

Возможность повышения интенсивности теплопередачи путём использования излучения, кондукции и конвекции при высоких температурах позволит термостатировать режимы микроэлектронной аппаратуры с повышением надежности эксплуатационных характеристик.

**Библиографический список:**

1. Патент РФ №2288555. Термоэлектрический теплоотвод/Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Гафуров К.А.
2. Патент РФ №2558217 Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде электромагнитной энергии на основе диодов Ганна/Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.

**References:**

1. RF patent №2288555. Thermoelectric heat sink , Ismailov T. A., Gadzhiev M. Kh., Nevedrov T. D., Gafurov, A. K.
2. RF patent №2558217 Method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of electromagnetic energy based on Gunn diodes , Ismailov T. A., Gadzhiev M. Kh., Nevedrov T. D., T. A. Chelushkina.

УДК 621.362

*Евдулов Д.В., Сулин А.Б.*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО НА БАЗЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

*Evdulov D.V., Sulin A.B.*

**MATHEMATICAL MODEL OF THE RECTIFIER OF THE ALTERNATING VOLTAGE EXECUTED ON THE BASIS OF THE THERMOELECTRIC TRANSFORMER OF ENERGY**

*Аннотация.* В работе рассмотрена математическая модель выпрямителя переменного напряжения, построенного на базе термоэлектрического преобразователя энергии. Модель разбита на три основные части, включающие в себя расчет притока и оттока теплоты на спаи термоэлектрической структуры и расчет характеристик непосредственно термоэлектрического преобразователя. Получены графики зависимости, отражающие основные свойства термоэлектрического выпрямителя переменного напряжения.

*Ключевые слова:* выпрямитель переменного напряжения, термоэлектрический преобразователь, солнечный концентратор, воздушный теплоотвод, математическая модель.

**Abstract.** *In operation the mathematical model of the rectifier of the alternating voltage constructed on the basis of the thermoelectric transformer of energy is considered. The model is broken into three main parts including calculation of influx and outflow of warmth on seals of thermoelectric structure and calculation of characteristics directly of the thermoelectric transformer. The diagrams of dependence reflecting the main properties of the thermoelectric rectifier of alternating voltage are received.*

**Key words:** *rectifier of alternating voltage, thermoelectric transformer, solar hub, air heat sink, mathematical model.*

**Введение.** Одним из важных направлений электронной техники на сегодняшний день является проектирование эффективных систем для преобразования переменного электрического сигнала в постоянный. При этом среди существующих способов такого преобразования выделяются методы, основанные на использовании механических, электровакуумных и полупроводниковых устройств, отличающихся определенными достоинствами и недостатками, которые подробно рассмотрены в работах [1-3].

В [4] предложен способ выпрямления переменного электрического напряжения, основанный на применении термоэлектрических преобразователей энергии, отличительной особенностью которого является возможность усиления выпрямленного сигнала за счет использования энергии солнечного излучения.

Принцип работы прибора, реализующего указанный метод, состоит в преобразовании Джоулевой теплоты, выделяющейся в омической области при протекании в ней переменного электрического тока, а также теплоты за счет нагрева этой же области за счет солнечного излучения в постоянную ЭДС, генерируемую термоэлектрическим преобразователем энергии. За счет использования возобновляемой солнечной энергии характеристики такого прибора, в частности коэффициент полезного действия, во многом будут улучшены.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является разработка математической модели устройства, реализующего данный подход, и на ее основе всестороннее исследование характеристик последнего.

**Методы исследования.** В соответствии со структурной схемой прибора, его математическая модель может быть разделена на три равноценные составные части:

- расчет теплопритоков на горячие спаи термоэлектрической структуры, в частности, определение характеристик концентратора солнечной энергии;
- расчет системы отвода теплоты от холодных спаев термоэлектрической структуры;
- расчет генератора электрической энергии, построенного на основе термоэлектрического преобразователя.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.**

**Расчет теплопритоков на горячие спаи термоэлектрического преобразователя.**

Теплопритоки на горячие спаи термоэлектрического преобразователя энергии складываются из теплоты Джоуля, выделяемой в омической структуре при протекании через нее переменного электрического тока и теплоты, поступающей на термоэлектрическую структуру вследствие нагрева поверхности за счет солнечного излучения.

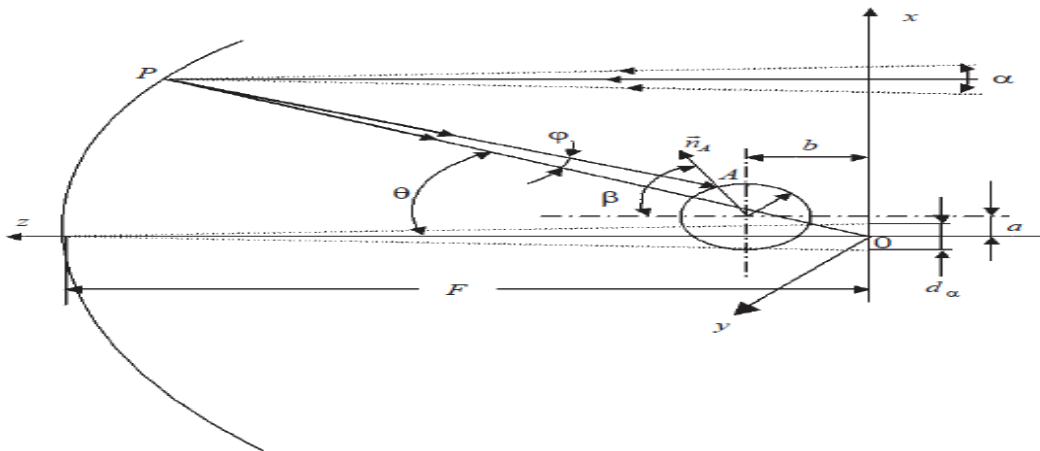
Первая составляющая может быть определена на основе закона Джоуля-Ленца по выражению:

$$Q_{Дж} = I^2 R, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление омической структуры,  $R = \rho \frac{\ell}{S}$ , где  $\rho$  - удельное сопротивление омической структуры,  $\ell$  - длина омической структуры,  $S$  – площадь поперечного сечения омической структуры,  $I$  – действующее значение тока, протекающего через омическую структуру.

Расчет теплоты, поступающей на горячие спаи термоэлектрического преобразователя за счет солнечного излучения, более сложен и зависит от типа и характеристик концентратора солнечной энергии.

В нашем случае предполагается применение параболического концентратора солнечной энергии как наиболее часто применяемого на практике в настоящее время. Схема хода лучей в нем представлена на рисунке 1. Основные соотношения, используемые для расчета, представлены в виде формул (2)-(4) [5].



**Рисунок 1** - Схематическое изображение лучей (их отражения) в параболическом концентраторе

Теплота, поглощаемая теплоприемником за счет солнечного излучения:

$$Q_n = \frac{mC_p kS_a}{3,6S_r U} \left[ 1 - e^{-\frac{S_r U}{mC_p}} \right] \left[ G_0 \rho \gamma \alpha - U \frac{S_r}{S_a} (T_n - T_{cp}) \right], \quad (2)$$

при фокусном расстоянии

$$F = D \frac{1 + \cos\theta}{4\sin\theta}$$

где  $D$  - размер раскрытия зеркала,  $\theta$  - угол раскрытия,  $m$  – масса теплоприемника,  $C_p$  – средняя теплоемкость теплоприемника,  $U$  – коэффициент теплоот-

дачи от поверхности теплоприемника в окружающую среду,  $\gamma$  - коэффициент улавливания теплоприемника,  $\rho$  - коэффициент отражения материала зеркала,  $T_n$  - температура теплоприемника,  $T_{cp}$  - температура окружающей среды,  $S_a$  - площадь незатемненной поверхности концентратора,  $S_r$  - площадь поверхности концентратора,  $G_0$  - плотность солнечного потока,  $\alpha=32^\circ$  - видимый угловой диаметр Солнца,

$$k = \frac{(\theta - \Delta\theta)}{180}, \quad (3)$$

$$\sin\left(\Delta\theta + \frac{\alpha}{2}\right) = \frac{2F}{1 + \cos\theta} \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{r}, \quad (4)$$

где  $r$  - радиус цилиндрического теплоприемника.

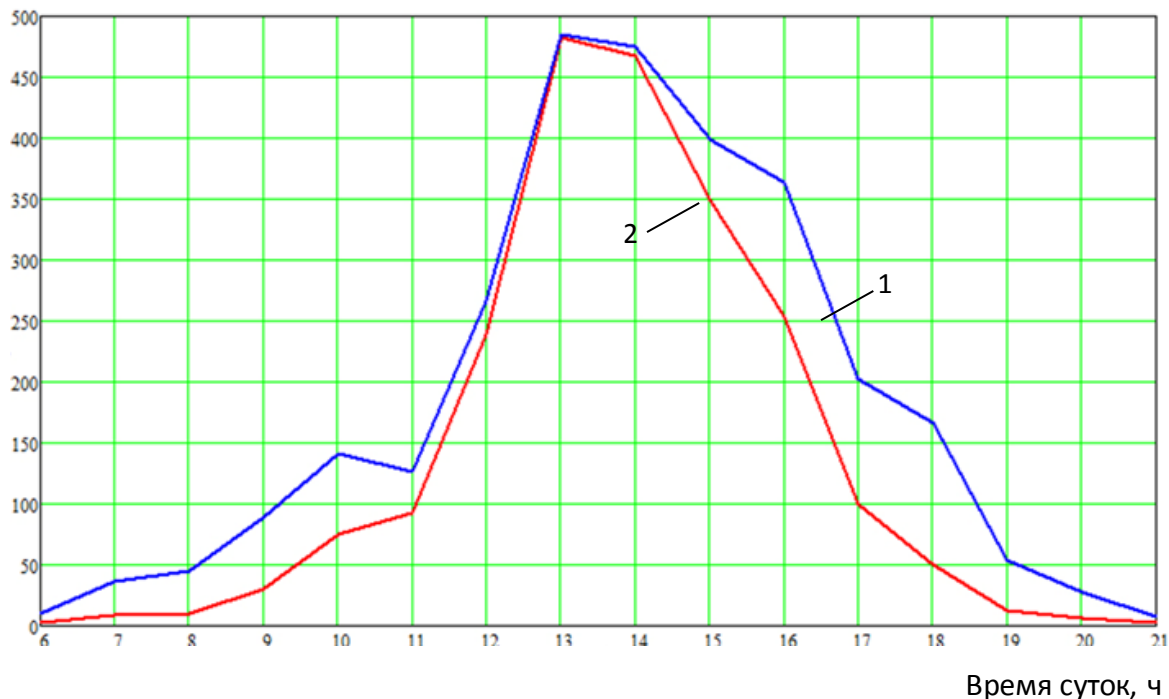
На основе расчетов получены графики зависимости изменения количества теплоты в единицу времени, поступающей на горячие спай термоэлектрической структуры, а также от действующего значения переменного электрического тока, проходящего через омическую структуру. Расчеты проводились при следующих параметрах параболического концентратора: диаметр - 0,3 м, общая площадь - 0,56 м<sup>2</sup>, эффективная площадь сбора солнечного излучения - 0,42 м<sup>2</sup>, суммарная площадь отражения - 0,47 м<sup>2</sup>, фокусное расстояние - 0,5 м, максимальная температура в точке фокуса - 278°C. Характеристики омической области принимались следующими:  $R=100$  Ом, действующее значение тока принималось равным 1 и 2 А.

На рисунке 2 показана зависимость тепловой мощности  $P$ , поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения, приведенной к 1 м<sup>2</sup> на юге (1) и в средней полосе (2) России от времени суток. С учетом нагрева за счет Джоулевой теплоты данные значения следует увеличить еще на 100 и 400 Вт для токов 1 и 2 А. Как показывают представленные зависимости, значительное расхождение в мощности, поглощаемой горячими спаями термоэлектрической структуры за счет солнечного излучения, наблюдается утром (до 11 ч.), затем примерно до 14 ч. 30 мин. данные значения отличаются незначительно (не более 20 Вт/м<sup>2</sup>), и после 15 ч. различие резко растет. В местах наибольшего расхождения данных величина разности в тепловом потоке достигает 80-100 Вт/м<sup>2</sup>. Утром (6 ч.) и вечером (21 ч.) величина тепловой мощности, поглощаемой горячими спаями термоэлектрической структуры за счет солнечного излучения близка к нулю.

На рисунке 3 представлены графики зависимости изменения тепловой мощности на горячих спаях термоэлектрической структуры, приведенной к 1 м<sup>2</sup> при фиксированном значении солнечного излучения (тепловой поток на приемнике 400 Вт/м<sup>2</sup>) от тока, протекающего через омическую структуру. Рассмотрены случаи, когда углы между нормалью к плоскости концентратора и линией падения лучей  $\alpha_n$  различны. Максимальное значение теплового потока на горячих спаях термоэлектрического преобразователя достигает 800 Вт/м<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении тока рост рассеиваемой мощности будет наблюдаться практически пропорционально второй степени силы тока.

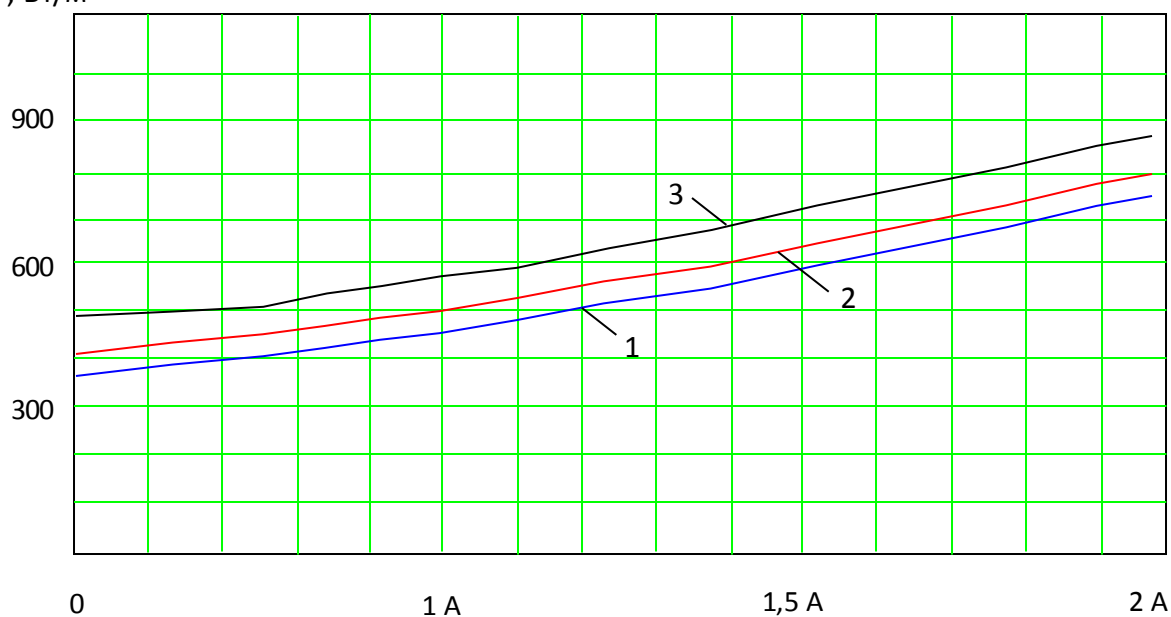
При этом с уменьшением значения  $\alpha_n$  мощность, поглощаемая горячим спаем термоэлектрической структуры, растет. Изменение угла между нормалью к плоскости концентратора и линией падения лучей изменяет поглощаемую тепловую мощность примерно на 70-75 Вт/м<sup>2</sup>.

P, Вт/м<sup>2</sup>



**Рисунок 2** - Зависимость тепловой мощности P, поглощаемой теплоприемником за счет солнечного излучения на юге (1) и средней полосе (2) России в зависимости от времени суток

P, Вт/м<sup>2</sup>



I, A

**Рисунок 3** - Зависимость изменения тепловой мощности на горячих спаях термоэлектрической структуры при фиксированном значении солнечного излучения от тока, протекающего через омическую структуру 1 -  $\alpha_n=20^\circ$ , 2 -  $\alpha_n=15^\circ$ , 3 -  $\alpha_n=5^\circ$

**Расчет системы отвода теплоты от холодных спаев термоэлектрической структуры.** Расчет системы воздушного охлаждения спаев термоэлектрической структуры сводится к нахождению значения количества теплоты, которое отводится в единицу времени системой теплоотвода и приходится на единицу площади  $q_{ст}$ , используемое в дальнейшем для стандартного расчета радиаторной системы.

Основные соотношения для определения  $q_{ст}$  представлены формулами (5)-(9). Расчет параметров радиаторной системы, состоящий в определении ее геометрических размеров, носит типовой характер и приведен, например, в [6].

Мощность, снимаемая с холодных спаев термоэлектрического преобразователя:

$$q_{ст} = \alpha_{ст} (T_p - T_{cp}) \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\alpha_{ст}$  – коэффициент теплопередачи от теплоотводящей поверхности к окружающей среде,  $T_p$  – температура радиатора,  $\varepsilon$  – коэффициент эффективности оребрения поверхности (при отсутствии оребрения  $\varepsilon = 1$ ).

$$\alpha_{ст} = \alpha_{стк} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{стк}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}},$$

где  $\alpha_{стк}$  коэффициент теплообмена за счет излучения,  $\alpha_{сти}$  – конвективный коэффициент теплообмена,  $\delta_{ст}$  – толщина стенки радиатора,  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности материала радиатора.

$$\varepsilon = \frac{th(mh_p)}{mh_p},$$

где  $m = \sqrt{\frac{\alpha_{б.п.} U_p}{\lambda_p F_p}}$ ,  $U_p$  – периметр сечения ребра;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности ребра;  $F_p$  – площадь поперечного сечения ребра;  $h_p$  – высота ребра.

Конвективный коэффициент теплообмена определяется из формулы:

$$\alpha_{стк} = \frac{Nu \lambda_{cp}}{\ell_0}, \quad (6)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;  $\lambda_{cp}$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя (окружающая среда);  $\ell_0$  – определяющий размер (длина термоэлектрической структуры).

Критерий Нуссельта при естественном воздушном теплообмене в зависимости от поверхности радиатора может быть получен в виде:

гладкая (неоробренная) поверхность

$$Nu = \begin{cases} 0,45 \text{ при } (Gr Pr) \leq 10^{-3} \\ 1,18(Gr Pr)^{0,125} \text{ при } 10^{-3} < (Gr Pr) < 10^2 \\ 0,54(Gr Pr)^{0,25} \text{ при } 10^2 < (Gr Pr) < 2 \cdot 10^7 \\ 0,135(Gr Pr)^{0,33} \text{ при } 2 \cdot 10^{-3} < (Gr Pr) \end{cases} \quad (7)$$

оробренная поверхность с вертикально расположенными ребрами

$$Nu = \begin{cases} 1,4 \left[ \sqrt{1 + 0,443 \frac{Grb}{2D}} - \left( 1 + 0,113 \frac{Grb}{2D} \right) \right] & \text{при } \frac{Grb}{2D} < 7 \\ 0,64 + 0,023 \frac{Grb}{2D} & \text{при } 7 \leq \frac{Grb}{2D} < 20 \\ 0,5 \frac{Grb}{2D} & \text{при } \frac{Grb}{2D} \geq 20 \end{cases}, \quad (8)$$

где  $D$  – длина ребра;  $b$  – расстояние между ребрами;  $Gr$  – число Грасгофа;  $Pr$  – число Прандтля.

Критерий Нуссельта при принудительном воздушном теплообмене:

$$Nu = 0,35 \left( Pe \frac{\ell}{b} \right)^{0,3} \left( Gr Pr \frac{\ell}{b} \right)^{0,18}, \quad (9)$$

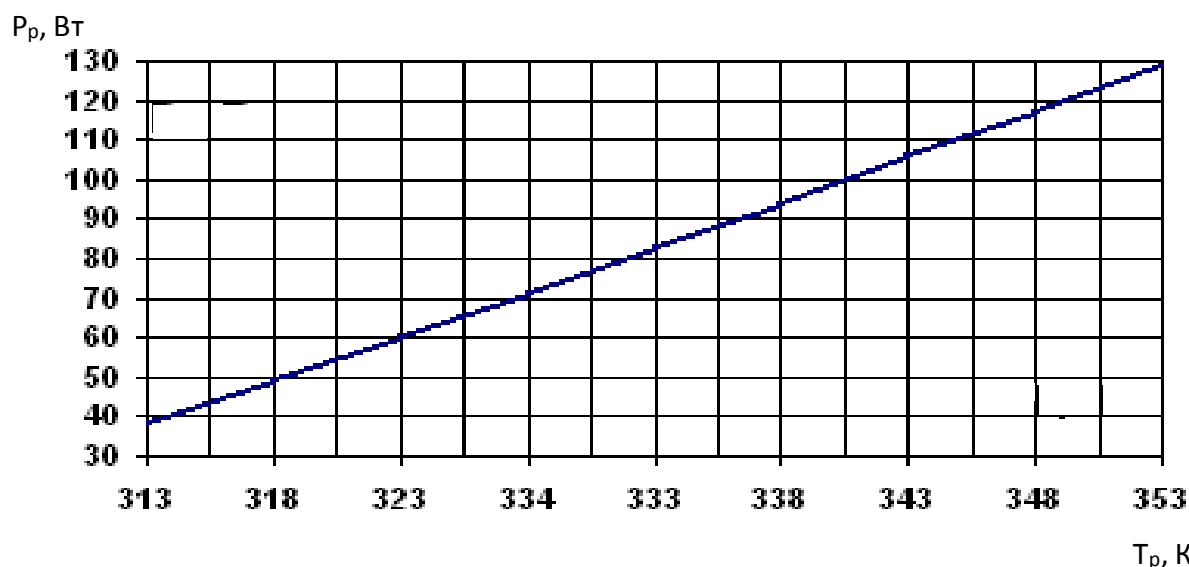
где  $Pe$  – число Пекле.

Окончательное выражение для определения  $q_{ст}$ :

$$q_{ст} = \left( \alpha_{стк} + \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} \right) (T_p - T_{ср}) \frac{th(mh_p)}{mh_p}.$$

В результате расчета получены зависимости изменения коэффициента теплоотдачи ребристого радиатора при естественной конвекции от температуры, коэффициента теплоотдачи ребристого радиатора при принудительной конвекции от скорости воздушного потока, мощности, рассеиваемой воздушным теплоотводом на основе ребристого радиатора от его температуры.

Предполагалось что материал радиатора – алюминий, длина-ширина основания – 120 мм -120 мм.



**Рисунок 4.** - Зависимость мощности, рассеиваемой воздушным радиатором, от его температуры

Согласно расчетным данным следует, что для обеспечения интенсивного отвода теплоты от холодных спаев термоэлектрической структуры вполне достаточно применение воздушного теплоотвода.

При этом очевидно, что применение принудительного воздушного охлаждения, например, посредством вентиляторного агрегата, является более выгодным с точки зрения уровня отвода теплоты.

Так, при температуре радиатора 353 К количество снимаемой теплоты в единицу времени составляет 130 Вт (рисунок 4).

Однако применение принудительного теплоотвода связано с дополнительными затратами на использование и эксплуатацию вентиляторного агрегата, имеющего также ограниченный срок службы.

### **Расчет термоэлектрического генератора.**

По найденным значениям теплоты, подводимой и отводимой от спаев термоэлектрического преобразователя, могут быть определены значения генерируемой им ЭДС, а также величина тока, протекающего на нагрузке, напряжения и полезной мощности.

Соотношения для их расчета представлены в виде выражений (10)-(13).

Величина термо-ЭДС определяется из выражения:

$$E_{ТЭП} = n(\alpha_p + \alpha_n) \Delta T, \quad (10)$$

где  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – абсолютные величины коэффициентов термо-ЭДС ветвей р- и n-типов термоэлектрического преобразователя энергии соответственно,  $\Delta T$  - перепад температур между горячими и холодными спаями термоэлектрического преобразователя энергии,  $n$  - количество термоэлементов в термоэлектрическом преобразователе энергии.

Ток на нагрузке:

$$I = \frac{E_{ТЭП}}{(1+M)r_{ТЭ}}. \quad (11)$$

Рабочее напряжение на нагрузке:

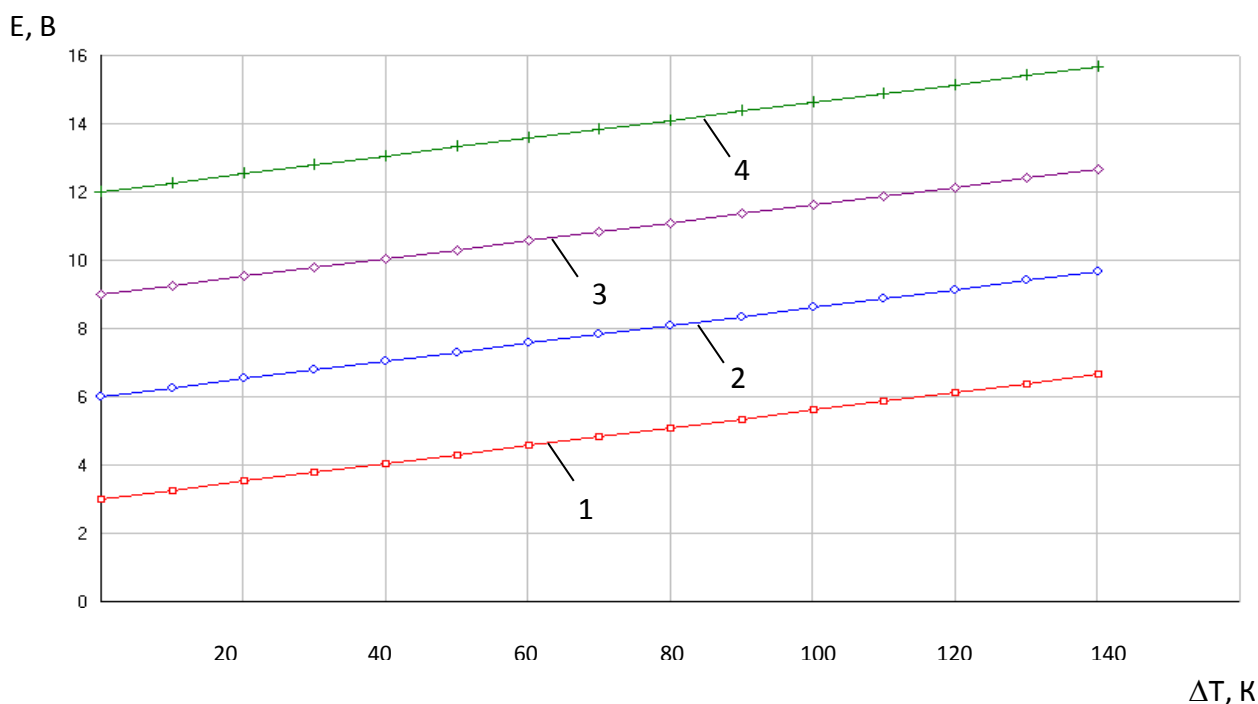
$$U = \frac{M}{1+M} E_{ТЭП}. \quad (12)$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая термоэлектрическим преобразователем энергии:

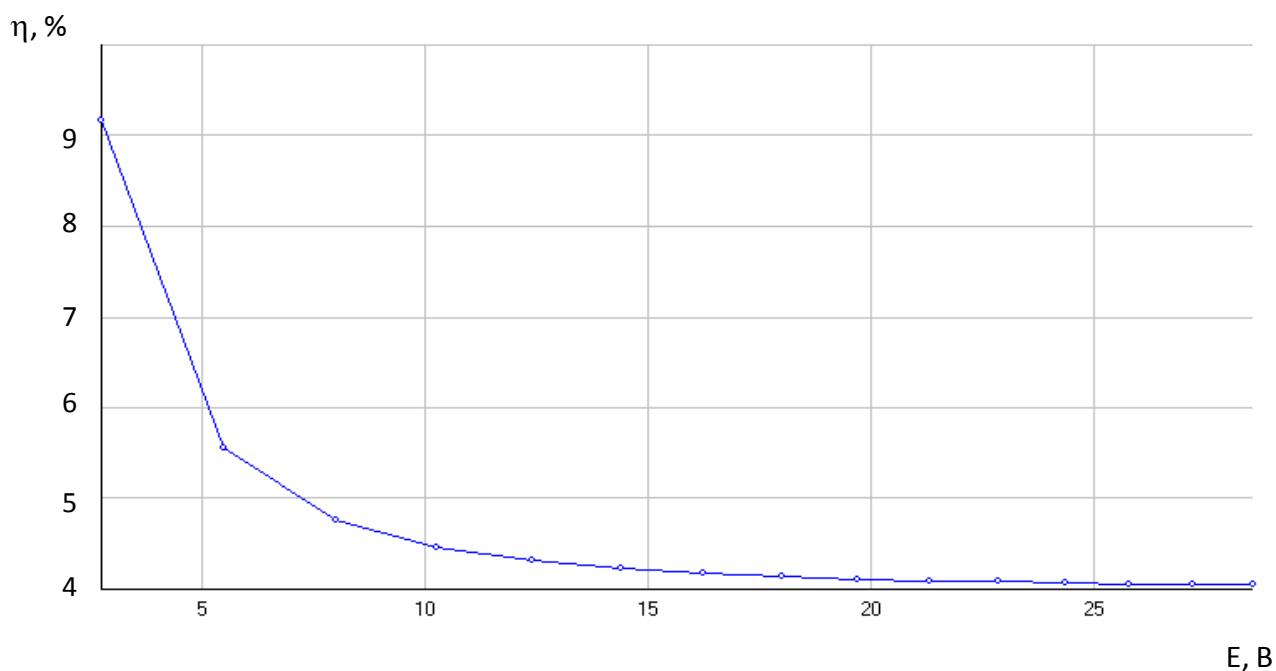
$$W_{ТЭП} = UI = \frac{M}{(1+M)^2} \frac{E_{ТЭП}^2}{r_{ТЭ}} = \frac{M}{(1+M)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+m)}. \quad (13)$$

Здесь  $r_{ТЭ} = r_p + r_n + r_k$  - сопротивление термоэлемента,  $r_p$  и  $r_n$  - сопротивления ветвей р- и n-типов соответственно,  $r_k$  - сопротивление коммутационных элементов,  $M = \frac{R}{r_{ТЭ}}$ ,  $m = \frac{r_k}{r_p + r_n}$ ,  $r_{ТЭ} = \left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+m)$ ,  $\rho_p$  и  $\rho_n$  - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и n-типов;  $\ell$  - длина ветвей;  $S_p$  и  $S_n$  - площади поперечных сечений ветвей, соответственно р- и n-типов.





**Рисунок 5** - Зависимость изменения постоянной ЭДС выпрямителя напряжения от перепада температур между спаями термоэлектрической структуры при различных значениях действующего значения переменного тока 1- 1 А, 2 – 1,5 А, 3- 2 А, 4 – 2,5 А



**Рисунок 6** - Зависимость изменения КПД выпрямителя напряжения от генерируемой ЭДС

Основываясь на найденные ранее значения подводимой и отводимой мощности к спаям термоэлектрического генератора, а также предполагая следующие параметры термоэлектрического материала: теплопроводность - 1,5 Вт/(м·К),

удельное электрическое сопротивление -  $10,65 \cdot 10^{-6}$  Ом·м., теплоемкость - 123 Дж/(кг·К), коэффициент термо-ЭДС -  $0,2 \cdot 10^{-3}$  В/К, и размеры ветвей термоэлементов - 2-2-2 мм – на рисунках 5-6 приведены основные характеристики исследуемого прибора.

**Вывод.** Согласно представленным данным величина ЭДС растет с увеличением перепада температур между спаями термоэлектрического преобразователя и при расчетных условиях может достигать порядка 16 В при перепаде температур 140 К. При этом коэффициент полезного действия устройства уменьшается с ростом ЭДС. При значениях последней, лежащих в пределах 10-15 В, величина КПД прибора составляет 3-1 %. Поэтому дальнейшей задачей разработчиков будет являться разработка методов по увеличению значений  $\eta$ , что напрямую связано с уменьшением тепловых потерь при эксплуатации прибора, созданием термоэлектрических материалов с улучшенными свойствами, а также совершенствованием методов и средств преобразования солнечной энергии в тепловую.

### **Библиографический список:**

1. Артамонов В.В. Маломощные выпрямители М.: Связь, 1970. – 146 с.
2. Алексеев О.В., Китаев В.Е., Шихин А.Я. Электрические устройства. М.: Энергоиздат, 2000. – 314 с.
3. Джонс М.Х., Электроника - практический курс. Москва: Техносфера. - 2006.
4. Патент РФ на изобретение № 2525171 Выпрямитель переменного напряжения // Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., опубл. 10.08.2014, Бюл. №22.
5. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 2002. – 304 с.
6. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005. – 520 с.

### **References:**

1. Artamonov V. V. low-power rectifiers M.: Communication, 1970. – 146 p.
2. Alekseev O. V., Kitaev V. E., Shahin, A. Y. Electrical devices. M.: Energoizdat, 2000. – 314 p.
3. Jones M. H., Electronics - practical course. Moscow: Tekhnosfera. - 2006.
4. RF patent for the invention № 2525171 Rectifier of alternating voltage , Ismailov T. A., Avdulov O. V., D. V. Avdulov, publ. 10.08.2014, bull. No. 22.
5. Rauschenbach G. Handbook on the design of solar panels. M.: Energoatomizdat, 2002. – 304 p.
6. Ismailov T. A. Semiconductor Thermoelectric device and in heat transfer densifier. SPb.: Polytechnic, 2005. – 520 p.