

К. т. н. В. М. БАТУРКИН

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”  
E-mail: baturkin@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
12.05 2003 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА  
(НИИ “Шторм”, г. Одесса)

## ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА С ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКОЙ И РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

*Проведено исследование тепловых характеристик электронного блока негерметичного исполнения с подложкой, выполненной в виде плоской тепловой трубы.*

Тенденции в развитии принципов конструирования радиоэлектронных блоков научных приборов направлены на увеличение плотности монтажа элементов и объема выполняемых ими функций на единицу площади. Связанные с этим проблемы отвода тепла рассеяния требуют разработки новых перспективных способов обеспечения теплового режима, особенно для блоков научной космической аппаратуры внешнего расположения с негерметичным исполнением.

Для поддержания заданного температурного режима необходимо решить следующие задачи: отвод тепла от элементов; передача тепла к системе теплоотвода; сброс тепла в окружающую среду; регулирование температуры элементов и выравнивание температурного поля. Существующие литературные данные [1, с. 155—195; 2, с. 10] свидетельствуют о перспективности решения указанных задач с помощью тепловых труб постоянного и переменного термического сопротивления.

Настоящая работа посвящена разработке электронного блока негерметичного исполнения с подложкой, выполненной в виде плоской тепловой трубы и соединенной с системой отвода тепла и регулирования температуры на основе газонаполненных тепловых труб [3].

**П**ри разработке блока приняты следующие исходные данные:

— печатная плата для блока имеет односторонний монтаж. Размеры платы 180×130 мм, толщина платы — от 5 мм и меньше;

— уровень температуры элементов не должен превышать +70°C в условиях эксплуатации. Выделяемая суммарная мощность на плате меняется от 1 до 7 Вт. Источники тепловыделения — 25 радиоэлементов цилиндрической формы с размерами от Ø2×6 мм до Ø5,5×12 мм, соотношение максимального и минимального теплорассеяния на элементах — 10:1;

— температура посадочных мест прибора от -20 до +50°C;

— отвод теплоты от блока осуществляется в космическое пространство;

— система термостатирования (СТР) должна обеспечить стабилизацию температуры изотермической подложки при воздействии внутренних и внешних возмущений, в частности, при изменении внешнего лучистого теплового потока, поглощенного радиатором СТР, в диапазоне 100—300 Вт/м<sup>2</sup>;

— СТР функционирует в двух режимах: с обратной электрической связью по температуре изотермической подложки и без нее;

— конструкция прибора должна позволять отсоединение подложки от СТР.

При разработке конструкции по методике [4, с. 91—95] был проведен анализ теплового режима элементов платы при использовании традиционных способов охлаждения, в которых отвод тепла осуществляется: 1) на посадочные места прибора; 2) на корпус прибора (радиационную поверхность).

На основе анализа, а также с учетом того, что размеры платы и мощности рассеяния в перспективе могут возрасти в 1,5—3 раза, сделан вывод о целесообразности разработки других способов отвода тепла и термостабилизации элементов, в частности, на основе тепловых труб.

Была предложена следующая конструкция автономного электронного блока с изотермической подложкой и системой терморегулирования (рис. 1).

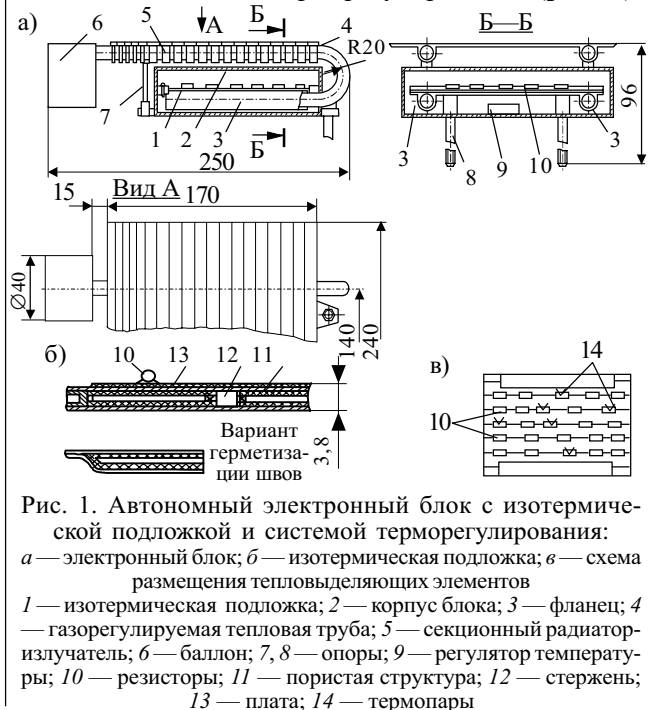


Рис. 1. Автономный электронный блок с изотермической подложкой и системой терморегулирования:  
а — электронный блок; б — изотермическая подложка; в — схема размещения тепловыделяющих элементов  
1 — изотермическая подложка; 2 — корпус блока; 3 — фланец; 4 — газорегулируемая тепловая труба; 5 — секционный радиатор-излучатель; 6 — баллон; 7, 8 — опоры; 9 — регулятор температуры; 10 — резисторы; 11 — пористая структура; 12 — стержень; 13 — плата; 14 — термопары

Изотермическая подложка 1 — плоская тепловая труба, установленная в корпусе 2 блока, соединяется с СТР, состоящей из двух газорегулирующих тепловых труб (ГРТТ) 4. Контакт ГРТТ с подложкой осуществляется по фланцам 3. Зоны конденсации тепловых труб соединены с секционным радиатором-излучателем 5. В конце зоны конденсации расположены баллоны 6 для аккумуляции неконденсирующегося газа. Для разгрузки зоны изгиба ГРТТ конец радиатора укреплен на двух стеклопластиковых опорах 7. Корпус 2 блока устанавливается на посадочных местах объекта с помощью четырех стеклопластиковых опор 8. Поверхность блока и обращенная к нему поверхность радиатора покрываются экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ).

Изотермическая подложка (ИП) представляет собой плоскую тепловую трубу размером 180×130×3,8 мм. На одну из ее поверхностей наклеена плата 13 из диэлектрика ФДМЭ 1-0,13 с резисторами 10, имитирующими радиоэлементы (рис. 1, б, в).

Теплота рассеяния, выделяемая резисторами 10, воспринимается изотермической подложкой 1. Образующиеся при этом пары теплоносителя осуществляют теплоперенос от элементов к зонам конденсации ИП, где осуществляется конденсация теплоносителя и передача тепла к зонам нагрева ГРТТ 3. Расстояние теплопереноса (размеры ИП) принципиальных ограничений не имеет, что отличает эту схему от цельнометаллической платы. ГРТТ осуществляют отвод тепла к радиатору-излучателю 5 и регулирование уровня температуры подложки. Для повышения точности стабилизации температуры в СТР предусмотрен малогабаритный регулятор температуры 9, управляющий температурой баллонов ГРТТ. Регулятор установлен в корпусе блока [5, с. 67].

Рассмотрим схему термических сопротивлений предложенной конструкции (рис. 2). Тепловой поток от каждого  $i$ -го элемента ( $i=1, 2, \dots, N$ )  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  через термические сопротивления перехо-

да “элемент—подложка”  $R_1, R_2, \dots, R_N$  воспринимается тепловой трубой — подложкой. (Температура подложки под каждым элементом обозначена  $T_{п,1}, T_{п,2}, \dots, T_{п,N}$ .) Далее тепловой поток за счет процессов парообразования (испарения или кипения) воспринимается паровой средой. (Термические сопротивления процесса обозначены  $R_{н,1}, R_{н,2}, \dots, R_{н,N}$ .) Температура парового пространства  $T_{п}$  под каждым элементом постоянна, что обеспечивает одинаковую температуру каждого элемента. Сброс тепла производится на две зоны конденсации — А и В. (Сопротивления при конденсации паров обозначены  $R_{к,А}$  и  $R_{к,В}$ .) Наименьшая температура подложки определяется температурами  $T_{к,А}$  и  $T_{к,В}$  в области контакта с зоной нагрева ГРТТ. (Теплоемкость каждого  $i$ -го элемента обозначена  $C_1, C_2, \dots, C_N$ , корпуса —  $C_{кор}$ , радиатора —  $C_{р}$ , баллона —  $C_б$ , суммарная теплоемкость зоны нагрева и транспортной зоны —  $C_{н+тр}$ , теплоемкость изотермической подложки —  $C_{ип}$ .)

Значения теплового потока  $Q_{ГРТТ}$ , подводимого к ГРТТ, зависят от влияния корпуса блока. Часть тепла  $\sum_{i=1}^N Q_i$  отводится к корпусу (или наоборот) излучением от элементов (соответствующие сопротивления  $R_{1-кор}, R_{2-кор}, \dots, R_{N-кор}$ ), от поверхности подложки с элементами (сопротивления  $R_{п,1-кор}, R_{п,2-кор}, \dots, R_{п,N-кор}$ ), с поверхности подложки без элементов ( $R'_{п-кор}$ ) и посредством контакта подложки с корпусом ( $R''_{п-кор}$ ). На температуру корпуса  $T_{кор}$  влияет температура посадочных мест прибора  $T_{пм}$ , а также окружающей среды  $T_0$ , через сопротивления  $R_{пм-кор}, R_{кор-о}$  соответственно.

Данные по сопротивлению определяют качество теплоизоляции и используемых тепловых развязок.

Уровень температуры пара в ИП определяется температурой пара в ГРТТ А и В, термическими сопротивлениями контакта между ИП и зоной нагрева ГРТТ ( $R_{конт,А}, R_{конт,В}$ ), сопротивлением зоны нагрева ГРТТ ( $R_{н,А}, R_{н,В}$ ). Отвод тепла от ГРТТ в окружающую среду ( $T_0$ ) осуществляется через переменные сопротивления  $R_{конт,А}, R_{конт,В}$  и  $R_{п-о}$ . Внешние воздействия на радиатор и баллон определяются соответственно потоками  $Q_{вн(т)}$  и  $Q_{б(т)}$ . При работе регулятора на баллоны дополнительно подается мощность  $Q_{б-рег}$  — в зависимости от температуры подложки около  $i$ -го элемента или от температуры пара  $T_{п}$ .

Исходя из схемы термических сопротивлений определены требования для обеспечения стабильности температуры элементов. Ввиду того, что величины  $R_{i-кор}, R_{п,i-кор}$  весьма велики и температуры  $T_{кор}$  и  $T_i$  отличаются ненамного, практически весь поток от каждого элемента  $Q_i$  передается через ИП к ГРТТ. Поэтому температура  $i$ -го элемента определяется как

$$T_i = T_{п} + Q_i(R_{н,i} + R_i).$$

Для обеспечения условия  $T_i = \text{const}$  необходимо, чтобы  $Q_i(R_{н,i} + R_i) \approx \text{const}$ . Из последнего условия можно разработать требования к функциям  $R_{н,i}(Q_i)$  и  $R_i(Q_i)$  для конкретного типа элементов. При  $R_1 = R_2 = R_i$  стабилизирующим фактором

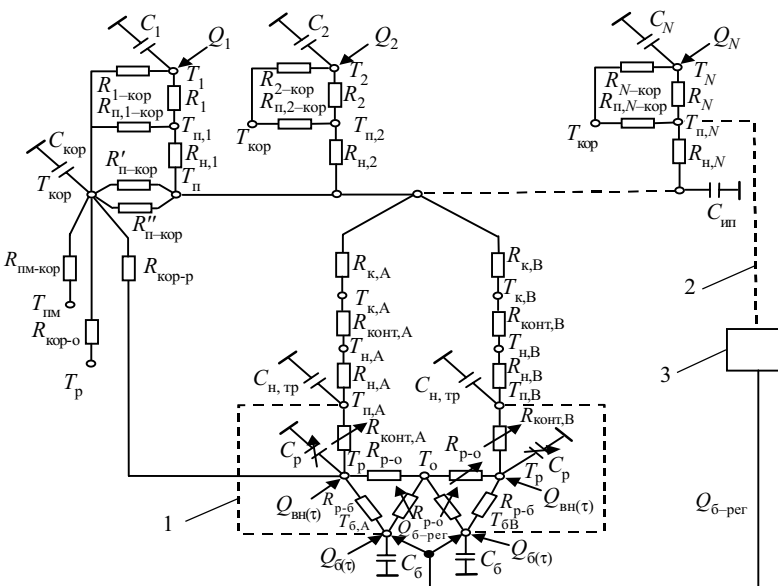


Рис. 2. Схема термических сопротивлений электронного блока: 1 — связь по балансу массы газа; 2 — связь по температуре; 3 — регулятор

является возможность существования различных по интенсивности режимов парообразования в капиллярной структуре ИП. Для режима испарения  $R_{н,i} \neq f(Q_i)$ , для режима кипения  $R_{н,i} \approx Q_i^{0,6} F_i^{-0,4}$  ( $F_i$  — поверхность контакта с подложкой [6]).

При условии  $R_{н,1} = R_{н,2} = R_{н,i} = \text{const}$  стабилизация температуры возможна за счет подбора сопротивления  $R_p$ , значение которого определяется характеристиками тепловой связи между элементом и подложкой. Общим требованием к  $R_p$ ,  $R_{н,i}$  является их малое абсолютное значение, т. к. точность стабилизации температуры каждого элемента  $\Delta T_i$  определяется как

$$\Delta T_i = \Delta T_{п} + \Delta Q_i (R_{н,i} + R_p),$$

где  $\Delta T_{п}$  — колебания температуры пара ИП;  $\Delta Q_i = Q_{i,\text{max}} - Q_{i,\text{min}}$ .

Колебания температуры пара ИП  $\Delta T_{п}$  зависят также от функционирования внешней системы терморегулирования. При использовании активной обратной связи  $\Delta T_{п}$  может быть меньше нуля, что позволяет уменьшить  $\Delta T_i$ . При пассивном регулировании  $\Delta T_{п} > 0$ , и для уменьшения колебаний температуры необходимо понижение сопротивлений  $R_{\text{конт,А}}$ ,  $R_{\text{конт,В}}$ ,  $R_{н,А}$ ,  $R_{н,В}$  и значений  $\Delta T_{п,А}$  и  $\Delta T_{п,В}$ , т. к.

$$T_{п} = \left( \frac{T_{п,А}}{R_{\text{конт,А}} + R_{к,А} + R_{н,А}} + \frac{T_{п,В}}{R_{\text{конт,В}} + R_{к,В} + R_{н,В}} + \sum_{i=1}^N Q_i \right) \times \left[ \frac{R_{к,А} + R_{к,В} + R_{\text{конт,А}} + R_{\text{конт,В}} + R_{н,А} + R_{н,В}}{(R_{к,А} + R_{\text{конт,А}} + R_{н,А})(R_{к,В} + R_{\text{конт,В}} + R_{н,В})} \right].$$

Принятая для повышения надежности система дублирования ГРТТ (конструкции А и В) в номинальном режиме работы уменьшает колебания  $\Delta T_{п}$ . Рассмотрим крайние случаи эксплуатации.

Обе ГРТТ функционируют нормально:

$$(R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н,А}) = (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н,В}).$$

Тогда

$$T_{п} = 0,5 \sum_{i=1}^N Q_i (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н,А}) + 0,5(T_{п,А} + T_{п,В}). \quad (1)$$

При выходе из строя одной ГРТТ (например В за счет разгерметизации) вследствие нарушения тепловой цепи  $(R_{\text{конт}} + R_{н,В}) \rightarrow \infty$ . Тогда

$$T_{п} = \sum_{i=1}^N Q_i (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н,А}) + T_{п,А}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), можно отметить, что т. к.  $T_{п,А} \approx 0,5(T_{п,А} + T_{п,В})$ , значение  $T_{п} - T_{п,А}$  для случая отказа ГРТТ возрастет в два раза, однако уровень стабилизации и возможности регулирования  $T_{п,А}$  сохраняются.

На основе схемы, приведенной на рис. 2, проведены оценки теплового баланса блока в целом при граничных условиях эксплуатации. Установлено, что при полученных в результате конструирования значениях величин  $R_{\text{пм-кор}}$  и  $R_{\text{кор-о}}$  уровень стабилизации температуры ИП составляет  $+30^{\circ}\text{C}$  при минимальной

мощности платы  $\sum_{i=1}^N Q_i = 1 \dots 1,5 \text{ Вт}$ .

Гидродинамический и теплофизический расчет характеристик капиллярно-пористой структуры [3, 7]

позволил определить конструкцию ИП и СТР. ИП представляет собой прямоугольный параллелепипед толщиной 3,8 мм. Наибольшие плоскости ИП из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм являются крышками. Внутри ИП покрыта пористой структурой из спеченного нержавеющей волокна пористостью 80% и толщиной 0,5 мм. Соединение структур 11 на крышках (рис.1, б) осуществляется артериями, установленными по периметру ИП, а также у стержней 12, функционирующих в качестве элементов жесткости при воздействии внешнего и внутреннего давления. Схема размещения элементов на ИП представлена на рис. 1, в.

ГРТТ имеют цилиндрический корпус из нержавеющей стали диаметром 8 мм с толщиной стенки 0,3 мм. Капиллярная структура изготовлена из того же материала, что и корпус, имеет одинаковую во всех зонах толщину (0,85 мм) и пористость (80%). Баллон диаметром 50 и длиной 40 мм имеет структуру толщиной 1 мм на кольцевой части и доньшках, а также артерию, соединяющую структуры баллона и зону конденсации. Для уменьшения габаритных размеров баллон углублен за плоскость радиатора. В зоне нагрева ГРТТ размещен фланец шириной 30 и длиной 130 мм. Зоны конденсации ГРТТ впаяны в радиатор-излучатель, изготовленный из дискретных элементов шириной 10 мм (14 шт.) и 5 мм (5 шт.). На неизлучающей стороне радиатора имеются узлы крепления низкотеплопроводных стоек. На радиатор и баллоны устанавливались пленочные нагреватели, а затем они покрывались эмалью АК-573 для достижения соответствующих оптических характеристик.

В состав блока также входил малогабаритный регулятор температуры, который подавал на баллоны ГРТТ электрическую мощность в зависимости от согласования показаний датчика, установленного на ИП, и датчика регулятора.

Конструкция блока с изотермической подложкой и системой термостатирования прошла комплекс термовакuumных и механических испытаний. Для определения теплотехнических характеристик узлов блока были предусмотрены шесть датчиков температур непосредственно на ИП под различными тепловыделяющими элементами, шесть датчиков на стыке зоны конденсации ИП и зон нагрева ГРТТ (по три на каждую ГРТТ), два датчика, измеряющие температуру транспортной зоны ГРТТ, 15 датчиков на радиаторе и два на баллонах.

Имитация внешних возмущений осуществлялась в соответствии с рекомендациями и с методикой [3] с помощью электронагревателей, установленных на баллонах и радиаторе с излучающей стороны. Была выбрана схема, представленная на рис. 3. Здесь  $Q_{\text{ГРТТ}}$  — поток, отводимый ГРТТ;  $Q_{\text{из}}$  — потери через теплоизоляцию.

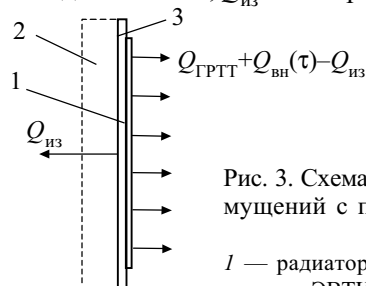


Рис. 3. Схема имитации внешних возмущений с помощью электронагревателей:

1 — радиатор; 2 — тепловая изоляция ЭВТИ; 3 — нагреватель

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ

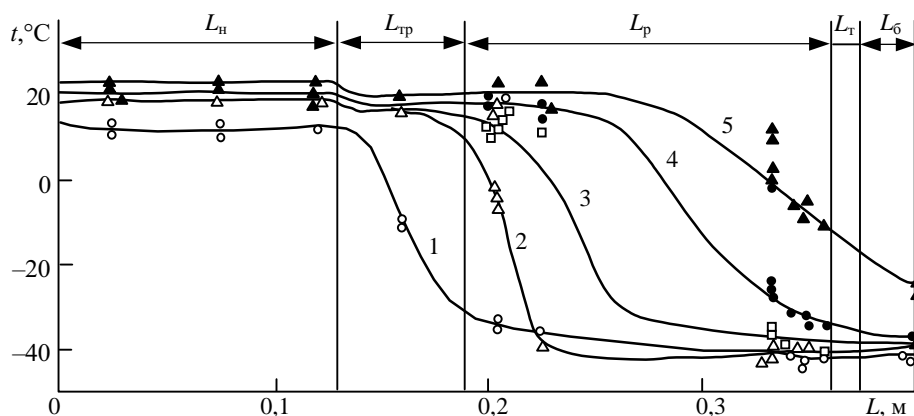


Рис. 4. Распределение температур по длине газорегулируемой тепловой трубы при различной мощности тепловыделения на ИП ( $Q_{ипп}$ ): 1 — при  $Q_{ипп}=1$  Вт; 2 — 3 Вт; 3 — 5 Вт; 4 — 7 Вт; 5 — 10 Вт

Перед термовакuumными испытаниями ИП была исследована автономно в нормальных условиях для более детального анализа температурного поля. Отвод тепла осуществлялся от зон конденсации с помощью водяных теплообменников с температурой охлаждающей среды  $+40^{\circ}\text{C}$ . Исследовались влияние положения подложки относительно сил гравитации, особенности функционирования при одностороннем отводе тепла, влияние уровня тепловыделения элементов. Установлено, что изменение положения в горизонтальной плоскости (резисторы сверху или снизу) не оказывает влияния на температуру элементов (с точностью  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ). При вертикальном положении ИП (превышение нижней и верхней точек 180 мм) температуры элементов и парового пространства сохраняются на том же уровне. Если отключен верхний конденсатор, сопротивление “пар-конденсатор” несколько возрастает за счет слива избытка жидкости. При функционировании только верхнего конденсатора сопротивление “пар-конденсатор” уменьшается за счет уменьшения толщины пленки жидкости на поверхности структуры. Термическое сопротивление для наиболее горячего резистора между телом резистора и паром составило приблизительно 38 К/Вт.

Испытания в вакуумной камере проводились при вертикальном положении ИП. В этом случае плоскость изгиба ГРТТ находится в горизонтальной плоскости, что приближает условия испытаний к эксплуатации в невесомости. Для ИП это положение является наихудшим из условий теплопереноса, т. к. необходимо осуществлять подъем или удержание теплоносителя в капиллярной структуре на определенной высоте.

На рис. 4 представлены первичные данные — распределение температуры по длине ГРТТ при эффективной температуре радиатора и баллона  $T_{эф} = -40^{\circ}\text{C}$ . Эксперименты проведены также при значениях  $T_{эф} -60^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, +15^{\circ}\text{C}$ , соответствующих различным уровням внешних возмущений  $Q_{вн}$ . На рисунке показаны зоны нагрева ГРТТ ( $L_{н}$ ), транспорта ( $L_{тр}$ ), радиатора ( $L_{р}$ ), соединительной трубки ( $L_{т}$ ), баллона ( $L_{б}$ ).

Расхождение температур каждой ГРТТ в зоне нагрева ( $T_{н,А}, T_{н,В}$ ) и транспорта ( $T_{т,А}, T_{т,В}$ ) составляет

1— $3^{\circ}\text{C}$  и обусловлено неточностями при заполнении неконденсирующимся газом. Термическое сопротивление перехода “стенка—пар” в зоне нагрева для ГРТТ составило 0,4 К/Вт. Минимальная мощность начала регулирования для двух ГРТТ находится в диапазоне 1,0...1,5 Вт, максимальная — по условиям регулирования взаимосвязана со значением внешних возмущений, а по условиям передачи теплового потока составляет 15 Вт на каждую ГРТТ.

На рис. 5 представлены обобщенные характеристики регулирования — зависимости температур наиболее горячего элемента подложки ( $Q_{max}=0,1Q_{ипп}$ ), наименее горячего элемента ( $Q_{min}=0,011Q_{ипп}$ ), фланцев зоны нагрева от подводимой к ИП мощности при различных уровнях внешних возмущений  $T_{эф} (-60^{\circ}\text{C}, -40^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C})$ .

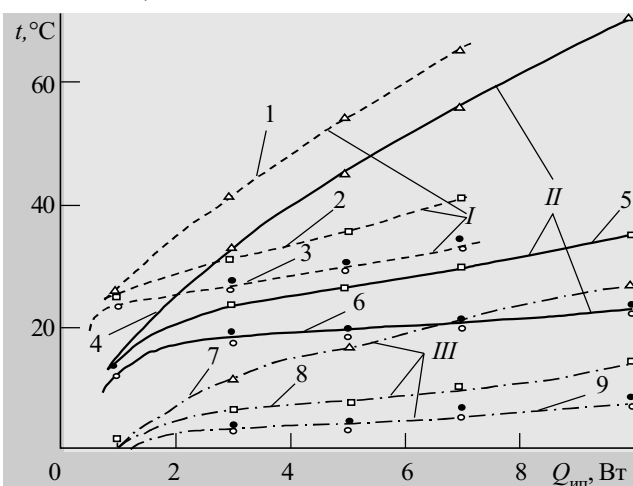


Рис. 5. Характеристики регулирования ИП с СТР: I —  $T_{эф} = 0^{\circ}\text{C}$ ; II —  $T_{эф} = -40^{\circ}\text{C}$ ; III —  $T_{эф} = -60^{\circ}\text{C}$   
1, 4, 7 — максимальное значение температуры подложки; 2, 5, 8 — минимальное значение температуры подложки; 3, 6, 9 — средние температуры фланцев ГРТТ (А — светлые кружки, В — черные кружки)

При постоянном значении  $T_{эф}$  чувствительность СТР к изменению нагрузки  $Q_{ипп}$  составляет 2 Вт/ $^{\circ}\text{C}$  для фланцев ГРТТ. Для элементов платы это значение существенно уменьшается: до 0,2 Вт/ $^{\circ}\text{C}$  для наиболее горячего элемента и до 0,4 Вт/ $^{\circ}\text{C}$  для наименее горячего элемента. Точность, обеспечиваемая ИП совместно с СТР, функционирующей в пассивном режиме, составит:  $23 \pm 10^{\circ}\text{C}$  для элементов, установленных на фланцах ГРТТ;  $40 \pm 25^{\circ}\text{C}$  для радиоэлементов с тепловыделением  $0,1Q_{ипп}$  и плотностью тепловыделения до 0,9 Вт/ $\text{cm}^2$ ;  $28 \pm 13^{\circ}\text{C}$  для радиоэлементов с тепловыделением  $0,01Q_{ипп}$  и плотностью тепловыделения до 0,6 Вт/ $\text{cm}^2$ . При этом температура посадочных мест прибора изменяется в пределах  $-20 \dots +50^{\circ}\text{C}$ , суммарная мощность тепловыделения

на изотермической подложке  $Q_{\text{ип}}=1...7$  Вт, внешние возмущения соответствуют эффективной температуре радиатора в диапазоне  $-40...0^{\circ}\text{C}$ .

Расчетные значения температур в зонах ГРТТ и на корпусе плоской ТТ согласуются между собой в пределах  $4^{\circ}\text{C}$ . Большие отклонения, достигающие  $10^{\circ}\text{C}$ , наблюдаются для температур тепловыделяющих элементов из-за неопределенности в оценке контактного сопротивления “элемент-подложка”.

Расчетные соотношения для составляющих теплового баланса всего блока при минимальных и максимальных значениях мощности и температуры посадочных мест подтверждены экспериментом.

На рис. 6 представлены некоторые результаты исследования функционирования СТР с включением обратной электрической связи по температуре подложки.

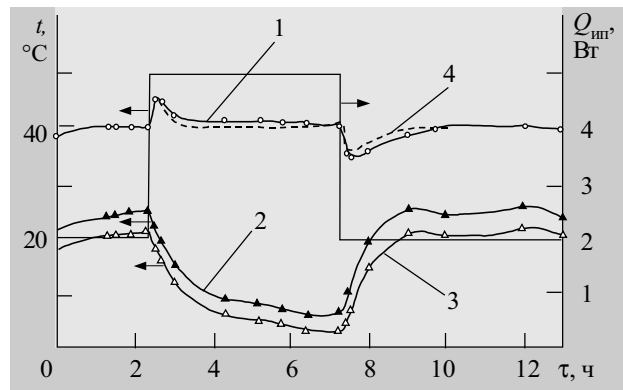


Рис. 6. Работа системы терморегулирования совместно с регулятором при изменении мощности тепловыделения подложки:

1 — средняя температура ИП; 2, 3 — температура баллонов ГРТТ; 4 — расчет по [8] ( $T_{\text{эф}} \approx 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{пм}} = 50^{\circ}\text{C}$ )

В конструкции ИП предусмотрен датчик, установленный в центре подложки. Он фиксирует температуру, среднюю между температурой окружающих элементов и парового канала подложки. При включении регулятора происходит подъем уровня температуры подложки до установленного (с  $28$  до  $40^{\circ}\text{C}$ ) за счет увеличения температуры баллонов ГРТТ. При увеличении мощности на плате с  $2$  до  $5$  Вт температура подложки повышается и отключается нагрев баллонов. При понижении их температуры уменьшается температура пара в ГРТТ  $T_{\text{п,А}}$ ,  $T_{\text{п,В}}$  на значение порядка  $\Delta Q(R_{\text{н,А}} + R_{\text{конт,А}} + R_{\text{к,А}})0,5$  (рис. 2) — с тем, чтобы средняя температура подложки оставалась постоянной.

Если датчик установлен на наиболее ответственном элементе, то температура подложки будет меняться с учетом термического сопротивления  $R_i + R_{\text{н,и}}$ . Температурный диапазон компенсации этим способом ограничен затратами энергии на изменение температуры баллонов, максимальной температурой баллона, определяемой внешними возмущениями. В соответ-

ствии с теорией [8, с. 198—202], изменение температуры источника тепла определяется по зависимости

$$T_{\text{ип,т}} - T_{\text{ип,нач}} = \Delta T_{\text{п,ГРТТ}} (1 - \tau_{\text{ип}} / \tau_0)^{-1} [\exp(-\tau / \tau_0) - \exp(-\tau / \tau_{\text{ип}})], \quad (5)$$

где  $\Delta T_{\text{п,ГРТТ}}$  — требуемое изменение температуры пара в ГРТТ;  $\tau_{\text{ип}}$ ,  $\tau_0$  — постоянные времени ИП и баллона ГРТТ, соответственно.

Расчет по зависимости (5) показал достаточно хорошее совпадение с экспериментом. Значения имеющихся локальных экстремумов в температуре ИП согласуются с теоретическим расчетом по [8].

Экспериментальные исследования блока проведены также для режима циклического воздействия внешних возмущений по методике [3, с. 56].

Разработанная конструкция ИП совместно с СТР была подвергнута комплексным механическим испытаниям. Характеристики всех узлов сохранились.

\*\*\*

Проведенный комплекс исследований показал эффективность радиоэлектронных блоков, охлаждение элементов которых осуществляется с помощью тепловых труб. Соединение изотермических подложек с системой терморегулирования позволяет существенно сузить диапазон колебаний температур элементов, уменьшить уровень их рабочей температуры, что благоприятно сказывается на повышении надежности и стабильности их характеристик.

Дальнейшее развитие систем данного типа может быть связано с улучшением технических характеристик системы, с решением задач по термостабилизации элементов с существенно отличающимся тепловыделением.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воронин В. Г., Ревякин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов.— М.: Машиностроение, 1976.
2. Алексеев В. А., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Энергия, 1979.
3. Батуркин В. М., Дудеев А. А., Гречина Н. К., Шкода К. Н. Исследование характеристик системы терморегулирования электронного блока с применением тепловой трубы переменного термического сопротивления / В кн.: Конструирование и технология изготовления космических приборов.— М.: Наука, 1987.— С. 44—57.
4. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах.— Л.: Энергия, 1968.
5. Дульнев Г. Н., Беляков А. П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры.— М.: Радио и связь, 1985.
6. Семена М. Г., Зарипов В. К., Шаповал А. А. Интенсивность теплообмена при кипении на поверхности с пористыми покрытиями в условиях капиллярного транспорта // Инж.-физ. журн.— 1987.— Т. 52, № 4.— С. 592—597.
7. Семена М. Г., Колосовский М. О., Малкина И. Э. Максимальная теплопередающая способность артериальных труб // Пром. теплотехника.— 1980.— Т. 2, № 4.— С. 66—71.
8. Дан П. Д., Рей Д. А. Тепловые трубы.— М.: Энергия, 1979.