



УДК. 65. 01. Е45

М. П. Ленюк, д-р физ.-мат. наук, **О. Г. Даналакий**, аспирант
Черновицкий факультет Национального технического университета
«Харковский политехнический ин-т»
(Украина, 58018, Черновцы, ул. Главная, 203а
тел. (0372) 72415, E-mail: OGDanalaki@gmail.com)

Математическая модель полупроводникового термоэлектрического устройства для охлаждения компьютерного процессора

(Статью представил д-р техн. наук М. В. Мыслович)

Разработаны математические модели термоэлектрических полупроводниковых устройств для охлаждения процессора с применением плавящегося вещества.

Розроблено математичні моделі термоелектричних напівпровідникових пристроїв для охолодження процесора з застосуванням витоплювальної речовини.

Ключевые слова: термоэлементы, физические процессы, распределение температуры.

Использование термоэлектрических устройств для охлаждения процессора значительно улучшает температурные характеристики во время его работы в различных режимах, что позволяет значительно увеличить надежность и долговечность процессора. В настоящее время для охлаждения процессора компьютера используются системы, работающие на продув воздуха, например установленный на процессоре кулер. Однако кулер имеет ряд недостатков: неспособность обеспечить необходимый уровень пылезащиты и температуру выше комнатной; неприемлемость для термостатирования; инерционность.

Термоэлектрический метод охлаждения позволяет осуществлять понижение температуры в малом объеме при незначительных габаритах и весе всего устройства. В случае необходимости температура, обеспечиваемая термоэлектрическим охлаждающим прибором посредством специальной схемы, может быть стабилизирована на требуемом уровне с большой точностью.

Обзор публикаций, посвященных термоэлектрическим охлаждающим устройствам, свидетельствует о том, что, несмотря на достаточно значительные успехи в этой области, в настоящее время существует необходи-

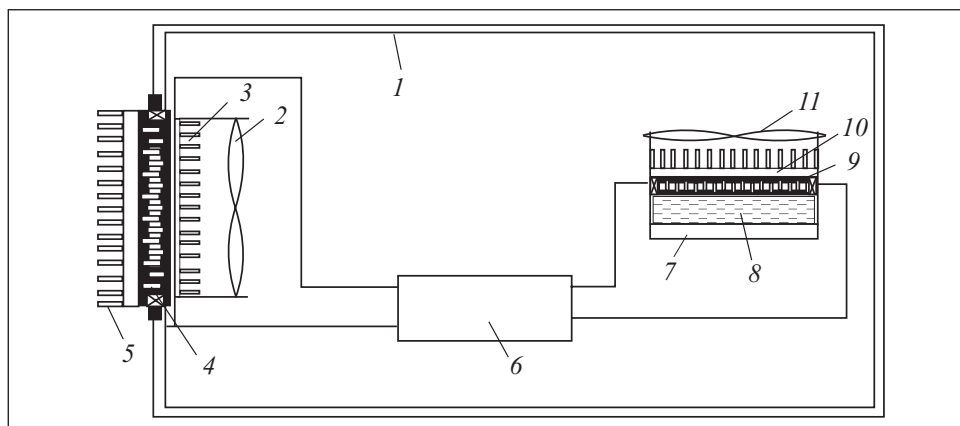


Рис. 1. Схема устройства для охлаждения процессора с применением плавящегося вещества: 1 — системный блок компьютера; 2, 11 — вентиляторы; 3, 5, 10 — теплоотводы; 4, 9 — ТЭМ; 6 — блок питания; 7 — процессор; 8 — контейнер с рабочим веществом

мость в разработке новых термоэлектрических систем тепловода и термостабилизации компонентов компьютера. При этом наиболее важной является разработка высокоэффективной системы охлаждения процессора для повышения быстродействия и объемов перерабатываемой компьютером информации.

Рассмотрим результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку математической модели термоэлектрической системы, реализующей плавный прогрев и охлаждение процессора в режиме включения и выключения компьютера, и математической модели системы, основанной на использовании плавящегося рабочего вещества для термостатирования процессора в установившемся режиме работы.

Для улучшения условий теплообмена процессора с охлаждающим устройством целесообразно размещать между процессором и термоэлектрическим модулем (ТЭМ) емкость (контейнер) с плавящимся рабочим веществом, имеющим стабильную температуру плавления.

В рассматриваемом устройстве (рис. 1) контейнер с рабочим плавящимся веществом установлен между процессором и ТЭМ и находится в кондуктивном тепловом контакте с ними [1]. С одной стороны контейнер с рабочим веществом нагревается процессором, а с другой — охлаждается ТЭМ. Такая схема охлаждения процессора позволяет повысить эффективность теплоотвода от процессора и обеспечить необходимый температурный режим его работы. Это стало возможным вследствие высокой теплоемкости плавящихся веществ (азотнокислый никель, парафин). Одновременно весь объем системного блока компьютера, изолированный от окру-

жающей среды, охлаждается другим ТЭМ. Это позволяет поддерживать в системном блоке компьютера требуемую температуру, приемлемую и для других компонентов компьютера, установленных в системном блоке, исключить попадание в него пыли и не допустить влияния других возможных вредных воздействий на компоненты компьютера.

Математическая модель представленного устройства включает модель термостатирования процессора посредством контейнера с плавящимся веществом и ТЭМ, а также модель термостабилизации системного блока компьютера.

Рассмотрим вначале математическую модель термостатирования процессора посредством контейнера с плавящимся веществом и ТЭМ. В состав устройства для охлаждения процессора с использованием плавящегося вещества входит тонкостенная емкость (контейнер) конечных геометрических размеров с гладкой или ребренной поверхностью, изготовленная из металла или пластика, герметичный объем которой заполнен рабочим веществом. Контейнер с плавящимся веществом помещается между процессором и ТЭМ. Во время работы основная часть тепла, рассеиваемого процессором, поглощается скрытой теплотой плавления вещества. С противоположной стороны контейнер охлаждается холодными спаями ТЭМ.

Таким образом, в контейнере с плавящимся веществом существуют две фазы — жидкая и твердая. Для обеспечения практического применения данного устройства, необходимо, чтобы тепло, выделяемое процессором и поглощаемое рабочим веществом, эффективно отводилось ТЭМ.

Анализ механизма явлений, происходящих в процессе теплообмена в устройстве, выполнен для одномерной модели при следующих допущениях:

- температура в жидкой и твердой фазах рабочего вещества является функцией одной пространственной координаты;

- температура на границе раздела соответствует устойчивому сосуществованию твердой и жидкой фаз;

- интервал температур плавления и кристаллизации (затвердевания) мал по сравнению с соответствующими температурами плавления и кристаллизации, которые приняты постоянными в течение всего процесса;

- длина и ширина емкости, заполненной рабочим веществом, значительно больше ее толщины (поэтому влиянием боковых поверхностей на теплообмен пренебрегаем);

- процессор установлен на плоской поверхности;

- рассеиваемая процессором и отводимая ТЭМ мощность равномерно распределена по поверхности их контакта с металлической оболочкой устройства;

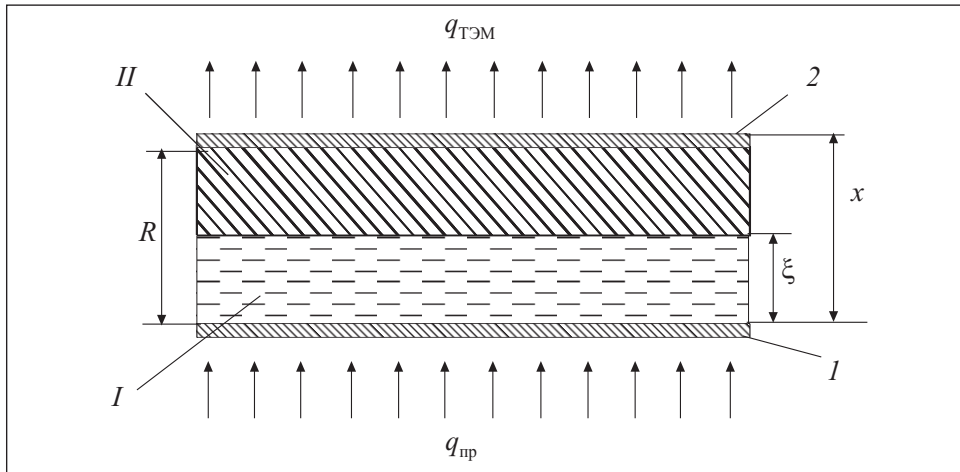


Рис. 2. Расчетная схема процесса теплообмена: *I* и *II* — жидкое и твердое вещество; *1* и *2* — нижняя и верхняя оболочки

термическим сопротивлением контакта процессора и ТЭМ с металлической оболочкой пренебрегаем.

Расчетная схема процесса теплообмена при плавлении и затвердевании рабочего вещества, соответствующая работе процессора и ТЭМ, приведена на рис. 2. При подводе тепла к оболочке, соприкасающейся сверху с рабочим веществом, после достижения определенной толщины расплава возникают конвективные потоки тепла, обусловленные наличием гравитационных сил и градиента плотности жидкости по толщине. До этого момента конвекция в жидкой фазе отсутствует или достаточно слаба, поэтому по толщине слоя существует поле температур. После достижения определенной толщины слоя расплава ξ начинается интенсивное перемешивание горячих и холодных слоев, при этом полем температур по жидкой фазе можно пренебречь.

Уравнения теплового баланса при плавлении *I* для оболочки *1* и затвердевании *II* для оболочки *2* имеют вид

$$(c\rho\delta)_1 \frac{dT_1}{d\tau} = q_{\text{пр}} + k_{\text{ср}}(T_{\text{ср}} - T_1) + q_{\text{р.в.}I} \quad (1)$$

$$(c\rho\delta)_2 \frac{dT_2}{d\tau} = -q_{\text{ТЭМ}} + k_{\text{ср}}(T_{\text{ср}} - T_2) + q_{\text{р.в.}II}, \quad (2)$$

где c , ρ и δ — теплоемкость, плотность и толщина оболочки *1*; τ — время; $k_{\text{ср}}$ — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; T_1 и T_2 — среднemasовые температуры оболочек *1* и *2*; $T_{\text{ср}}$ — температура окружающей среды; $q_{\text{пр}}$ — количество теплоты, рассеиваемое процессором; $q_{\text{ТЭМ}}$ —

количество теплоты, поглощаемое ТЭМ; $q_{p.vI}$ и $q_{p.vII}$ — количество теплоты, полученное и отданное рабочим веществом.

Учитывая результаты, приведенные в работе [2], и полагая коэффициенты теплоотдачи со стороны оболочки и поверхности раздела фаз постоянными, можно приближенно сформулировать математическую постановку задачи для симметричной модели:

$$(cp\delta)_1 \frac{dT_1}{d\tau} = q_{np} + k_{cp}(T_{cp} - T_1) + \alpha_1(T_{cp} - T_1); \quad (3)$$

$$c_1 p_1 \varepsilon \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_1(T_{cp} - T_1) + \alpha_{rp}(T_{cp} - T_1); \quad (4)$$

$$(cp\delta)_1 \frac{dT_1}{d\tau} = -q_{TЭМ} + k_{cp}(T_{cp} - T_1) + q_{p.vII}, \quad (5)$$

где α_1 и α_{rp} — коэффициенты теплоотдачи соответственно от оболочки I к жидкости и от границы раздела фаз к жидкости.

Для жидкой (1) и твердой (2) фаз рабочего вещества

$$c_1 p_1 \frac{dT_\tau}{d\tau} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2}, \quad i=1, 2, \quad \varepsilon \leq x \leq R; \quad (6)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{dT_1}{dx} \right|_{x=\xi} - \lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=\xi} = -\rho_2 r \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (7)$$

где c_1, p_1 и λ_1 — теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего вещества; $T_1 = T_2 = T_{cp}$ при $x = \xi$; $T_1|_{x=0} = T_1$; $q_{p.vII} = \lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=R}$.

При решении системы уравнений (6), (7) использован приближенный интегральный метод, подобный предложенному в [3], с помощью которого система уравнений в частных производных приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$(cp\delta)_1 \frac{dT_1}{d\tau} = -q_{np} + \kappa_{cp}(T_{cp} - T_1) + \alpha_1(T_{cp} - T_1);$$

$$c_1 p_1 \varepsilon \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_1(T_{cp} - T_1) + L_{kp}(T_{cp} - T_1); \quad (8)$$

$$(cp\delta)_2 \frac{dT_1}{d\tau} = -q_{TЭМ} + \kappa_{cp}(T_{cp} - T_2) + \frac{\lambda_2(T_2 - T_{cp})}{R - \xi};$$

$$\rho_2 \tau \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_2(T_2 - T_{cp})}{R - \xi} + \alpha_{cp}(T_1 - T_{cp}).$$

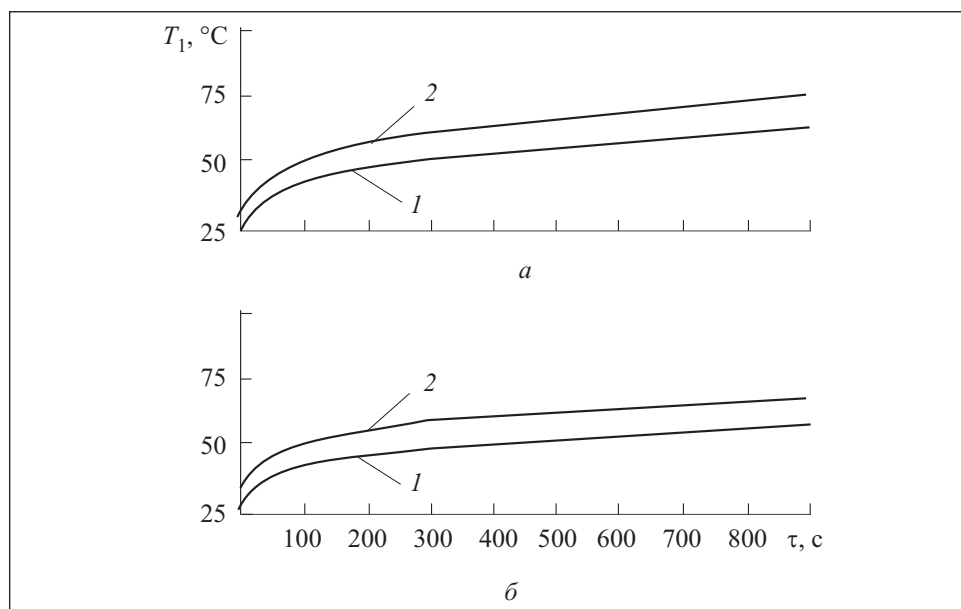


Рис. 3. Зависимости температуры горячей стороны контейнера с плавящимся веществом (а) и температуры жидкой фазы плавящегося вещества (б) от времени (плавящееся вещество — парафин; $(ср\delta)_1 = 2,1 \cdot 10^4$ Дж/(м² К); $R = 0,008$ м): 1 — $q_{пр} = 26000$ Вт/м²; 2 — $q_{пр} = 27000$ Вт/м²

Система уравнений (8) решена численным методом Рунге—Кутта 4-го порядка в среде MATHCAD 8.0 (профессиональная версия) [4, 5].

На рис. 3 представлены зависимости температуры процессора, т.е. температуры нагреваемой им поверхности T_1 контейнера с плавящимся веществом, и температуры жидкой фазы плавящегося вещества от времени τ после включения исследуемого устройства при различных значениях $q_{пр}$.

Как видно из рис. 3, а, сразу после включения компьютера температура процессора увеличивается и затем плавно принимает определенное значение, приемлемое для устойчивой работы процессора. Из рис. 3, б, видно, что сразу после включения компьютера температура процессора увеличивается и затем также плавно стабилизируется.

На рис. 4, а, представлена зависимость температуры поверхности T_2 контейнера с плавящимся веществом, находящегося в тепловом контакте с охлаждающим эту поверхность ТЭМ, от времени τ после включения устройства при различных значениях $q_{пр}$. Как видим, на начальном этапе температура оболочки, находящейся в тепловом контакте с ТЭМ, падает, а затем постепенно стабилизируется.

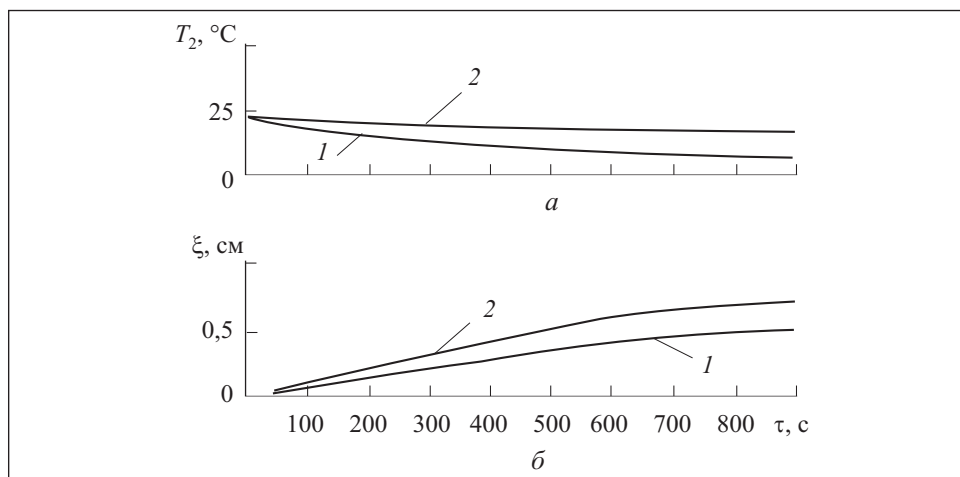


Рис. 4. Зависимости температуры холодной стороны контейнера с плавящимся веществом (а) и координаты границы раздела фаз в контейнере с плавящимся веществом (б) от времени (плавящееся вещество — парафин; $(c\rho\delta)_2 = 2\text{Д} \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R=0,008 \text{ м}$; $q_{\text{ТЭМ}} = 25000 \text{ Вт}/\text{м}^2$): 1 — $q_{\text{пр}} = 26000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 2 — $q_{\text{пр}} = 27000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $q_{\text{ТЭБ}} = 25000 \text{ Вт}/\text{м}^2$

На рис. 4, б, представлена теоретическая зависимость координаты границы раздела фаз ξ плавящегося вещества от времени τ после включения устройства. В зоне контакта процессора и контейнера образуется жидкая фаза. Координата ξ , постепенно смещается в сторону ТЭМ и далее, в процессе работы устройства, значение ξ достигает определенного уровня, что позволяет сделать вывод о стабилизации температурного режима процессора. Данное обстоятельство свидетельствует о возможности использования контейнера с плавящимся веществом в качестве компонента системы термостатирования процессора на основе ТЭМ.

Рассмотрим математическую модель термостабилизации системного блока компьютера. Расчет термоэлектрического устройства (ТЭУ) термостабилизации системного блока компьютера заключается в расчете условий теплообмена и электрофизических параметров термобатареи (ТЭБ), состоящей из ТЭМ. Как видно из рис. 5, существует непосредственный тепловой контакт спаев ТЭБ с объемом статирования.

При термостабилизации замкнутого объема в нем обеспечивается температура среды $T_{\text{в.ср}}$, омывающей внешние спаи ТЭБ. Тепловая нагрузка на ТЭБ определяется суммой внутренних тепловыделений $W_{\text{вн}}$ и теплопритоков (теплопотерь) изделия $Q_{\text{из}}$ со стороны среды, омывающей объем статирования. Следует заметить, что в общем случае $T_{\text{в.ср}}$ не равна температуре среды $T_{\text{ср}}$, омывающей внешние спаи ТЭБ [6].

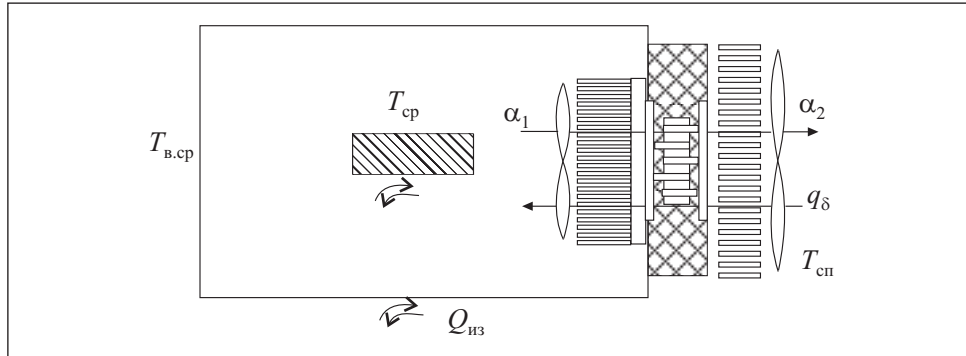


Рис. 5. Тепловая схема режима статирования объема

Расчет коэффициентов теплопередачи по внутренней $k_{вн}$ и наружной $k_{нар}$ сторонам ТЭБ в связи с разнообразием схем организации теплообмена и его интенсификации целесообразно вынести за рамки расчета ТЭБ [7]. Через ТЭБ в объем термостабилизации или наружу поступает тепловой поток q_{δ} . При наличии в объеме термостабилизации тепlostокков мощность внутренних источников W вводится со знаком минус [8].

Определяем необходимую холодопроизводительность ТЭБ для теплоизолированного объема в режиме охлаждения:

$$Q_0 = Q_{из} + W_{вн}.$$

Если теплоизоляция осуществляется слоем теплоизолирующего материала, то теплопритоки для плоской стенки определяем по формуле

$$Q_{из} = \frac{\Delta t_{из} F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где $\delta_{из}$ — толщина стенки изделия; F — площадь стенки; $\Delta t_{из}$ — разность температур сред по обеим сторонам стенки; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на обеих сторонах стенки; $\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности стенки.

Выбираем режим работы ТЭБ. Режим максимальной энергетической эффективности характеризуется наименьшими затратами мощности для выработки заданного количества холода и представляет наибольший практический интерес, поскольку параметры современных термоэлементов (ТЭ) не обеспечивают настолько высокий коэффициент холодопроизводительности, чтобы им можно было пренебречь с целью экономии материала. Режим максимальной энергетической эффективности является

универсальным, так как его реализация обеспечивает оптимизацию различных характеристик термоэлектрических охладителей.

Режим наибольшей холодопроизводительности применяется, когда на имеющейся ТЭБ необходимо получить наибольшее охлаждение.

Режим минимального тока используется только в случаях, когда величина силы тока источника питания ограничена при заданных параметрах напряжения и величине холодопроизводительности.

Задаем перепады температур между спаями и средами теплообмена с ними по холодной Δt_x и горячей Δt_r сторонам. Температуры холодного и горячего спаев:

$$T_x = T_{cp} - \Delta t_x, \quad T_r = T_{в.ср} - \Delta t_r.$$

Определяем мощность, потребляемую ТЭБ при охлаждении, $W = Q_0 / \varepsilon$, и при нагреве, $W = Q_1 / K$;

тепловыделение на горячих спаях при охлаждении системного блока:

$$Q_r = Q_0 + W;$$

силу тока:

$$I = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{\alpha I}{k} \right);$$

число ТЭ в батарее: $N = U / u$;

сечение ветви ТЭ:

$$S = \frac{k_r I}{x} \left(\frac{k}{k_1} \right);$$

сечение всех ветвей ТЭБ: $S_\Sigma = 2NS$.

Находим необходимые коэффициенты теплопередачи ребрений, отнесенные к единице их площади основания:

по холодной стороне —

$$k_{п.х} = \frac{Q_0}{\Delta t_{п.х}},$$

по горячей стороне —

$$k_{п.г} = \frac{Q_0}{\Delta t_{п.г}}.$$

Расчет ребрений теплоотвода с вынужденной конвекцией выполняем так. Для плоских ребер с постоянным тепловым потоком по длине при постоянных коэффициенте теплоотдачи и температуре среды между реб-

рами пренебрегаем теплоотдачей с торцов. Для наибольшего теплового потока при одинаковом весе ребер оптимальная высота ребра

$$H_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\lambda_p \delta_p}{\alpha_K}},$$

где λ_p — коэффициент теплопроводности материала ребра; δ_p — толщина ребра; α_K — коэффициент теплоотдачи.

При оптимальной высоте ребра, когда ширина зазора между ребрами δ_3 равна толщине ребра [3],

$$\alpha_K \approx \frac{0,158 \delta_3 k_p^2}{S_{\Sigma p}^2 \lambda_p},$$

где $S_{\Sigma p}$ — площадь основания оребрения. В то же время, значение α_K в зазоре зависит от ширины зазора и скорости потока между ребрами W_p . Выбрав марку кулера и задавшись мощностью W_d электродвигателя вентилятора или насоса, определим ширину оребрения:

$$B_p = \frac{1}{\Sigma \xi_m} \left(\frac{4gW_d \eta_d \eta_v}{gH_{\text{опт}} W_p^3} - \frac{\lambda_{гр} S_{\Sigma p}}{d_3} \right).$$

Здесь η_d и η_v — КПД электродвигателя и вентилятора; γ — удельный вес движущейся среды; ξ_m — коэффициент местного сопротивления; $\lambda_{гр}$ — коэффициент трения по длине; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; d_3 — эквивалентный диаметр канала между ребрами, $d_3 = 4F_p / P$, где F_p и P — площадь и периметр поперечного сечения канала. Длина оребрения $L = S_{\Sigma p} / B_p$.

Для условий вынужденной конвекции перепад температур между спаями и объемом охлаждения определяем по следующей формуле [6]:

$$\Delta t_x = \frac{\frac{\alpha I}{k} T_{\text{ср}} - \left(\frac{\alpha I}{k} \right)^2 \frac{1}{2z} - T_r + T_{\text{ср}}}{\frac{k_x}{k} + \frac{\alpha I}{k} + 1}. \quad (9)$$

Преобразовав выражение (9), получим выражение для температуры в объеме охлаждения:

$$T_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_x \left(\frac{k_x}{k} + \frac{\alpha I}{k} + 1 \right) + \left(\frac{\alpha I}{k} \right)^2 \frac{1}{2z} + T_r}{\frac{\alpha I}{k} + 1}.$$

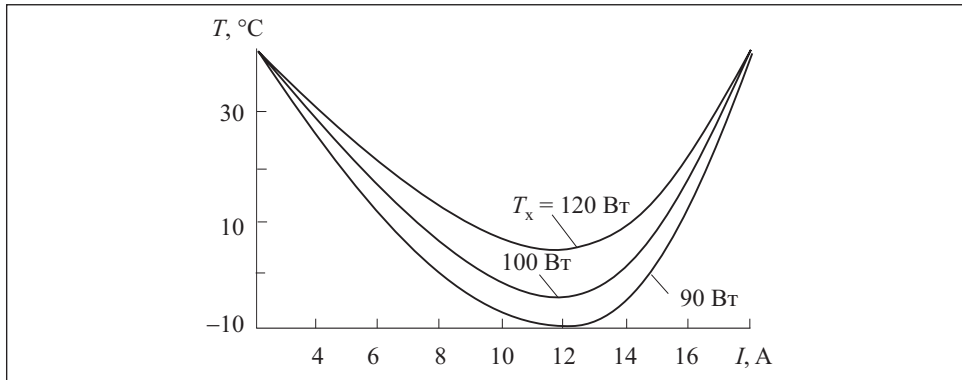


Рис. 6. Зависимость температуры холодного спая при различной холодопроизводительности при температуре горячего спая 300 °С

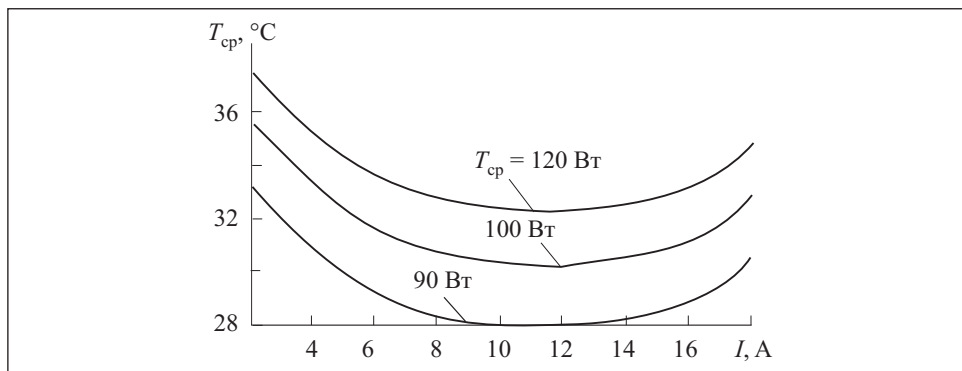


Рис. 7. Зависимость температуры в системном блоке компьютера от тока питания охладителя при различной мощности тепловыделений системы термостатирования процессора

Находим коэффициент холодопроизводительности:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} = \frac{\frac{\alpha I}{k} T_x - \left(\frac{\alpha I}{k}\right)^2 \frac{1}{2z} - T_r + T_{cp}}{\frac{\alpha I}{k} \Delta T + \left(\frac{\alpha I}{k}\right)^2 \frac{1}{z}}$$

Если ТЭБ работает на охлаждение или нагрев потока, то при небольшом изменении температур потоков достаточно точные результаты получаем при расчете по средним значениям температур.

На основе приведенных зависимостей реализован расчет полупроводниковых ТЭБ для термоэлектрического охладителя. Моделирование термоэлектрического охладителя выполнено в пакете прикладных программ

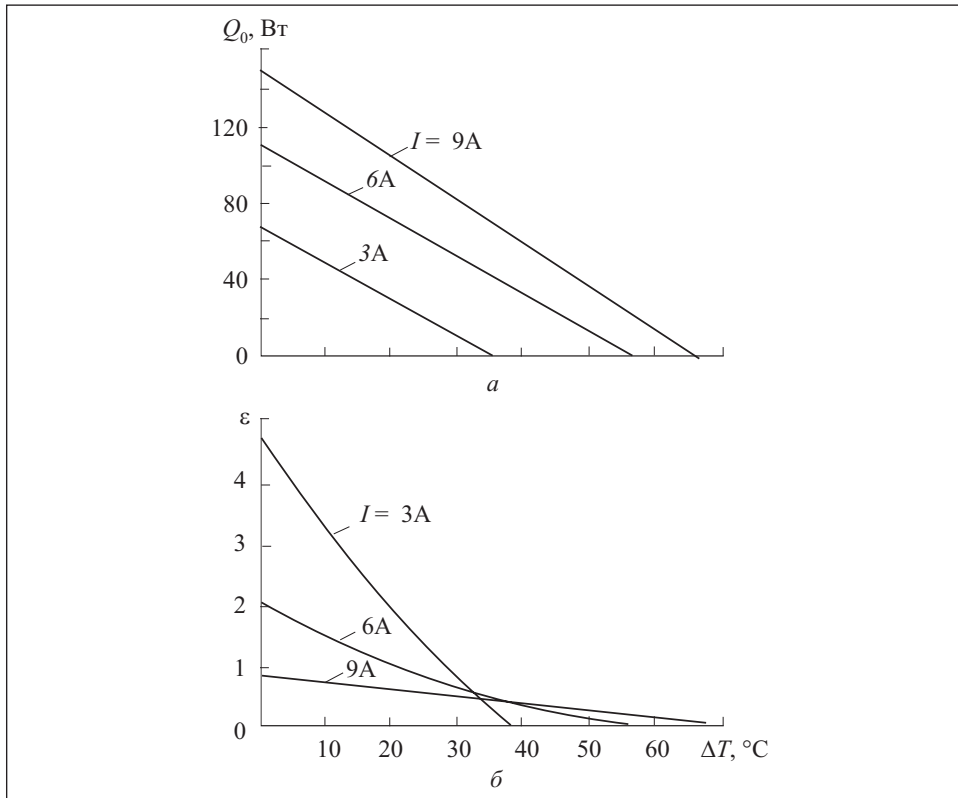


Рис. 8. Зависимость холодопроизводительности ТЭБ (а) и коэффициента холодопроизводительности (б) от перепада температур при различных токах питания

Mathcad, в качестве охлаждающих ТЭМ, входящих в состав ТЭБ, использованы стандартные высокоэффективные модули ICE-71.

На рис. 6—8 представлены результаты численного эксперимента, в котором исследованы зависимости параметров охлаждающего устройства от тока питания. Характер зависимостей температуры холодного спая от тока питания (см. рис. 6) свидетельствует о том, что при определенных значениях холодопроизводительности и температуры горячего спая можно определить оптимальный ток питания ТЭБ.

Зависимость температуры в системном блоке компьютера от тока питания термоохладителя (см. рис. 7) носит нелинейный характер. При эксплуатации термоохладителя в режиме максимальной холодопроизводительности температура в системном блоке достигает минимальных значений. Диапазон полученных значений температуры в системном блоке компьютера при изменении тока питания и напряжения, подаваемого на

термоохладитель, при различных значениях мощности тепловыделений в компьютере позволяет сделать вывод о возможности использования разработанного устройства для термостабилизации системного блока компьютера при высокой мощности тепловыделений системы термостатирования процессора.

Из рис. 8, а видно, что холодопроизводительность охладителя существенно зависит от температуры горячего спая ТЭБ. Для обеспечения эффективного охлаждения системного блока необходимо снижать температуру горячего спая термоохладителя. Поэтому для охлаждения радиатора, установленного на горячем спае, используется вентилятор, создающий воздушный поток, направленный на радиатор.

Холодопроизводительность термоохладителя зависит также от температуры на холодных спаях. Однако указанная температура в процессе эксплуатации изменяется незначительно, поэтому она незначительно влияет на работу термоэлектрической установки.

Существенного увеличения холодопроизводительности устройства можно достичь также при увеличении рабочего тока. Однако в этом случае надо иметь определенный резерв мощности, который бы обеспечил необходимое увеличение холодопроизводительности. Зависимости, позволяющие определить характер изменения Q_0 и коэффициента ε от тока, могут быть использованы для анализа характеристик регулирования ТЭУ.

На рис. 8, б представлена зависимость коэффициента ε от перепада температур на спаях охладителя при различных значениях тока питания. Как видим, при увеличении тока питания охладителя увеличивается перепад температур на спаях, но снижается значение ε .

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать практические рекомендации по использованию ТЭУ при различных условиях эксплуатации с учетом тепловых нагрузок компьютерного процессора.

Вывод. Использование ТЭУ для охлаждения и термостатирования процессора значительно улучшает температурные характеристики процессора во время работы в различных режимах, что позволяет значительно увеличить надежность и долговечность. Экспериментальные исследования термоэлектрических полупроводниковых устройств для охлаждения и термостатирования процессора подтвердили правомочность разработанных математических моделей.

Mathematical models of thermo-electric semiconductor devices for cooling the processor are developed with the use of smelting material.

1. Даналакий О. Г. Математическая модель системы термостатирования компьютерного процессора с применением плавящегося вещества // Мат. XIII Международной науч.-техн. конференции. — Киев. — 2008. — С. 80—85.
2. Алексеев В. А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. — М.: Энергия, 2004. — 326 с.
3. Войтенко Г. И., Возня Г. А. Конструктивно-унифицированный ряд термоэлектрических модулей и батарей // Сб. науч. тр. «Тепловые процессы в МГД и термоэлектрических генераторах». — Киев: Наук. думка, 2006. — 184 с.
4. Волков В. Н., Кузнецова З. Н. О применении интегральных методов к задачам плавления и затвердевания тел // Исследования по теплопроводности. — Минск: Мир, 2001. — 93 с.
5. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATHCAD 8 PRO в математике, физике и интернет. — М.: Физматгиз, 2008. — 512 с.
6. Соболев В. И., Цветков Ю. Н. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство // Холодильная техника. — 2007. — № 36. — С. 53—72.
7. Рудометов В. Е., Рудометов Е. А. РС: настройка, оптимизация и разгон. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 496 с.
8. Даналакий О. Г., Прокопенко О. О., Савчук Л. А. Устройство температурной стабилизации для микропроцессорной техники // Вестник ДГТУ. Тех. науки. — 2008. — № 5. — С. 38—39.

Поступила 20.10.09
после доработки 10.02.10

ЛЕНЮК Михаил Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные системы» Черновицкого фак-та Национального технического университета «Харьковский политехнический ин-т». В 1963 г. окончил Черновицкий госуниверситет. Область научных исследований — построение новых классов гибридных интегральных преобразований и их применение к решению краевых задач математической физики, вычисление полипараметрических несобственных интегралов и функциональных рядов.

ДАНАЛАКИЙ Олег Григорьевич, аспирант Черновицкого фак-та Национального технического университета «Харьковский политехнический ин-т». В 1993 г. окончил Севастопольский приборостроительный ин-т. Область научных исследований — электро- и теплофизические процессы в полупроводниковых термоэлектрических системах теплоотвода и математические модели устройств на их основе.