

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

2. Прокис, Дж. Цифровая связь. / Дж. Прокис, Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Скляр – М.: Вильямс, 2004.
4. Huajing, F., Ultra fast synchronized symbol timing recovery. // F.Huajing, K. Feher. Proc. of Int. Conf. on Consumer Electronics. -1995, P.156-157.
5. Феер, К. Беспроводная цифровая связь. / К. Феер Под ред. В.И. Журавлёва. -М.: Радио и связь, 2000.
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов/ Р. Лайонс. -М.: Бином-Пресс, 2006.
7. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов./А.Б. Сергиенко -СПб.: Питер, 2006.
8. Шахтарин, Б.И. Обнаружение сигналов / Б.И. Шахтарин - М.: Гелиос АРВ, 2006.

М.н.с., аспирант Василевский В.В., тел. 8-960-990-1248, e-mail: altego@omgtu.ru, Омский государственный технический университет, НИЧ (г. Омск).

УДК: 621.362:537.322

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ СЛОИСТЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ С ТЕПЛОВЫМИ ТЕРМОСИФОНАМИ

Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов

Рассмотрена математическая модель холодильной установки, выполненной на базе слоистых термоэлектрических батарей слоистой конструкции с тепловыми термосифонами. Приведены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: слоистая термоэлектрическая батарея, холодильная установка, тепловой термосифон, математическая модель, численный метод расчета, автоматизированная обработка информации

В настоящее время одной из тенденций развития термоэлектрической техники является переход к слаботочным термоэлектрическим батареям (ТЭБ), электрический ток питания которых не превышает 7-8 А. ТЭБ подобного типа строятся путем последовательного соединения большого количества термоэлементов (ТЭ) (до несколько сот штук), имеющих малую площадь поперечного сечения. Существующие слаботочные ТЭБ в случае использования их в большом количестве для конструирования достаточно мощных холодильных установок (мощностью несколько кВт) обладают недостаточной надежностью за счет роста числа ТЭ и, соответственно, паяных соединений, а также низкими термодинамическими характеристиками. Поэтому для проектирования подобных холодильных установок более целесообразным является использование сильноточных ТЭБ.

Вместе с тем при проектировании сильноточных ТЭБ на базе ТЭ классической П-образной конструкции на первое место выходит вопрос об их термомеханической надежности. В данном конструктивном исполнении ТЭ при увеличении значения тока питания, и, соответственно удельных тепловых потоков на его холодных и горячих спаях, резко возрастают термомеханические напряжения

вследствие теплового расширения (сужения) материалов, что во многом сказывается на надежности функционирования ТЭБ. В этих условиях необходимо принятие определенных конструктивных мер для снижения величины термомеханических напряжений.

В [1] для устранения механических напряжений вследствие теплового расширения (сжатия) материалов предложена слоистая ТЭБ, конструкция которой не является жесткой, вследствие чего возникающие в ней термомеханические напряжения могут быть устранены, либо значительно снижены.

В настоящей работе предлагается к рассмотрению математическая модель холодильной установки, выполненной на базе такой ТЭБ в сочетании с тепловыми термосифонами, дающими возможность дистанционно разделить источник холода и объект охлаждения. При этом задача делится на две составляющие: решение тепловой и термомеханической задачи для слоистого ТЭ и расчет теплового поля теплового термосифона.

Расчетная схема определения теплового поля в слоистом ТЭ приведена на рисунке 1. Области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины. 2 и 4 – термоэлектрический материал.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ СЛОИСТЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ С ТЕПЛОВЫМИ ТЕРМОСИФОНАМИ

Дифференциальные уравнения теплопереноса для этой схемы имеют вид:

$$\lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} + j^2 \Omega_i = C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Ω – удельное электрическое сопротивление, j – плотность электрического тока, C – объ-

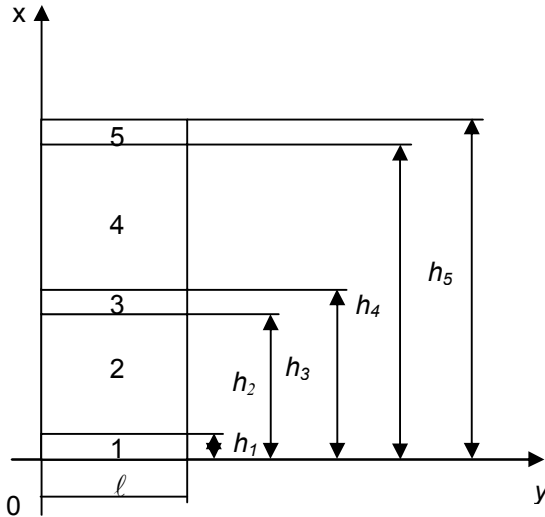


Рисунок 1- Расчетная схема слоистого ТЭ

емная теплоемкость, T – температура, t – время, $i=1, \dots, 5$.

Начальные, граничные условия и условия сопряжения записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{1,2,3,4} &= T_{cp} \text{ при } t=0, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{mc}(T_1 - T_{mc}) \text{ при } x=0, 0 < y < l, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x=h_1, 0 < y < l, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x=h_2, 0 < y < l, \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x=h_3, 0 < y < l, \\ \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x=h_4, 0 < y < l, \\ \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{mc}(T_5 - T_{mc}) \text{ при } x=h_5, 0 < y < l, \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta(T_1 - T_{cp}) \text{ при } y=0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta(T_2 - T_{cp}) \text{ при } y=0 \text{ и } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\ \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta(T_3 - T_{cp}) \text{ при } y=0 \text{ и } \ell, h_2 < x \leq h_3, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \beta(T_4 - T_{cp}) \text{ при } y=0 \text{ и } \ell, h_3 < x \leq h_4,$$

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} = \beta(T_5 - T_{cp}) \text{ при } y=0 \text{ и } \ell, h_4 < x \leq h_5,$$

где T_{cp} – температура окружающей среды, α – коэффициент термо-э.д.с., β – коэффициент теплообмена с окружающей средой, $\beta_{тс}$ – коэффициент теплообмена с системой теплосброса, $T_{тс}$ – температура системы теплосброса.

Решение системы уравнений (1) с соответствующими начальными и граничными условиями (2) выполнено с использованием численного метода конечных элементов.

Общее решение данной задачи методом конечных элементов осуществляется в следующей последовательности.

Вводится конечно-элементное представление:

$$\tilde{\varphi}(x, y, t) = \tilde{\varphi}_0(x, y, t) + \sum_{k=1}^K N_k(x, y) \varphi_k(t), \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, K,$$

где чертой сверху обозначено приближенное решение; K – суммарное число узловых точек; $\tilde{\varphi}_0(x, y, t)$ выбирается так, чтобы точно удовлетворялись начальные и граничные условия; функция $N_k(x, y)$ – пробная функция; коэффициент $\varphi_k(t)$ – неизвестны и определяются из системы уравнений, получаемых из исходного уравнения.

Каждое из исходных уравнений (1) можно записать в символьном виде

$$L(T) = 0, \quad (4)$$

Если подставить (4) в (3), то оно не будет тождественно удовлетворяться. Следовательно, можно записать

$$L(T) = R,$$

где величина R – невязка уравнения.

Для определения коэффициентов $\varphi_k(t)$ используется система уравнений Галеркина:

$$\int_D N_m(x, y) R(x, y, t) dx dy = 0, \quad m = 1, \dots, K$$

Для поиска решения стационарной задачи использованы изопараметрические элементы треугольной формы. На рисунке 2 представлены изопараметрические треугольные элементы двух типов. Приближенное решение в этом случае может быть представлено в виде:

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

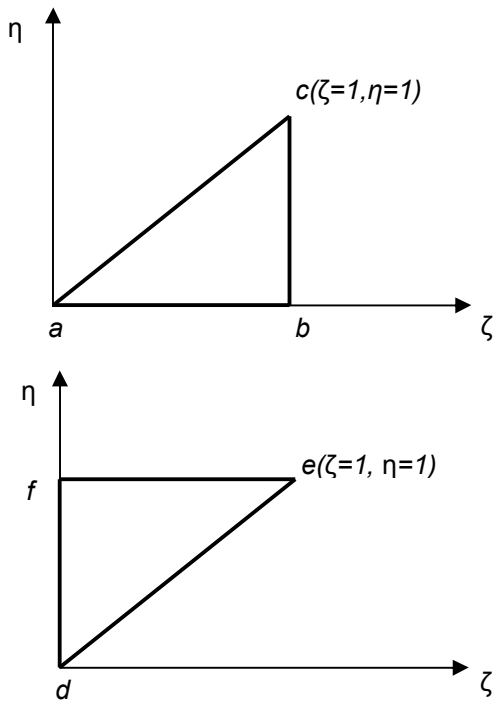


Рисунок 2 - Треугольные изопараметрические элементы двух типов

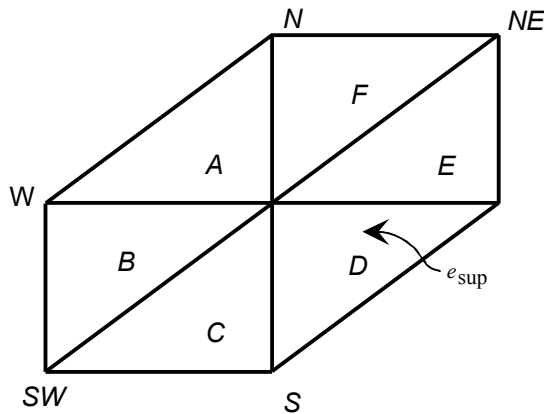


Рисунок 3 - Шесть треугольных элементов e_{SUP} , окружающих точку сетки k .

$$\tilde{\varphi}(x, y) = \varphi_a N_a(\zeta, \eta) + \varphi_b N_b(\zeta, \eta) + \varphi_c N_c(\zeta, \eta),$$

если $x, y \in e_{abc}$,

$$\tilde{\varphi}(x, y) = \varphi_d N_d(\zeta, \eta) + \varphi_e N_e(\zeta, \eta) + \varphi_f N_f(\zeta, \eta),$$

если $x, y \in e_{def}$,

где базисные функции $N_j(\zeta, \eta)$ определяются как

$$N_a(\zeta, \eta) = 1 - \zeta, \quad N_b(\zeta, \eta) = \zeta - \eta, \quad N_c(\zeta, \eta) = \eta,$$

$$N_d(\zeta, \eta) = 1 - \eta, \quad N_f(\zeta, \eta) = \eta - \zeta, \quad N_e(\zeta, \eta) = \zeta.$$

Выбирая для уменьшения невязки функцию $R(x, y)$ ортогональной ко всем базисным функциям $N_k(x, y)$, и учитывая, что они обладают локальным носителем только на элементах, расположенных вокруг точки сетки k , имеем:

$$(R, N_k) = K_A + K_B + K_C + K_D + K_E + K_F,$$

где

$$K_p = \iint_{e_p} \left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x} \frac{\partial N_k}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial y} \frac{\partial N_k}{\partial y} + 2N_k \right) dx dy,$$

$p = A, B, C, D, E, F.$

Элементы A, \dots, F , как показано на рисунке 3, окружают точку сетки k .

По данной методике осуществлен численный расчет температурного поля слоистого ТЭ.

На рисунке 4 показано распределение температуры ТЭ вдоль его продольной оси при различной величине тока питания.

Как следует из расчетных данных, при использовании ТЭ в слоистом исполнении

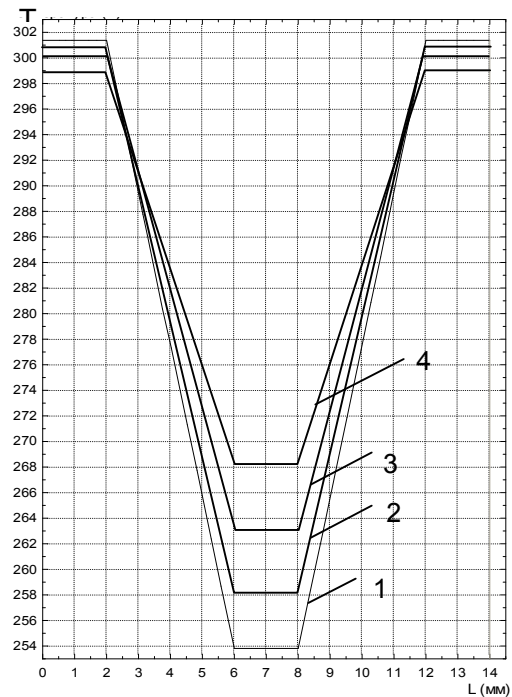


Рисунок 4 - Распределение температуры ТЭ вдоль продольной оси слоистого ТЭ при различной величине тока питания: 1 – 140 А, 2 – 120 А, 3 – 100 А, 4 – 80 А

можно получить значительный перепад температур между холодной и горячей коммута-

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ СЛОИСТЫХ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ С ТЕПЛОВЫМИ ТЕРМОСИФОНАМИ

ционной пластиной при большой величине теплового потока. Так, при перепаде температур между коммутационными пластинами в 47 К тепловой поток на холодном спае ТЭ, пропорциональный его холодопроизводительности, составляет порядка 18000 Вт/м², что соответствует при данной геометрии ТЭ току питания в 140 А. С уменьшением величины питающего электрического тока значение теплового тока на холодном спае ТЭ и перепад температур между его спаями также уменьшаются. При этом снижении тока питания ТЭ с 140 А до 80 А уменьшает перепад температур между спаями ТЭ с 47 К до 31 К, соответственно тепловой поток на холодном спае уменьшается с 18000 Вт/м² до 12000 Вт/м².

Для оценки термомеханических характеристик ТЭ слоистой конструкции был произведен расчет возникающих в нем механических напряжений и деформаций, являющихся следствием теплового расширения материалов.

Расчет производился также с использованием метода конечных элементов. При этом математическая формулировка задачи имела следующий вид.

Температурная деформация материала определяется коэффициентами линейного расширения и изменением температуры относительно температуры недеформированного состояния. Составляющая начальной термической деформации для изотропного материала (для упрощения расчетов термоэлектрический материал, из которого изготавливались ветви ТЭ, также принимался изотропным) имеет вид:

$$\{\varepsilon_0\} = (1 + \nu) \begin{Bmatrix} \gamma \\ \gamma \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T, \quad (5)$$

где ν - коэффициент Пуассона, γ - коэффициент линейного расширения материала, ΔT - перепад температуры между деформированным и недеформированным состоянием.

Соотношение между механическими напряжениями и деформациями выражается зависимостью:

$$\{\sigma\} = [D] \{ \{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\} \}, \quad (6)$$

где $[D] = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}$ - матрица

упругости, E - модуль Юнга,

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \delta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \delta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \delta_x}{\partial x} + \frac{\partial \delta_y}{\partial y} \end{Bmatrix} - \text{деформация, } \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} -$$

компоненты вектора перемещений.

Уравнения статического равновесия имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -f_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -f_y \end{cases}, \quad (7)$$

где f_x , f_y - компоненты вектора плотности объемной силы, σ_x , σ_y , τ_{xy} - нормальные и касательные механические напряжения по осям.

Решение уравнений (5)-(7) совместно с граничными условиями, определяющими наличие по всем граням системы нулевого нормального давления, распределение температуры, определяемого при решении уравнений (1)-(2), а также наличие упругих подвесов в крайних точках ТЭ, дает возможность получить двумерную картину механических напряжений, деформаций и перемещений.

Как следует из результатов численного эксперимента для указанного конструктивного исполнения ТЭ величина механических напряжений не выходит за допустимые значения. Наибольшая нагрузка приходится на места контакта коммутационных пластин с ветвями ТЭ. Здесь величина механической нагрузки достигает значения $0,9 \cdot 10^7$ Н/м² для коммутационной пластины. Наибольшие механические напряжения в термоэлектрическом веществе не превышают $0,2 \cdot 10^7$ Н/м². В случае слоистой конструкции ТЭ деформации относительно незначительны и связаны, прежде всего, с удлинением и расширением ТЭ с боков, что объясняется отсутствием его жесткой фиксации по краям. При этом максимальная величина перемещений не превышает 0,18 мм.

Для сравнения также рассмотрена картина механических напряжений при тех же условиях для классического П-образного ТЭ. В данном случае деформации достаточно велики, и при величине тока питания 120 А без применения специальных мер по снижению термомеханических нагрузок механические усилия превышают соответствующий предел прочности материала. Например,

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

для коммутационных пластин в стыке с ветвью ТЭ значение механических напряжений свыше $7 \cdot 10^8$ Н/м², что более чем в 2 раза превышает величину предела прочности меди, для термоэлектрического материала соотношение механических нагрузок и предела прочности в данном случае еще выше. При этом в соответствии с проведенными расчетами установлено, что для данной конструкции ТЭ наибольшим током питания без превышения допустимого значения механических нагрузок в системе является электрически ток, не превышающий величины 82 А, т.е. почти в 1,7 раза меньше, чем в случае использования слоистого ТЭ, для которого максимальная величина тока питания по расчетам составляет 140 А.

Таким образом, проведенные расчеты в полной мере подтверждают преимущества слоистой ТЭБ перед ТЭБ, выполненной из ТЭ П-образной формы. В первом случае можно получить более мощную ТЭБ без снижения ее термомеханических характеристик и надежности работы.

Второй составляющей математической модели является расчет теплового поля теплового термосифона.

Задача расчета построена для трех основных частей теплового термосифона – зоны испарения, конденсации и транспортной зоны. Для каждой из зон решена соответствующая задача тепло- и массообмена на основе известных уравнений, приведенных, например в [2].

Искомой величиной в расчетной модели является количество теплоты, переносимое через сечение канала теплового термосифона за единицу времени и связанное с ним значение температуры в каждой точке канала.

На рисунке 5 приведена двумерная картина распределения теплового потока по теплопроводу, выполненному в виде теплового термосифона, а на рисунке 6 рассмотрено изменение теплового потока вдоль продольной оси теплопровода. В качестве теплоносителя предполагалось использование хладагента R 124 b ($C_2H_3ClF_2$) с температурой кипения 263, 2 К. Как следует из полученных результатов, поле распределения теплового потока в тепловом сифоне практически равномерное. При этом максимальное отличие в величине теплового потока между его концами равно 900 Вт/м². Для сравнения это значение в случае использования медного теплопровода составляло 5800 кВт/м². Таким образом, следует, что при необходимости

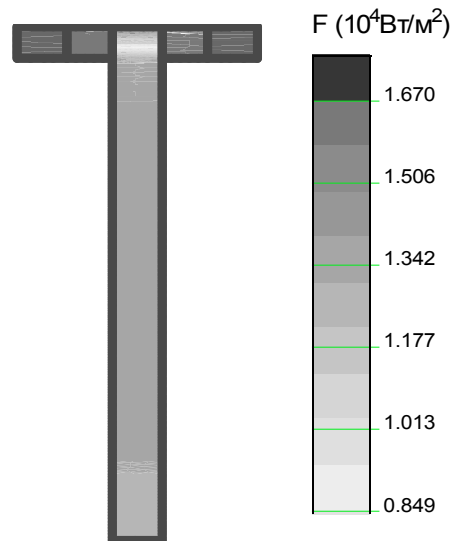


Рисунок 5 - Картина распределения тепловых потоков в слоистом ТЭ с тепловым термосифоном

сопряжения охлаждаемого элемента и ТЭБ удаленных друг от друга на достаточно большое расстояние (свыше 0,5 м), целесообразным является применение не цельнометаллического теплопровода, а теплопровода, изготовленного в виде теплового термо-

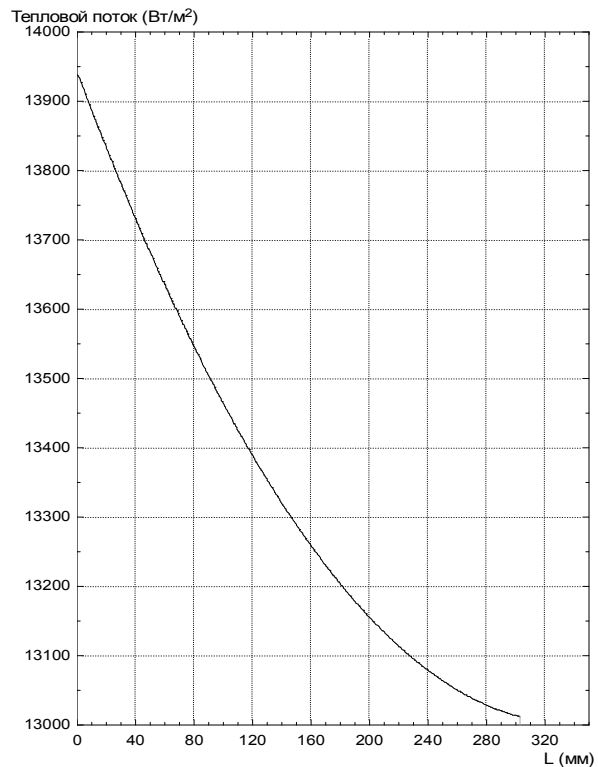


Рисунок 6 - Изменение теплового потока по длине теплового термосифона

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧРЕЗКОЖНОЙ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

сифона. Вместе с тем при небольших расстояниях между элементом охлаждения и ТЭБ эффективнее все же является использование цельнометаллических теплопроводов, имеющих более простую конструкцию и технологию изготовления.

Выводы

В данной работе представлено описание математической модели холодильной установки, выполненной на базе ТЭБ слоистой конструкции с тепловыми термосифонами. Модель разбита на две составляющие, связанные с решением тепловой и термомеханической задачи для слоистого ТЭ и расчетом теплового поля теплового термосифона. Первая составляющая включает в себя численное моделирование двумерной задачи теплопроводности и термоупругости для ТЭ, вторая - решение задачи тепло- и массообмена для теплового термосифона.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых – кандидатов и докторов наук МК-6709.2010.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2269183 Российская Федерация, МПК Н01L35. Термоэлектрическая батарея / Т.А. Исмаилов, М.Г. Вердиев, О.В. Евдулов, Н.Е. Меркухин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет». - №2003134614, заявл. 28.11.03; опубл. 27.01.06. Бюл. № 3. – 4 с.
2. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена. Пер. с англ. / Д. Ши. - М.: Мир, 1988. – 544 с.: ил.

Д.т.н., профессор Исмаилов Т.А., к.т.н., Евдулов О.В., к.т.н., Евдулов Д.В. - (8722) 62-37-15, unidgtu@yandex.ru, ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет».

УДК: 537.8; 61: 577.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЧРЕЗКОЖНОЙ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

А.Н. Лепетаев, Д.Н. Клыпин

В процессе работы проводились теоретические исследования различных беспроводных каналов передачи энергии и данных для специфических условий применения в биологических системах жизнеобеспечения деятельности человека. В результате исследований был определен тип беспроводного канала передачи энергии – индукционный; был выбран оптимальный диапазон частот передачи – 0,1...1 МГц; были созданы математическая модель системы передачи энергии и математический аппарат для расчета этой модели в виде программного обеспечения.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, расчет электромагнитных полей

Характерной чертой нынешнего тысячелетия является стремление к повышению качества и продолжительности жизни человека. Существенную роль в достижении этих целей играют успехи в разработке и использовании устройств, имплантируемых в организм человека – биоимплантатов. Спектр таких устройств в настоящее время охватывает все системы жизнедеятельности человека – от давно известных протезов и кардиостимуляторов до нейростимуляторов и микромашинных устройств для дозированной транспортировки лекарств.

Каждое из активных имплантируемых устройств, содержащих активные элементы (микросхемы и т.п.), требует электропитания. В настоящее время в имплантатах используются только невозобновляемые источники энергии – батареи, поэтому ресурс работы

имплантата ограничен. Для замены любого имплантата требуется оперативное медицинское вмешательство, что увеличивает риск инфицирования при каждой операции. Кроме того, нужно регулярно производить оценку состояния батареи имплантата, что производится только в лечебных учреждениях, с участием врача.

В настоящее время также происходит бурное развитие беспроводных технологий. В большей степени это относится к связи, но в то же время это развитие повлекло за собой увеличение интереса к бесконтактной передаче энергии для питания и зарядки «полностью беспроводных» устройств. Например, серийно выпускаются компьютерные мыши без батарей со специальным ковриком (семейство NB фирмы A4Tech), аккумуляторные зубные щетки с подзарядкой и т.п.