добиться, увеличивая число НЭ. В работах [5, 8] показано, что термическое сопротивление между корпусом ПЭН и НЭ может иметь значимую (существенную) величину (и здесь уместна аналогия с термическим сопротивлением микросхем корпус-кристалл Rj-c). Рабочий температурный перепад между ПЭН и НЭ может серьезно увеличить разность температур « $\Delta T_{НЭ-ПЭН}$ » (см. рис. 5) между температурой уставки и прибором, и следовательно, пони-

зять точность поддержания температуры (при регулировании по току).

В рассмотренных здесь примерах, для ПЭН используется минимум пять НЭ (разработки TDK), выполненных в форме таблеток диаметром 12 мм, имеющих параллельное электрическое соединение. Это обеспечивает мощность ПЭН около 20 Вт (23 Вт) при 5 °С. Каждая грань каждой таблетки имеет три последовательных тепловых контактных соединения с корпусом, возникающих через изоляционную и электродную прокладки, что создает примерно такое термическое сопротивление

$$R_{НЭ-ПЭН} = \left(\sum \frac{\delta}{\lambda} + \sum \frac{1}{\alpha} \right) \times \frac{1}{F} = \left(\frac{0,0003}{0,3} + \frac{0,0003}{150} + \frac{3}{5000} \right) \times \frac{1}{0,25 \times \pi \times 0,012^2} \approx 14 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}.$$

Наличие $R_{НЭ-ПЭН}$ может «увеличить» (максимально возможный) рабочий перепад « $\Delta T_{НЭ-ПЭН}$ » до значения порядка $R/10 \times Q = 28 \text{ К}$! Однако, ПЭН из 20 таблеток, собранных в 10 параллельных линий по 2 последовательных таблетки в каждой, будет иметь аналогичные сопротивления и мощность (как и с 5 таблетками), создавая перепад температуры в 4 раза меньше, т. е. 7 К. Но и этого мало для обеспечения точности, если температура НЭ при регулировании, по факту, используется для сравнения с температурой уставки $T_{уст}$.

Напрашивается мысль о том, что компенсация разности температур, возникающей из-за существования $R_{НЭ-ПЭН}$ может быть достигнута путем оперативной корректировки температуры уставки $T_{уст}$. Но этому существует два препятствия:

- с ростом температуры существенно падает мощность ПЭН, поэтому возможность корректирующих отклонений $T_{уст}$ ограничена;
- разность температур $\Delta T_{НЭ-ПЭН}$ зависит от рабочей мощности ПЭН (изменяющейся с учетом скважности), т. е. температуру уставки надо постоянно корректировать, привязываясь к неизвестной (или каким-то образом вычисляемой) температуре корпуса ПЭН.

Очевидно, что, отказавшись от традиционного измерительного канала температуры, можно оценивать градиент температуры, а через него температуру в зоне установки оборудования только по эффективной мощности ПЭН. Но поскольку

именно принудительная стабилизация постоянного тока в ПЭН дает гарантии поддержания заданного температурного состояния объекта – связать новую температуру (т. е. новый ток) уставки с отводимым тепловым потоком, в данном случае, можно только анализируя скважность работы ШИМ (именно это позволяет судить о величине теплового потока). Но наличие внешних потоков не позволяет однозначно связывать поправку для $T_{уст}$ с мощностью ПЭН, следовательно, организовать автоматический, а, главное, убедительный (уверенный) алгоритм корректировки $T_{уст}$ будет крайне сложно.

Дополнительной технической проблемой в создании и применении ПЭН является формальное «присвоение» ему номинальной мощности, значение которой определяет уникальность конструкции для нагревателя этого типа. При температуре $T_{уст}$, T_{ref} (которая соответствует R_{ref}) или при какой-то иной температуре мощность ПЭН будет существенно отличаться, если выбор пал на управление по току. Кроме номинальной мощности следует определять и требования для обеспечения холодных стартов, которые будут происходить при отсроченных включениях ПЭН.

Таким образом, весовой коэффициент основных позитивных свойств ПЭН (саморегулирование и тепловая самозащита) должен быть крайне высоким, чтобы приоритетная позиция ПЭН стала выше РЭН в процессе выбора к применению в составе рассматриваемой ЛСОТР.

Заключение

На основе анализа результатов, полученных с помощью вычислительного эксперимента, можно заключить следующее:

1. Применяемые в сложившейся практике схемы и алгоритмы управления ЛСОТР на базе резистивных нагревателей достаточно хорошо отработаны. Однако, эти наработки применимы и к ПЭН, функционирующим в области температур ниже зоны активного перехода, т. е. ниже значения T_{ref}/R_{ref} . Для таких ПЭН не будет возникать проблема холодного старта, при этом, сам ПЭН, точнее его НЭ, не смогут сгореть в нештатных ситуациях, которые были бы связаны с неадекватным отводом тепла от нагревателя (например, при отклеивании управляющего термодатчика или ухудшении контакта нагревателя с местом установки).

2. Применение ШИМ-контроллера позволяет существенно снизить осцилляции, влияющие на качество регулирования температуры. Данный эффект может быть достигнут вне зависимости от типа применяемого нагревателя: РЭН или ПЭН. Применение ШИМ-контроллеров в составе ЛСОТР КА имеет своих сторонников и противников. Однако, в составе оборудования АКА, проблемы применения ШИМ могут рассматриваться наравне с применением прочей электроники. Тепловая инерционность составных элементов ЛСОТР позволяет применять импульсы с частотой на уровне 1 Гц и ниже, что «локализирует дискуссию» об электромагнитных шумах ШИМ.

3. Использование ПЭН в переходной (температурной) зоне, совместно с ШИМ в качестве нагревателя ЛСОТР имеет определенные перспективы для обеспечения активно регулируемого температурного режима периферийного оборудования АКА, поскольку такое решение позволит отказаться от применения измерительных кабелей и температурных датчиков. Саморегулирование ПЭН, в совокупности с управляемым регулированием также может быть востребовано.

Окончательно можно сформулировать три самодостаточных условия, которые могут обеспечить приоритет применения ПЭН по отношению к традиционно применяемым РЭН:

1. Для конкретно создаваемой ЛСОТР существуют рабочие, а также нештатные сценарии применения (планируемого) НГ, которые характеризуются объективно обоснованным риском его перегрева и потери.

2. Нет возможности, либо нет целесообразности протягивать измерительный кабель с управляющим температурным датчиком к месту установки термостатируемого оборудования.

3. Нет возможности применить контроллер (дефицит управляемых каналов) и, одновременно, нет необходимости поддерживать температуру объекта с высокой точностью. Т. е. здесь может быть реализовано саморегулирование ПЭН.

Материалы настоящего исследования могут быть полезны для разработчиков ЛСОТР перспективных АКА.

Список источников

- Ефанов В.В., Финченко В.С. (ред.). Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций. Химки: Издатель АО «НПО Лавочкина», 2018. 400 с.
- Gilmore D.G. (2nd ed.). Spacecraft thermal control handbook. *The Aerospace Corporation*. 2002. Vol. 1. 836 p.
- Ржанов А.В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик. *Успехи физических наук*. 1949. Т. 38, № 4. С. 461–489.
- Takaya Watanabe. Hyperthermia operation of intelligent medicine to eliminate cancer // *World Technology Instrument Co*. 2014.
- Котляров Е.Ю., Тулин Д.В., Финченко В.С. Анализ применимости нагревателей с положительным температурным коэффициентом сопротивления в локальных системах обеспечения теплового режима блоков оборудования космических аппаратов // *ТПТ*. 2020. Т. 12. № 2. С. 88–97.
- Technical specification: PTC thermistors as heating elements, Disk shaped, 12 V, Series/Type: B59060, January 2016, EPCOS AG is a TDK Group Company, 9 p.
- Technical specification: PTC Thermistors. EPCOS AG 2009, Corporate Center, P.O.Box 80 17 09, 81617 Munich, Germany, 28 p.
- Котляров Е.Ю., Кочетков А.Ю., А.Н. Зайцев А.Н. Результаты экспресс-испытаний промышленного позисторного нагревателя в условиях вакуума // *Труды XXVII Научно-технич. конференции «Вакуумная наука и техника»*, Судак, 14–19 сентября, С. 179–186, 2020.
- Козлов В.Г., Алексеев В.П., Озеркин Д.В. Микро-термостат с позисторным нагревателем. Патент RU 2164709 G05D 23/24, Бюл. № 9, 27.03.2001.
- Efanov VV, Finchenko VS (ed.). *Sistemy obespecheniya teplovykh rezhimov avtomaticheskikh mezhplanetnykh stantsii*. Khimki: NPO Lavochkina; 2018. 400 p. (In Russ.).
- Gilmore DG (2nd ed.). Spacecraft thermal control handbook. *The Aerospace Corporation*. 2002;1:836.
- Rzhanov AV. Barium titanate is a new ferroelectric. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1949;38(4):461–489. (In Russ.).
- Takaya Watanabe. Hyperthermia operation of intelligent medicine to eliminate cancer. *World Technology Instrument Co*. 2014.
- Kotlyarov E.Yu., Tulin D.V., Finchenko V.S. Analysis of the applicability of heaters with a positive temperature coefficient of resistance in local systems for ensuring the thermal regime of spacecraft equipment units. *TPT*. 2020;12(2):88–97. (In Russ.).
- Technical specification: PTC thermistors as heating elements. Disk shaped. 12 V. Series/Type: B59060. January 2016. EPCOS AG is a TDK Group Company. 9 p.
- Technical specification: PTC Thermistors. EPCOS AG 2009. Corporate Center. P.O.Box 80 17 09. 81617 Munich. Germany. 28 p.
- Kotlyarov EYu, Kochetkov AYU, Zaitsev AN. The results of rapid tests of an industrial posistor heater in vacuum conditions. *Trudy XXVII Nauchno-tekhnich. konferentsii «Vakuumnaya nauka i tekhnika»*. Sudak. 14–19 september. pp. 179–186. 2020. (In Russ.).
- Kozlov V.G., Alekseev V.P., Ozerkin D.V. *Microthermostat with a posistor heater*. Patent RU 2164709 G05D 23/24, 27.03.2001. (In Russ.).

References