



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

маг. инж. Калоян Иванов Иванов

**РАЗРАБОТВАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ГЕНЕРАТОРИ НА ОСНОВАТА НА
ЕЛЕМЕНТИ НА ПЕЛТИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: **5. Технически науки.**

Професионално направление: **5.2. Електротехника,
електроника и автоматика.**

Докторска програма: „Елементи и устройства на
автоматиката и изчислителната техника”

Научни ръководители: **проф. д-р инж. Анатолий Трифонов Александров
доц. д-р инж. Ивайло Райчев Беловски**

Габрово, 2021 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

маг. инж. Калоян Иванов Иванов

**РАЗРАБОТВАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ И ПРИЛОЖЕНИЕ НА
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧЕСКИ ГЕНЕРАТОРИ НА ОСНОВАТА НА
ЕЛЕМЕНТИ НА ПЕЛТИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: **5. Технически науки.**

Професионално направление: **5.2. Електротехника,
електроника и автоматика.**

Докторска програма: **„Елементи и устройства на
автоматиката и изчислителната техника”**

Научни ръководители: **проф. д-р инж. Анатолий Трифонов Александров
доц. д-р инж. Ивайло Райчев Беловски**

Рецензенти: **акад. проф. д-тн инж. Чавдар Станоев Руменин
проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев**

Габрово, 2021 г.

Дисертационният труд съдържа 5 глави, изложени в 146 страници, в които са включени 76 формули, 91 фигури и графики, 20 таблици и 20 приложения. Приложенията са изложени в 66 страници, в които са включени 17 формули, 43 фигури и графики и 21 таблици. Списъкът на литературните източници е съставен от 231 заглавия, от които 197 са на латиница.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра “Електроника” при Технически университет – Габрово, състояло се на 10.02.2021 г., завършило с положително решение за готовността за защита. Защитата на дисертационния труд ще се състои на 26.04.2021 г. от 14 часа в заседателна зала на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на катедра “Електроника” при Технически университет – Габрово.

Номерата на фигурите и таблиците в автореферата е същата, както в дисертационния труд.

Благодарности: Искрено съм признателен, най-вече на научните си ръководители – проф. д-р Анатолий Александров и доц. д-р Ивайло Беловски, които освен подкрепата, която ми оказаха, ми предадоха ценни знания и опит. Високо оценявам и свободата на изследванията, която ми дадоха по време на съвместна ни работа. Изказвам благодарности към останалите колеги, с които работих и ще продължавам да работя. Признателен съм и на моите близки за подкрепата и разбирането, което ми оказаха по време на работата над дисертацията.

*“Една свещ не губи нищо от светлината си, ако запали друга свещ.”
– Мевляна, XIII век.*

Автор: Калоян Иванов Иванов
E-mail: kaloqn_ivanov_93@abv.bg

Заглавие: Разработване, изследване и приложение на термоелектрически генератори на основата на елементи на Пелтие.

Тираж: 20 броя

Място на отпечатване: ТУ – Габрово

Приети означения

ΔT – Температурна разлика между горещата и студентата страна ($\Delta T = T_1 - T_2$), [$^{\circ}C$];

T_1 – Температура на горещата/студентата страна на термоелемент, [$^{\circ}C$];

T_2 – Температура на срещуположната страна на термоелемент, [$^{\circ}C$];

E – Термо-електродвижещо напрежение (е.д.н.), [V];

P – Полупроводник с дупчеста проводимост;

N – Полупроводник с електронна проводимост, [-];

I – Електрически ток, [A];

t – Период от време, [s];

Q_0 – Топлинна енергия, отнета от охлаждаеният обект (термоелектрически хладилник), [W];

Q_1 – Топлина, подадена към термоелемента (генераторен режим), [W];

Q_2 – Топлина, отделена от термоелемента в режим на генерация на или охлаждане, [W];

Q_3 – Топлинна енергия, отделена от термоелемента (термоелектрически нагревател), [W];

Q_4 – Погълната топлина от термоелемента (термоелектрически нагревател), [W];

W – Генерирана (генераторен режим) или консумирана (от ТЕР) електрическа енергия, [W];

$\alpha_1, \alpha_2 (\alpha_n, \alpha_p)$ – Коефициенти на термо-е.д.н. (коефициент на Зеебек), [$\mu V/K$];

Q_1^I, Q_1^{II} – Входящи топлинни потоци, [W];

Q_2^I, Q_2^{II} – Изходящи топлинни потоци, [W];

l – Височина на клоновете на термоелемент, [mm];

S_1, S_2 – Площи на напречните сечения на клоновете на термоелемент, [mm^2];

η – Коефициент на полезно действие на термоелемент (К.П.Д.), [%];

K – Коефициент на топлопроводимост, [$W/(m.K)$];

ρ – Специфично съпротивление, [$\Omega.m$];

Z_0, Z – Качествен фактор на термоелемент, срещан и като *Figure of merit* – zT , [-];

T_h – Топлопоглещаща повърхност, [m^2];

T_c – Топлоотделящата повърхност, [m^2];

σ – Коефициент на електропроводимост, [S/m];

Q_w – Топлинна мощност, отделена от горещата страна на термоелемент, [W];

Q_N – Разсеяна топлина от термоелектрическата батерия, [W];

P – Топлинна мощност, разсейвана от радиатора, [W];

α – Коефициент на Зеебек (коефициент на термо-е.д.н.), [$\mu V/K$];

R_{int} – Вътрешното съпротивление на модула, [Ω];

R_{out} – Съпротивление на товара, [Ω];

Q – Топлинен поток през термоелемента, [W/m^2];

T_{source} – Температура на топлинния източник, захранващ ТЕГ с термална енергия, [$^{\circ}C$];

T_{hot}, T_{cold} – Температури съответно на горещата и студентата страна на ТЕГ, [$^{\circ}C$];

ΔT_{max} – Максимално допустима температурна разлика, [$^{\circ}C$];

T^{Hot} – Термодвойка за измерване на температурата от горещата страна на генератора, [-];

T^{Cold} – Термодвойка за измерване на температурата студентата страна на генератора, [-];

I_k – Ток на късо съединение, [A];

α – Коефициент на термо-електродвижещо напрежение на генераторния модул, [$mV/^{\circ}C$];

P – Променливо товарно съпротивление (реостат), [Ω];

$U_{np.x}$ – Напрежение на празен ход, [V];

r_0 – Вътрешно съпротивление на ТЕГ, [Ω].

P_{max} – Максимална генерирана електрическа мощност, [W];
 t – Време, [s];
 W – Топлинен поток, [W/m²];
 T_{core} – Температура на тялото, [°C];
 T_{air} – Температура на околният атмосферен въздух, [°C];
 S – Сечение на ТЕГ, [mm²];
 l – Дебелина (височина) на ТЕГ модульът, [mm];
 dt – Интервал от време, [s];
 T_{skin} – Температурата на кожата (епидермиса) на човек, [°C];
 T_{case} – Температурата на касата (корпуса) на часовника, [°C];
 $X_{експ.}$ – Стойности, получени по експериментален път, [V];
 $X_{сим.}$ – Стойности, получени от проведената симулация, [V];
 N – Брой включени термоелементи от модулите на Пелтие, [-];

M – Брой на опитите, [-];
 \hat{U} – Стойност, предсказана чрез регресионния модел, [V];
 α – Значимост на регресионните коефициенти;
 \hat{F} – Емпирична стойност на критерия на Фишер, [-];
 S_R^2 – Дисперсия на случайната грешка, [-];
 $S_{ост}^2$ – Остатъчната оценка на дисперсията;
 $F_{(\alpha, v_1, v_2)}$ – Квантил на Фишер, [-];
 v_1, v_2 – Брой степени на свобода, [-];
 \hat{R}^2 – Коефициента на детерминация, [-];
 p – Входен вектор, [-];
 t – Целева стойност, [-];
 R – Стойност на входния вектор p , [-];
 W – Теглова матрица, [-];
 b – Отклонение, [-];
 F – Функция за активиране, [-];
 a – Изход на слоя, [-].

Приети съкращения

е.д.н. – Електродвижещо напрежение;
 ТЕГ – Термоелектрически генератор;
 ТЕХ – Термоелектрически хладилник;
 ТЕБ – Термоелектрическа батерия;
 К.П.Д. – Коефициент на полезно действие;
 ТЕМ – Термоелектрически модул;
 ТЕЕ – Термоелектрически елемент;
 ТПП – Термопроводяща паста;
 СТЕ – Коефициент на топлинно разширяване на материала;
 РТГ – Радиоизотопен термоелектрически генератор;
 ДВГ – Двигател с вътрешно горене;

г.р.м. – Честота на въртене на ДВГ (обороты за минута);
 ТЕС – Термоелектрическа система;
 LED – Полупроводников светодиод, състоящ се от P-N преход (Light-emitting diode);
 ММ – Математическо моделиране;
 IoT – „Интернет на нещата“ (Internet of things);
 ТД – Термодвойка (P-N преход);
 НМ – Невронна мрежа;
 ИНМ – Изкуствена невронна мрежа;
 DC – Постоянен ток (Direct Current);
 DC/DC – Постояннотоков преобразувател;
 ИС – Интегрална схема.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Неоспорим факт е, че антропогенната дейност е неминуемо свързана с отделянето на топлина. Особено след индустриалната революция, при всяка човешка дейност – добиване и преработка на суровини, употреба на транспортни средства с конвенционални двигатели, производството на различни изделия и стоки, в околната среда се отделят значителни по обем количества топлина. В огромна част от случаите тази топлина не се оползотворява. Количествените оценки за отпадна топлина от промишлеността възлизат на около 60%. Оползотворяването на отпадна топлина е важен фактор в повишаването на енергийната ефективност за всякакъв вид системи. Пропускането на възможността за целесъобразно използване на отделената топлина, освен до материални загуби, води и до негативни климатични промени.

Трайно решение за превръщането на отделената топлина в електричество е използването на термоелектрически преобразуватели.

Термоелектрическото преобразуване на енергия, като метод за пряко трансформиране на температурна разлика в електрическа енергия, се основава на ефекти, възникващи в твърдите тела – ефект на Зеебек, ефект на Томпсън, ефект на Джаул и др. Уникалните свойства на термоелектрическите източници на енергия, като отсъствие на движещи се части, възможност за използване на нископотенциална топлинна енергия, пълна екологична чистота и безшумна работа, обуславят неоспоримите предимства при използване на термоелектрическите генератори в качеството им на автономни източници на енергия.

Термоелектрическото преобразуване, при което температурна разлика се трансформира директно в електрическа енергия, се основава на ефекта на Зеебек. Същността на това явление е, че при наличието на температурна разлика между два различни метала или полупроводника, споени в единия им край, между свободните им краища се създава термоелектродвижещо напрежение. Това предизвиква протичането на постоянен ток в контура при свързване на консуматор.

От началото на века се наблюдава нарастващ интерес към термоелектрическите генератори. Изследванията и разработването на нови термоелектрически материали [109, 152, 160, 181, 196, 197, 202, 203] дават основание в близко бъдеще да се очаква съществено увеличаване на ефективността на термоелектрическите елементи. Несъмнено, възроденият интерес към термоелектричеството е свързан и с екологичните проблеми, произтичащи от използването на традиционните методи за производство на електроенергия – отделяне на вредни емисии, замърсяване на околната среда, парниковия ефект и др. Термоелектрическите генератори са абсолютно безопасни за околната среда. При тях липсват подвижни и износващи се елементи, което води до безшумна работа, отсъствие на каквито и да са вибрации и възможност за стабилна и продължителна работа.

Термоелектрическите преобразуватели на енергия имат и някои други характерни предимства, като:

- изключително висока надеждност и компактност;

- много дълъг експлоатационен срок (обикновено над 20 години);
- екологичност и много по-ниска химическа активност, за разлика от акумулаторните батерии;
- подходящи за отдалечени приложения на места, където липсва електричество;
- независимост на параметрите на термоелектрическите модули от позицията и ориентацията им в пространството;
- липса на необходимост от периодично техническо обслужване;
- способни са да работят при високи температури.

Целта и задачите на настоящата дисертация са свързани с комплексното и детайлно изследване на параметрите и характеристиките на термоелектрическите генератори и с търсене на възможности за тяхното оптимизиране чрез моделиране и симулации, разработка на високоефективни термоелектрически системи за производство на електроенергия от различни източници на топлина и адаптирането им към конкретни приложения за бита и промишлеността.

Научна новост

Синтезирани, реализирани и изследвани са широк спектър термоелектрически генератори на базата на елементи на Пелтие, оползотворяващи отпадна топлина от различни промишлени и естествени източници в електрическа мощност.

Приложимост

Поради уникалните си предимства термоелектрическите генератори имат всички предпоставки да изместят батериите и да захранват автономно редица устройства, машини и сензори. Те имат потенциала да увеличат ефективността на промишлени и транспортни системи, като едновременно с това намалят и приноса им към глобалното затопляне.

Методи за изследване

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените задачи са: теоретичен анализ, експериментални изследвания, модерна измервателна апаратура, позволяваща връзка с персонален компютър, моделиране и симулационни изследвания.

Апробация на дисертационния труд

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на следните четири международни научни конференции:

1. 16th Conference on Electrical Machines, Drivers and Power Systems (ELMA) 6 – 8 June 2019, Varna, Bulgaria
2. II International conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech) 10 – 11 October 2019, Sofia, Bulgaria
3. 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA) 3 – 6 June 2020, Bourgas, Bulgaria
4. 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) 12 – 14 November 2020, Ruse, Bulgaria

Публикуване

По темата на дисертацията са публикувани 6 научни статии на международни научни конференции в България, индексирани в Scopus.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 5 глави, изложени в 146 страници, в които са включени 76 формули, 91 фигури и графики, 20 таблици и 20 приложения. Приложенията са изложени в 66 страници, в които са включени 17 формули, 43 фигури и графики и 21 таблици. Списъкът на литературните източници е съставен от 231 заглавия, от които 197 са на латиница.

КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава I – Актуално състояние на термоелектрическите преобразуватели на енергия

§1.1. Термоелектрически ефекти. Устройство на термоелектрическите преобразуватели на енергия.

Термоелектрически ефекти са: ефект на Зеебек; ефект на Пелтие; ефект на Томпсън; ефект на Еттингсхаузен; ефект на Нернст; ефект на Риги – Людек.

Ефектът на Зеебек се състои в директно преобразуване на температурни разлики ΔT в електрическа мощност [24, 54, 172]. Този ефект е открит от немско-естонския физик Томас Зеебек през 1821г. Той открива, че между двата края на метална пръчка се появява напрежение, когато в нея съществува температурна разлика ΔT .

Ефектът на Зеебек се изразява в това, че ако в една разединена електрическа верига, състояща се от два разнородни проводника (фиг. 1.1), на единия от контактите се поддържа температура T_1 , а на другия – температура T_2 , то, при условие, че $T_1 > T_2$, в краищата на веригата възниква термо-електродвижещо напрежение – E [3, 31]. При затваряне на електрическата верига през нея протича електрически ток.

§1.2. Конструкция и принцип на действие на термоелектрическите преобразуватели на енергия.

В зависимост от използваните термоелектрически ефекти, термоелектрическите преобразуватели намират практическо приложение като:

- Термоелектрически генератори;
- Термоелектрически хладилници;
- Термоелектрически нагреватели.

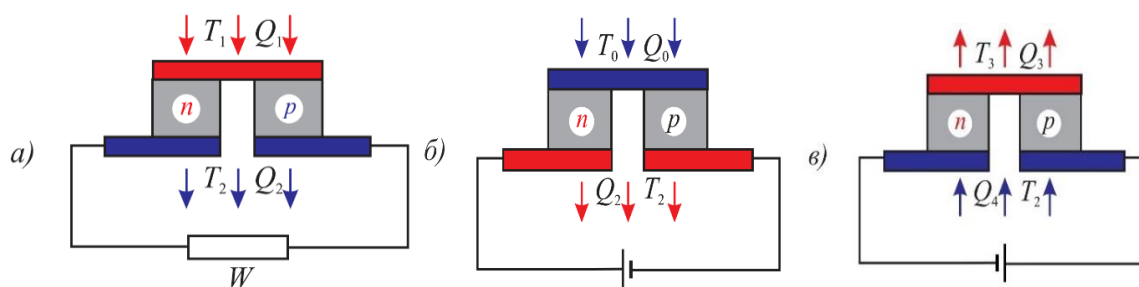
Термоелектрическите генератори работят на принципа на ефекта на Зеебек, докато работата на термоелектрическите хладилници и нагреватели се базира на ефекта на Пелтие. Най-общо казано:

- Елементи на Зеебек са всички, които генерират електро-движещо напрежение при въздействие на температурна разлика ΔT върху страните на елемента;
- Елементи на Пелтие са всички, които създават температурна разлика ΔT при протичане на електрически ток през тях.

Основните направления, в които намират приложение термоелектрическите елементи, са три. Първото е за преобразуване на топлинна енергия в електрическа, второто – за термоелектрическо охлаждане и третото – за термоелектрическо загряване.

Моделите на термоелементите се използват за описание на техните основни режими на работа, съответно: генерация на електродвижещо напрежение, термоелектрическо охлаждане и термоелектрическо загряване.

На фиг. 1.6. са представени три модела на термоелементи, работещи в различни режими.



Фиг. 1.6. Модели на термоелектрически елементи:

- a) за генерация на термоелектричество (термоелектрически генератори);
- б) за термоелектрическо охлаждане (термоелектрически хладилници);
- в) за термоелектрическо нагряване (термоелектрически нагреватели).

§1.3. Режими на работа на термоелектрическите елементи

Основните режими на работа на термоелектрическите елементи са генериране на термо-електродвижещо напрежение, хладопроизводство или нагряване.

1.3.1. Режим на генериране на термоелектродвижещо напрежение (термо е.д.н.)

Схемата на термоелектрически елемент, работещ в генераторен режим, е представена на фиг. 1.8. Ако контактите на двата материала се намират при различни температури – T_1 и T_2 , то във веригата протича термоелектрически ток [3, 13, 40, 41]. В разединената верига възниква термо-електродвижещо напрежение – E :

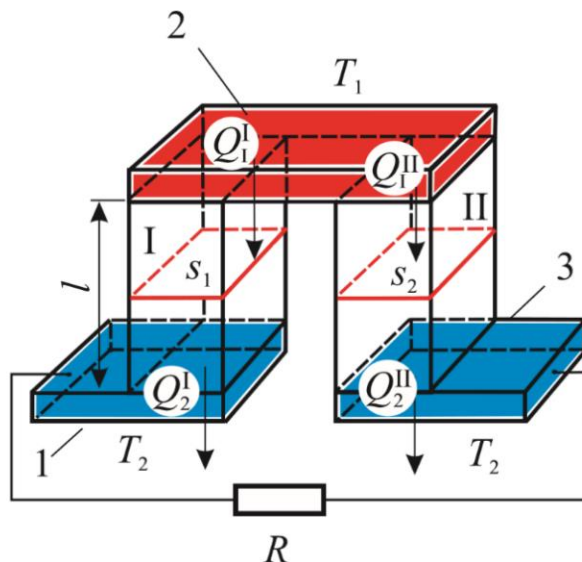
$$E = \int_{T_2}^{T_1} [\alpha_1(T) - \alpha_2(T)]dT, \quad (1.4)$$

където α_1, α_2 – коефициенти на термо-електродвижещо напрежение на материали 1 и 2. Ако α_1, α_2 зависят несъществено от температурата, то:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 - T_2). \quad (1.5)$$

Ако термоелектрическата верига съдържа няколко последователно включени термодвойки, то общото термо-електродвижещо напрежение се определя като сума от последователно включените източници на електродвижещо напрежение.

При термоелектрическите елементи, чиито клонове са изградени от полупроводници с различен тип проводимост – P и N-тип, свързани в единия край с метален мост (фиг. 1.8), металните контакти 1, 2 и 3, поставени при еднакви температурни условия не оказват влияние върху сумарното електродвижещо напрежение.

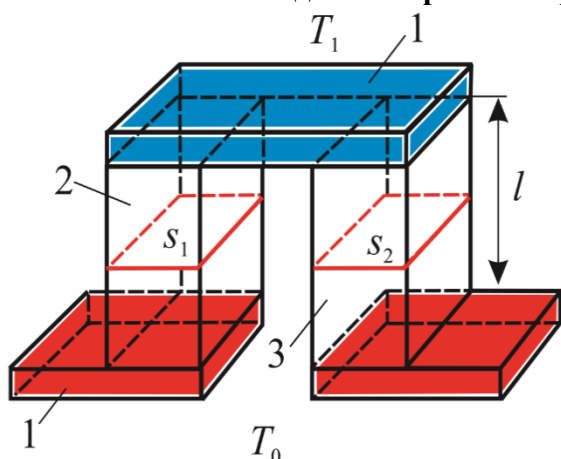


Фиг. 1.8. Термодинамичен модел на термодвойка с активни клонове:

1, 2, 3 – комутационни метални пластини; Q_1^I, Q_1^{II} – входящи топлинни потоци; Q_2^I, Q_2^{II} – изходящи топлинни потоци; T_1, T_2 – температури, съответно на горещата и студената страна; R – външен електрически товар.

Коефициентът на полезно действие на термоелемента η се определя от закона за съхранение на енергията чрез отчитане на топлинния поток, протичащ през термоелемента, и на електрическия ток I , протичащ през външен товар R .

1.3.6. Режим на охлаждане – термоелектрически хладилник (ТЕХ)



Фиг. 1.14. Термоелектрически хладилник:

1 – комутационни пластини; 2, 3 – полупроводници с N и P-тип проводимост.

Термоелектрическите преобразуватели, използващи ефекта на Пелтие, се наричат ТЕХ. Те се състоят от два клона полупроводници с различен тип проводимост – N и P-тип с напречно сечение S_1, S_2 и дължина l (фиг. 1.14). Ако през един такъв термоелемент, поставен при нормална постоянна температура, се пропусне електрически ток I от N към P полупроводника, след много кратко време (няколко секунди) се установява, че горният край се е охладил до температура T_1 – по-ниска от околната, а долният се е загреял до температура T_0 – по-висока от околната [1].

1.3.7. Режим на нагряване – термоелектрически нагреватели

Термоелектрическите елементи се използват сравнително по-рядко като нагреватели. По-широко приложение намират като източници на електродвижещо напрежение и като термоелектрически хладилници. Затова в тази глава на дисертацията не е направен подробен обзор, а са представени само някои основните зависимости и параметри в този режим на работа.

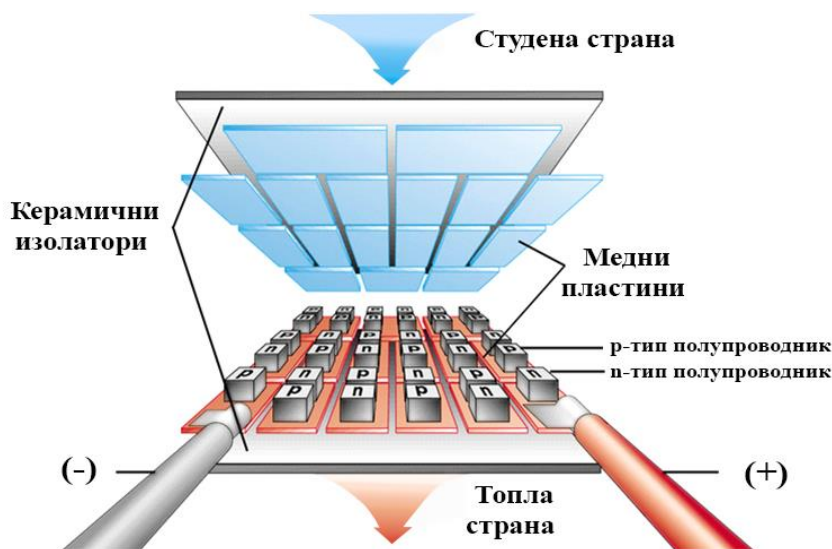
При описанието на термоелемента може да се използва моделът от фиг. 1.14, предполагайки, че хладната страна е термостатирана при температура T_0 , а горещата страна отдава топлинна мощност Q_w при температура T_1 . Посоката на тока в този режим е противоположна на посоката в режим на охлаждане. И тук с достатъчна точност може да се предполага, че половината от топлината на Джаул (отделена в клоновете) се насочва към горещата страна, а другата половина – към студената.

§1.4. Каскадиране

Каскадното устройство представлява термоелектрическа батерия от последователно включени в топлинна верига термоелементи.

§1.5. Термоелектрически модули

Основна съставна част на термо-генераторните устройства са термоелектрическите модули, представляващи най-често едностъпални монолитни структури, изградени от последователно и паралелно свързани електрически и паралелно свързани топлинно термоелементи (фиг. 1.18).



Фиг. 1.18. Устройство на термоелектрически модул.

Термоелектрическите елементи се делят на два основни вида – ТЕХ и ТЕГ. По отношение на принципа на действие и конструкцията те са идентични. Единствената разлика е в използваните материали за изработката им. ТЕХ са оптимизирани за създаване на температурна разлика, а ТЕГ – съответно за генериране на електродвижещо напрежение. И двата вида елементи могат да работят и в двата режима, но съответно с по-нисък коефициент на полезно действие.

§1.6. Материали за изработване на термоелектрическите елементи – термоелектрици

1.6.5. Основни видове термоелектрически материали

Най-голямо приложение намират легираните полупроводникови съединения и твърди разтвори, при които възможността за управление на термоелектрическите свойства позволява да се намерят условия, при които качественият фактор е с максимална стойност.

Типични представители на ефективните термоелектрически материали за P-тип полупроводници са Sb_2Te_3 , $PbTe$, $PbTeSe$, $CeFe_4Sb_{12}$ и разновидности на техните съединения с добавъчни примеси на други елементи, а за N-тип – Bi_2Te_3 , $PbTe$, $CoSb_3$, La_3Te_4 , $SiGe$ и разновидности на техните съединения с добавъчни примеси на други елементи .

§1.9. Количествена оценка на отпадната промишлена топлинна енергия

Известно е, че много индустриални процеси протичат с отделянето на големи количества отпадна топлина, които според проучванията варират в диапазона $20 \div 50\%$. Внедряването на системи за оползотворяването на тази топлина може да допринесе за значително повишаване на енергийната ефективност и редуциране на енергийните разходи на производствените предприятия. Отпадъчната топлина е остатъчната енергия, генерирана чрез индустриален процес, която практически рядко се използва. Източници на отпадна топлина могат да бъдат горещи газове от изгарянето, изпускани в атмосферата, нагreti продукти, произтичащи от индустриалния процес, охлаждаща вода или нагreti повърхности на оборудването [80, 92, 119].

§1.10. Приложение на термоелектрическите преобразуватели на енергия

Режимите им на работа обуславят две основни направления на тяхното приложение – като хладилници (нагреватели) за охлаждане или термостатиране на различни детайли и обеми и като генератори на електрическа енергия.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Целта на дисертационния труд е да се изследват и моделират конвенционални термоелектрически модули на базата на елемент на Пелтие в режим на генерация на електродвижещо напрежение, въз основа на което да се синтезират високоефективни термоелектрически генератори, приложими в бита, транспорта и промишлеността.

За постигане на поставената цел е необходимо да се решат следните задачи:

- Анализ на термичната и електрическата верига на термо-генераторна система, разглеждане на основните материали за изработка на термоелектрически модули.
- Разработване на универсален стенд за създаване на температурна разлика, позволяваща изследване на параметрите на различни видове термоелектрически модули в широк температурен обхват и с висока точност.
- Конструирание и експериментално изследване на термоелектрически генератор за отпадна промишлена, геотермална и битова топлина.

- Синтезиране и куплиране в транспортно средство на термоелектрически генератор, оползотворяващ топлината, отделената при работа на двигателя с вътрешно горене;
- Създаване на портативно захранващо устройство, за зареждане на батерии на мобилни устройства и захранване на светодиодно осветление.
- Проектиране и изследване на соларен термоелектрически генератор.
- Моделиране на термоелектрически модули чрез аналитични и теоретико-експериментални методи и невронни мрежи.
- Разработване, изследване и приложение на маломощни термоелектрически захранвания за преносими устройства.

Глава II – Експериментални изследвания на термоелектрически преобразуватели в генераторен режим

§2.1. Изследване на термоелектрогенераторен модул на Зеебек в режим на генерация на термо-електродвижещо напрежение

2.1.1. Стенд за генериране на температурна разлика – термоелектрическа батерия

Изследван е термоелектрогенераторен модул SP1848 – 27145, произведен в Китай (фиг. 2.2). Термоелектрическите модули генерират е.д.н., когато между двете им работни повърхности има разлика в температурата. За осигуряване на температурна разлика ΔT , необходима за работата на ТЕГ, респективно и за целите на изследването, е синтезиран специфичен стенд. Схема на неговата структура е представена на фиг. 2.1.



Фиг. 2.1. Конструкция на термоелектрическа батерия: 1, 2 – медни термопроводи; 3 – изолираща пластина от гетинакс; 4 – радиатор на горещата страна на ТЕХ; 5 – вентилатор за разсейване на топлинна.

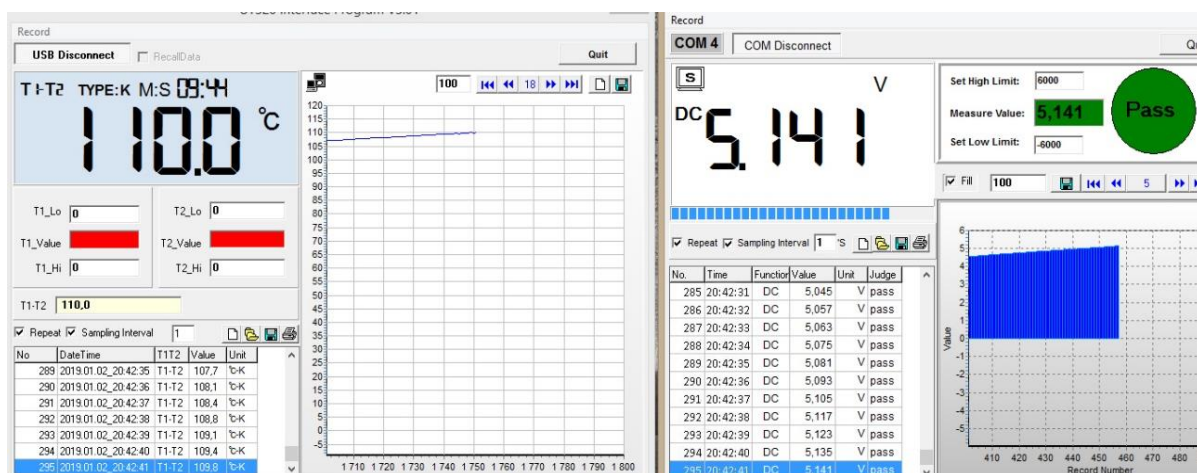


Фиг. 2.2. Външен Зеебек модул SP1848 – 27145.

Модулет ТЕГ работи в генераторен режим, модулет ТЕХ – в режим на охлаждане, а нагревателят съответно осигурява загряване на топлата страна на генератора. По този начин се осигурява необходимия за генериране на електродвижещо напрежение градиент на температурна разлика ΔT ($\Delta T = T_{Hot} - T_{Cold}$).

За измерване на температурната разлика ΔT е използван е прецизен диференциален термометър UNI-T UT 325, работещ със сонди К-тип (хромел + / алумел –). Уредът има възможност за едновременно измерване на две температури и изчислява директно стойността на температурната разлика между тях ($T_1 - T_2$).

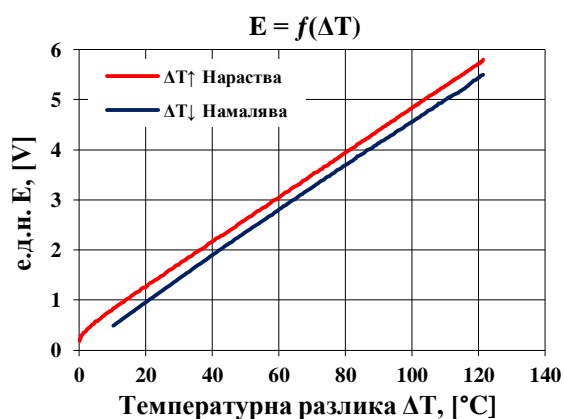
Използваните за експериментите измервателни уреди разполагат с интерфейс за връзка с персонален компютър, като това дава възможност за автоматично снемане и записване на резултатите от измерването в паметта на компютъра – фиг. 2.3.



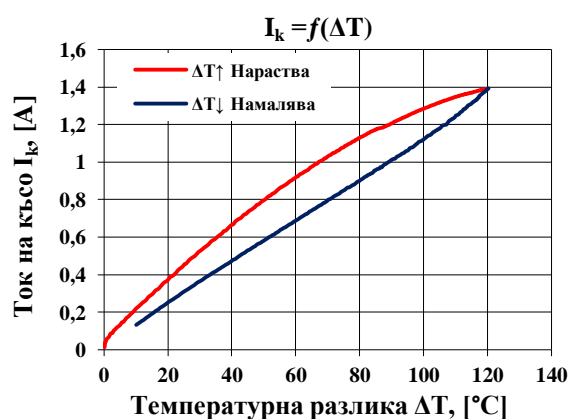
Фиг. 2.3. Софтуер на измервателните уреди – диференциален термометър и волтметър.

2.1.2. Изследване на изходното напрежение на празен ход и на тока на късо съединение

Проведени са измервания на изменението на генерираното напрежение E и на тока на късо съединение I_k в зависимост от температурната разлика ΔT . Резултатите са представени на фиг. 2.4 и фиг. 2.5. С цел повишаване на точността са проведени изследвания при повишаване на температурната разлика и обратно измерване – при намаляване на температурната разлика, резултатите от които са представени на фиг. 2.4 и фиг. 2.5 съответно с червен и син цвят. Графиките са изградени на базата на над 300 автоматично записани резултата.



Фиг. 2.4. Зависимост на генерираното електродвижещо напрежение от температурната разлика ΔT – $E = f(\Delta T)$ на Зеебек модула.



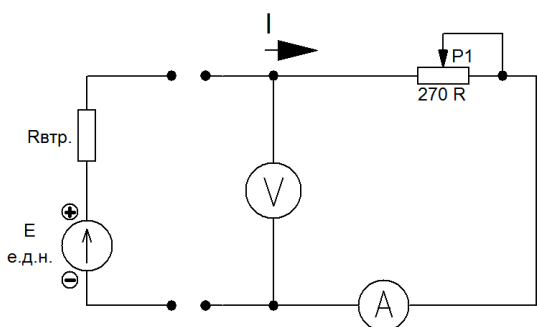
Фиг. 2.5. Зависимост на тока на късо съединение I_k от температурната разлика ΔT – $I_k = f(\Delta T)$ на Зеебек модула.

Максималните получени стойности за напрежението и за тока на късо при $\Delta T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ са съответно $5,8\text{ V}$ и $1,4\text{ A}$. Разполагайки с този резултат, може да се изчисли коефициентът на термо-електродвижещо напрежение за конкретния елемент – $\alpha = 48\text{ mV/K}$. Тоест, напрежението на изхода на модула се повишава с 48 mV при всеки градус увеличение на градиента на температурната разлика ΔT .

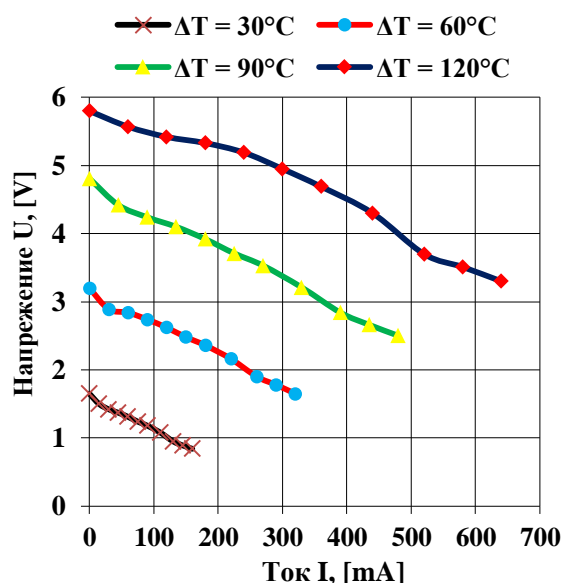
2.1.3. Снемане на товарни характеристики на генераторния модул на Зеебек

Изследвани са генерираното изходно напрежение E и изходният ток I върху товар с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 270\ \Omega$, в зависимост от температурната разлика ΔT . За измерване на температурата на студената страна (T_{Cold}) и на горещата страна (T_{Hot}) на модула на Зеебек отново е използван специализиран дигитален термометър, тип UNI-T UT 325. Товарните характеристики са измерени в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Електрическата схема на експерименталната постановка за снемане на товарната характеристика на модула е представена на фиг. 2.7.



Фиг. 2.7. Електрическа схема на опитната постановка за снемане на товарна характеристика на изследваният модул.



Фиг. 2.8. Семейство товарни характеристики на генераторния модул на Зеебек:
 $I = f(U)$, ($R = 0 \div 270\ \Omega$), $\Delta T = const.$

На фиг. 2.8. е показана графичната зависимост на тока I през модула на Пелтие във функция от генерираното термо-електродвижещо напрежение E при различни стойности на товарното съпротивление – от 0 до $270\ \Omega$. Проведени за четири измервания, като е поддържана константна температурна разлика ΔT , съответно – $30, 60, 90$ и $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Видно е, че при понижаване на товарното съпротивление протичащият през веригата ток се повишава, а напрежението намалява.

На базата на експериментално получените резултати за работата на ТЕГ модул SP 1848 – 27145 в генераторен и хладилен режим могат да се направят следните изводи:

- Изследваният термоелектрически елемент генерира симетрично напрежение и ток, пропорционални на температурната разлика ΔT . От всички графики е видно, че съществува ясно изразена пропорционална зависимост на генерираната мощност от температурната разлика.

- Максималната измерена стойност на електродвижещото напрежение е над $5,8\text{ V}$, а на тока на късо съединение – над $1,4\text{ A}$.

- Изчислен е коефициентът на термо-електродвижещо напрежение: 48 mV/K .

- За минимално вътрешното съпротивление се получава: $r_0 = 4,15\ \Omega$.

- За максимална стойност на мощността на генератора се получава 8 W при $\Delta T = 120\text{ }^\circ\text{C}$. Площта на модула е 16 cm^2 , от което следва, че макс. мощност за 1 cm^2 е $0,5\text{ W}$.

- Изследваният ТЕГ може успешно да се използва за създаване на температурна разлика след осигуряване на адекватно захранване на изводите му. При експеримента е достигната $\Delta T = 84\text{ }^\circ\text{C}$ (максимално $100\text{ }^\circ\text{C}$ на топлата и $16\text{ }^\circ\text{C}$ на студената страна).

- Построени са семейство товарни характеристики в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 120\text{ }^\circ\text{C}$ с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 270\ \Omega$.

§2.3. Изследване на термо-охладителен модул на Пелтие в режим на генерация на термо-електродвижещо напрежение

Термоелектрическите хладилници са много по-разпространени на пазара на термоелектрическите модули. Достъпността им в най-голяма степен се дължи на много по-ниската им цена. Фактор за това е, че материалите, от които се изработват, и най-вече спойките между клоновете на термодвойките и керамичните повърхности са нискотемпературни и не могат да работят при по-високи температури от $100 \div 120\text{ }^\circ\text{C}$.

От тази гледна точка е важно да се изследва ефективността им за работа като термоелектрически генератори и да се сравни доколко рентабилна е тя.

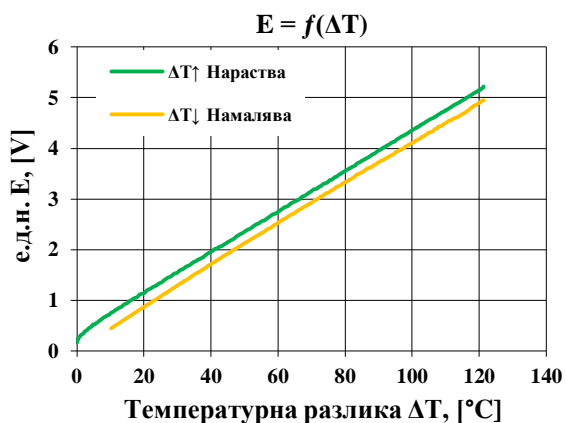
2.3.1. Изследване на изходното напрежение на празен ход и тока на късо съединение

Направено е изследване на термоелектрически хладилник, тип TEC1 – 12710 със същата площ (16 cm^2) и брой термодвойки като термоелектрогенераторния модул SP1848 – 27145, изследван в §2.1. Използвана е абсолютно същата методология (подход, стенд и измервателни уреди) с цел постигане на максимална адекватност на резултатите и последващото сравнение между двата типа модули.

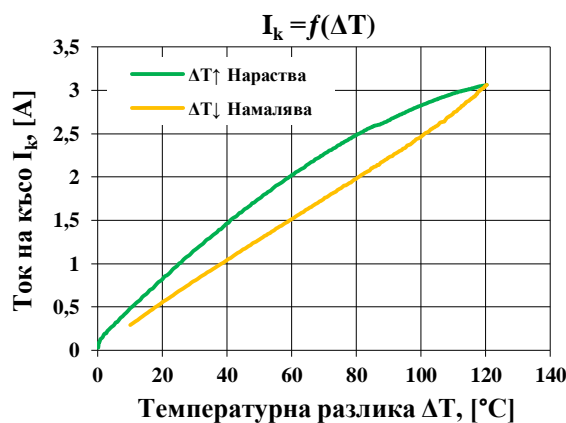
Отново са проведени две групи изследвания: при повишаване на температурната разлика и обратно измерване при намаляване на температурната разлика. Резултатите за генерираното напрежение и за тока на късо съединение са представени в таблица 2.3 и на фиг. 2.10 и 2.11 съответно със зелен и жълт цвят.

Таблица. 2.3. Зависимост на генерираното напрежение и на тока на късо съединение от температурната разлика ΔT на Пелтие модула.

$\Delta T, [^\circ\text{C}]$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$E, [\text{V}]$	0,54	1	1,45	1,8	2,25	2,6	3,05	3,4	3,9	4,2	4,7	5,05
$I_k, [\text{A}]$	0,33	0,75	1,1	1,3	1,55	1,75	2	2,2	2,4	2,65	2,9	3,05



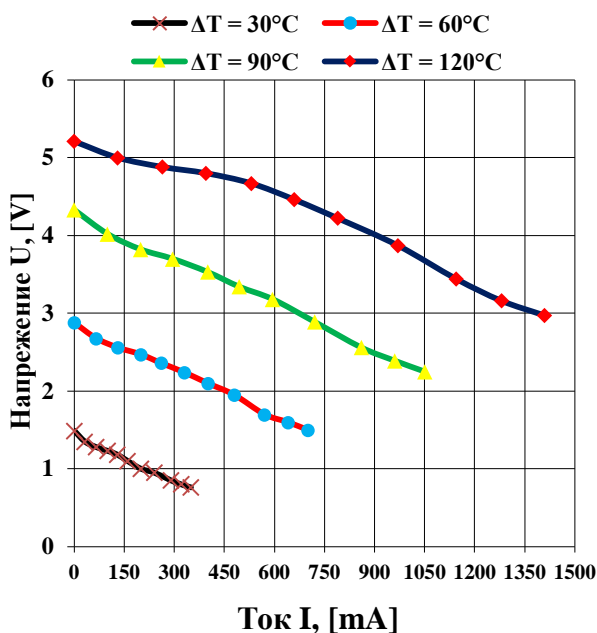
Фиг. 2.10. Зависимост на генерираното електродвижещо напрежение от температурната разлика $\Delta T - E = f(\Delta T)$, на Пелтие модула.



Фиг. 2.11. Зависимост на тока на късо съединение I_k от температурната разлика $\Delta T - I_k = f(\Delta T)$, на Пелтие модула.

2.3.2. Снемане на товарни характеристики на хладилния модул на Пелтие

Снети за семейство товарни характеристики в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 120 \text{ }^\circ\text{C}$ с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 270 \text{ } \Omega$.



Фиг. 2.12. Семейство товарни характеристики на хладилен модул на Пелтие: $I = f(U)$, ($R = 0 \div 270 \text{ } \Omega$), $\Delta T = \text{const}$.

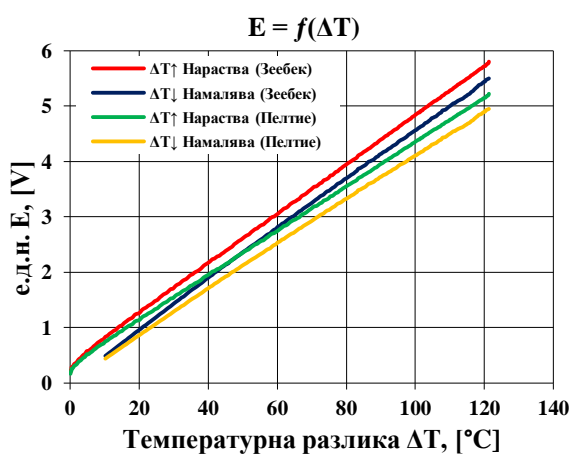
На базата на експериментално получените резултати за работата на ТЕХ модул, тип ТЕС1 – 12710 в генераторен режим могат да се направят следните изводи:

- Максималната измерена стойност на електродвижещото напрежение е 5 V , а на тока на късо съединение – 3 A при $\Delta T 120 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Изчислени са коефициентът на термо-електродвижещо напрежение: 42 mV/K , и минималното вътрешното съпротивление: $r_0 = 1,67 \text{ } \Omega$.
- За максимална стойност на мощността на генератора се получава 15 W при $\Delta T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Площта на модула е 16 cm^2 , от което следва, че максималната мощност за 1 cm^2 е $0,95 \text{ W}$.

§2.4. Сравнителен анализ между модул на Зеебек и модул на Пелтие с режим на генерация на термо-електродвижещо напрежение

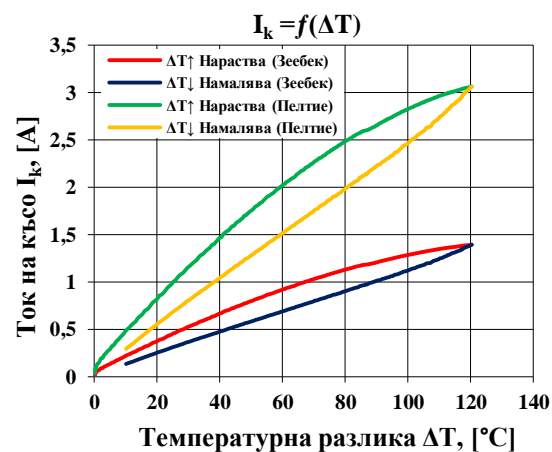
За да се улесни сравнението, получените резултати за двата типа модули са представени в общи графики (фиг. 2.13 и 2.14). Генерираното напрежение от модула на Пелтие е с аналогични стойности на тези на напрежението, генерирано от модула на Зеебек, като леко изостава от него (фиг. 2.13). Изследването за тока на късо съединение показва над два пъти по-високи стойности за модула на Пелтие спрямо модула на Зеебек (фиг. 2.14). Това се потвърждава и от построеното семейство товарни характеристики, представени на фиг. 2.12.

Конкретният модул на Пелтие генерира двойно повече електрическа мощност, което се дължи на по-голямото сечение на клоновете на термодвойките, от които е изграден. При относително ниски температури до около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ е икономически по-целесъобразно приложението на охладителни модули на Пелтие. При евентуално прилагане на по-високи температури от допустимите, стойките между клоновете на термодвойките изграждащи модула се втечняват и той се поврежда.



Фиг. 2.13. Сравнителна

характеристика на зависимостта на генерираното електродвижещо напрежение E от температурната разлика между модула на Зеебек и модула на Пелтие.



Фиг. 2.14. Сравнителна

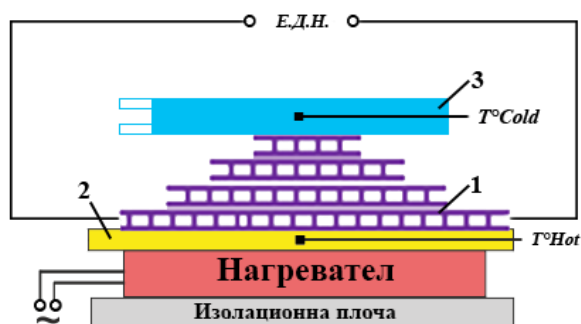
характеристика на зависимостта на тока на късо съединение I_k от температурната разлика между модула на Зеебек и модула на Пелтие.

§2.5. Изследване на многостъпален (каскаден) термоелектрически модул на Пелтие в режим на генерация на термо-електродвижещо напрежение

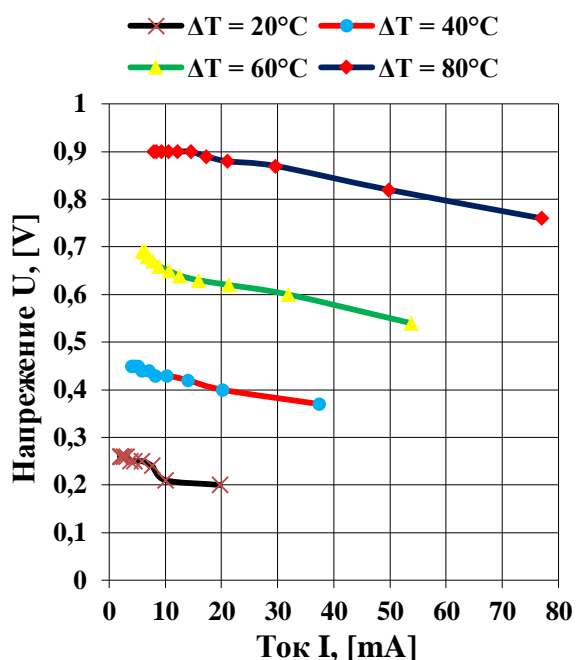
Проведени са експериментални изследвания на многостъпален каскаден модул на Пелтие, работещ в генераторен режим. Този вид модули са предназначени по принцип да работят като термоелектрически охладители, но сами по себе си представляват каскадна термоелектрическа батерия. От тази гледна точка, е извършено подробно изследване за ефективността на работа на такъв тип модул в режим на генерация на термоелектродвижещо напрежение. Изследваният модул е четириетажен тип ТЕС4 – 24604 е съставена от общо 246 термодвойки и е с височина 11 mm .

За целите на изследването е използвана експерименталната постановката, при която студената страна на каскадния модул се осигурява от алуминиев радиатор с водно охлаждане (фиг. 2.15).

2.5.1. Снемане на товарни характеристики на каскадния модул на Пелтие



Фиг. 2.15. Конструкция на термоелектрическа батерия: 1 – каскаден термоелектрически модул; 2 – медна топлопроводна платина; 3 – воден радиатор; $T^{\circ}Cold$, $T^{\circ}Hot$ – термодвойки на диференциалния термометър за измерване на температурата на студената и топлата страна на каскадата.



Фиг. 2.16. Семейство товарни характеристики на каскадния модул на Пелтие: $I = f(U)$, ($R = 0 \div 100\Omega$), $\Delta T = const$.

Изследвани са генерираното изходно напрежение E и изходният ток I върху товар с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 100 \Omega$, в зависимост от температурната разлика ΔT . За измерване на температурата на студената страна (T_{Cold}) и на горещата страна (T_{Hot}) на каскадния модул на Пелтие отново е използван специализиран дигитален термометър, тип UNI-T UT 325. Товарните характеристики са измерени в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 80 \text{ }^{\circ}C$, по аналогичен начин на този, описан в §2.1

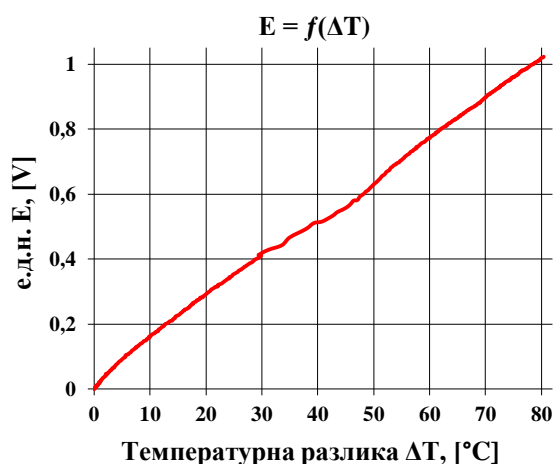
На фиг. 2.16. е показана графичната зависимост на тока I през модула на Пелтие във функция от генерираното термоелектродвижещо напрежение E , при различни стойности на товарното съпротивление ($R = 0 \div 100 \Omega$). Проведени са четири измервания, като е поддържана константна температурна разлика ΔT , съответно – 20, 40, 60 и 80 $^{\circ}C$.

2.5.2. Измерване на изходното напрежение на празен ход на каскадния модул

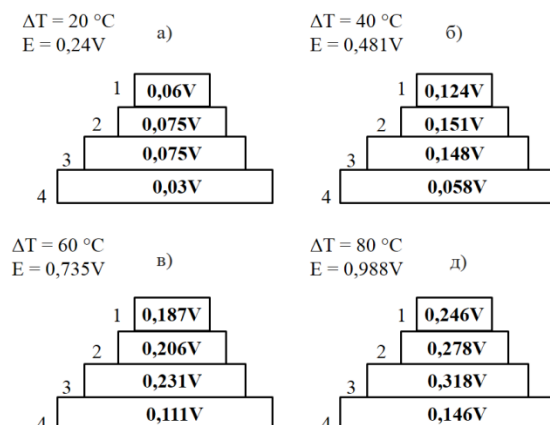
Генерираното е.д.н. е измерено в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 80 \text{ }^{\circ}C$. Според каталожните данни за модула, прилагането на температура на горещата страна, по-висока от 100 $^{\circ}C$, би довело до неговото разрушаване.

Графичната зависимост на генерираното термо-е.д.н. на празен ход (без включен товар (при $I = 0$)) от температурната разлика ΔT – $E = f(\Delta T)$, е представена на фиг. 2.17. Графиката показва, че съществува линейна зависимост между генерираното напрежение E на изходите на модула и създадената температурна разлика ΔT . Максимална стойност на E : $E = 1 \text{ V}$, се получава при $\Delta T = 80 \text{ }^{\circ}C$.

На фиг. 2.18. е представено разпределение на генерираното от каскадния модул напрежение E по етажи. Анализът показва, че, поради топлопроводимост на полупроводниковите клонове и керамичните плочи, най-висока ефективност имат средните два етажа – 2-ри и 3-ти. Именно там температурният градиент е най-висок.



Фиг. 2.17. Зависимост на генерираното електродвижещо напрежение от температурната разлика $\Delta T - E = f(\Delta T)$.



Фиг. 2.18. Разпределение на генерираното от каскадния модул напрежение E по етажи.

Анализът на товарната характеристика показва следното:

- Най-високи стойности на генерираното електродвижещо напрежение – E се достигат при най-голяма температурна разлика ΔT , приложена на срещуположните страни на каскадния модул – $E = 1 \text{ V}$ при $\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Най-голям ток I_k (ток на късо съединение) се достига при $\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C} - 77 \text{ mA}$.
- Изчислен е коефициентът на термоелектродвижещо напрежение: 12 mV/K .

§2.6. Изводи по Глава II

На базата на проведените експериментални изследвания на работата на термоелектрически модул на Зеебек (типичен термоелектрически генератор), охладителен модул на Пелтие и каскаден Пелтие модул (типичен термоелектрически хладилник) в режим на генерация на е.д.н., могат да се направят следните изводи и заключения:

- Конструиран е креативен лабораторен стенд за изследване на ТЕМ в генераторен режим, имащ потенциал за достигане на високи температурни разлики.
- На базата на проведеното изследване на модул на Зеебек и модул на Пелтие са измерени термо-е.д.н. E , и токът на късо съединение I_k на изходите им. Построени са товарни характеристики на двата типа модули в температурния интервал $\Delta T = 0 \div 120 \text{ }^\circ\text{C}$ с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 270 \text{ } \Omega$;
- Откроява се ясно изразена положителна корелация между генерираната изходна мощност и работната температурна разлика ΔT ;
- Построени са семейство товарни характеристики при константни температурни разлики: за модула на Зеебек и Пелтие – при $\Delta T = 30, 60, 90$ и 120°C , с

променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 270 \Omega$; за каскадния модул на Пелтие – при $\Delta T = 20, 40, 60$ и $80 \text{ }^\circ\text{C}$, с променливо съпротивление (реостат) – $R = 0 \div 100 \Omega$.

- Установено е, че за изследваните едностъпални модули с нарастване на температурната разлика ΔT с $20 \text{ }^\circ\text{C}$, напрежението на празен ход нараства с около 1 V , а токът на късо съединение – от 250 mA за модула за Зеебек до 500 mA за модула на Пелтие.

- Сравнението между ТЕГ и ТЕХ модули показва, че Пелтие модулите могат много успешно да заместят тези на Зеебек в режим на генерация при по-ниски температурни разлики, ненадвишаващи параметъра в каталожните им данни.

- Изследван е каскаден термоелектрически модул в режим на генерация на термо-е.д.н. Получени са резултати при различна температурна разлика ΔT . Установен е с точност приносът на всеки един от етажите за общото генерирано напрежение E .

- Резултатите показват, че каскадните модули на Пелтие са нискоефективни при работата си в термоелектрогенераторен режим, респективно използването им за генератори не е рентабилно.

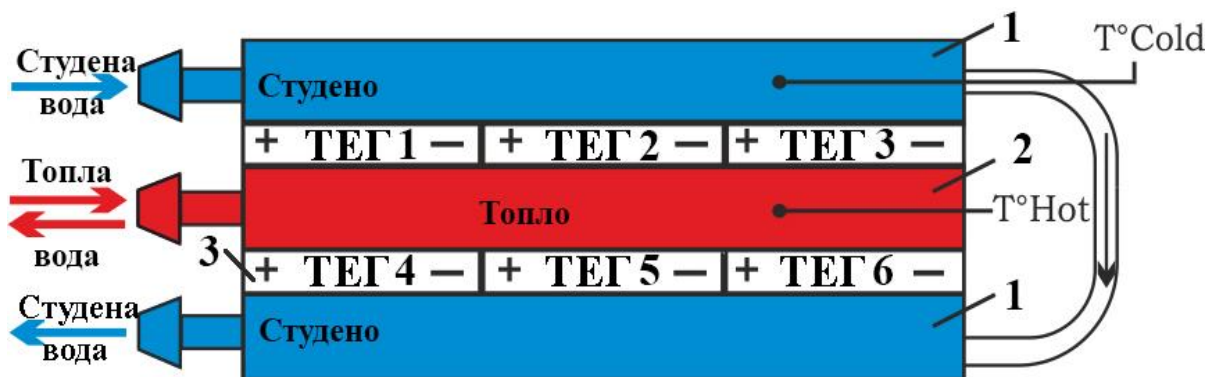
Глава III – Конструирание и изследване на термоелектрически генератори за оползотворяване на отпадна топлинна енергия

Увеличаващият се натиск за разработване на алтернативни методи за производство на чиста енергия, както и нарастващото отделяне на така наречената отпадъчна топлина от промишлени предприятия и други антропогенни дейности налага необходимостта от подобряване на техническите и икономическите параметри на ТЕГ.

Термоелектрическите модули генерират електродвижещо напрежение когато между двете им работни повърхности има разлика в температурата [65, 136]. Задача на изследванията в тази глава е да даде представа за целесъобразността от използването на тези елементи в устройства за получаване на електрическа енергия от нискотемпературни източници (под $100 \text{ }^\circ\text{C}$).

§3.1. Конструирание и изследване на флуиден термоелектрически генератор, използващ отпадна топлина

Целта е да се проектира, синтезира и изследва в лабораторни условия модел на термоелектрически генератор, който трансформира температурната разлика на течност в електродвижещо напрежение. Синтезираният генератор е изграден от шест термоелектрически охлаждащи модула (модули на Пелтие), тип TEC1–12710, чиито химичен състав е базиран на бисмутов телурид (Bi_2Te_3) [88]. Всеки от модулите съдържа по 127 p-n прехода. Конструктивната схема на генератора е представена на фиг. 3.1.

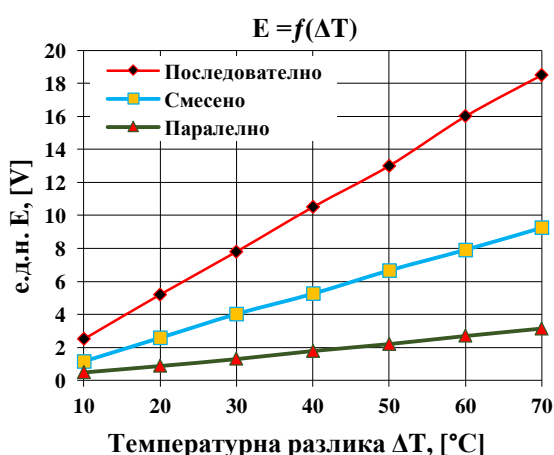


Фиг. 3.1. Конструкция на разработения термоелектрически генератор: 1 – алуминиеви радиатори за студена вода; 2 – алуминиев радиатор за гореща вода; 3 – шест термоелектрически модула; $T^{\circ}\text{Cold}$, $T^{\circ}\text{Hot}$ – термодвойки за измерване на температурата на студената и горещата страна на генератора.

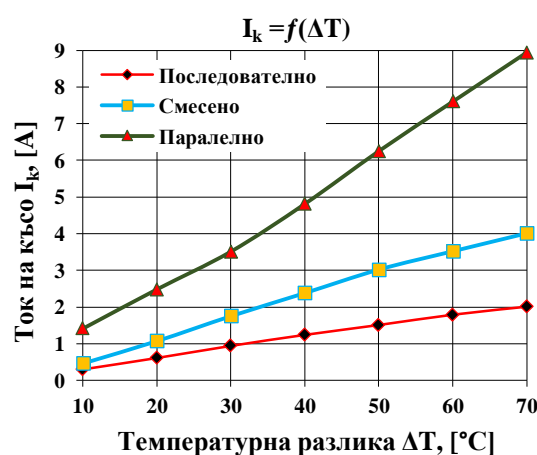
Модулите са поставени между три алуминиеви радиатора, като двата крайни са студени, а средният е горещ. Двата крайни радиатора са свързани чрез медна тръба и през тях циркулира студена вода от водопроводната мрежа. Чрез електрическа помпа се осъществява циркулация на топла вода през средния радиатор с дебит 3 l/min или 50 ml/sec .

Термоелектрическите модули TEC1–12710 са обща площ 16 cm^2 . Общата площ на всичките шест модула е 96 cm^2 . Максималната температура на горещия радиатор (T_{Hot}) не надвишава $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а температурата на студения радиатор (T_{Cold}) не надвишава $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В настоящото изследване са заснети семейство преобразователни характеристики за генерираното електродвижещо напрежение E и за тока на късо съединение I_k за температурни разлики в диапазона $\Delta T = 10 \div 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведени са изследвания при различни схеми на свързване между шестте модула – последователно, паралелно и смесено.



Фиг. 3.3. Семейство характеристики на зависимостта на генерираното е.д.н. от температурната разлика ΔT – $E = f(\Delta T)$.



Фиг. 3.4. Семейство характеристики за зависимостта на тока на късо съединение I_k от температурната разлика ΔT – $I_k = f(\Delta T)$.

Резултатите са представени графично и таблично на фиг. 3.3, фиг. 3.4 и в таблица 3.1 с червен, зелен и син цвят съответно за последователно, паралелно и смесено свързване на шестте модула. Може да се направи заключението, че модулите могат да се свързват помежду си последователно, паралелно и смесено в зависимост от това дали целта е да се получи по-висока стойност на генерирания ток или на напрежението.

На базата на експериментално получените резултати за работата на модул ТЕС1 –12710 в генераторен режим могат да се направят следните изводи:

- Графиките и данните показват силна зависимост на генерираната електрическа мощност от температурната разлика ΔT .
- Максималната измерена стойност на електродвижещото напрежение е $3,11 V$, а на тока на късо съединение – $1,9 A$ за един елемент.
- Средния коефициент на термо-е.д.н. за един елемент е: $\alpha = 44 mV/K$.
- За минималното вътрешното съпротивление се получава: $r_0 = 1,63 \Omega$.
- За максималната стойност на мощността се получава $37 W$ при $\Delta T = 70 ^\circ C$ – за последователно и смесено свързване и $28 W$ – за паралелно свързване. Площта на модулите е $96 cm^2$, от което следва, че максималната мощност за $1 cm^2$ е $0,39 W$.
- Изследваният генератор може успешно да се използва за създаване на ел. енергия от промишлена и битова отпадна топлина или геотермални извори.

В бъдеще делът на компонентната „зелената енергия“ ще става все по-важен за екологичната оценка на производствата. Процентът възстановена енергия подобрява ефективността и допринася положително за икономическата рентабилност. С оглед на тези фактори термоелектрическите генератори, приложени в по-голям мащаб, имат голям потенциал за включване в промишлените производства на различни стопански сектори.

§3.2. Конструирание и изследване на автомобилен термоелектрически генератор за оползотворяване на отпадна топлинна енергия

3.2.1. Отпадна топлинна енергия при работата на двигателите с вътрешно горене

При двигателите с вътрешно горене (ДВГ) независимо от вида на горивото, с което работят, около 60% от енергията се губи под формата на топлина, разсейвана в околната среда. Ефективността на конвенционалните двигатели с вътрешно горене може да се увеличи чрез рекуперация на отпадната топлина.

Целта на системите за оползотворяване на отпадната топлина е да уловят отделената при работа на двигателя топлинна мощност и да я преобразуват в електрическа енергия. По този начин се подобрява ефективността на автомобила, като се осигуряват постоянно нарастващите изисквания за екологичност на новопроизведените превозни средства.

До момента всички предложени методи за възстановяване на енергия имат идентичен принцип на действие, при който се използва създалата се температурна разлика ΔT между изгорелите газове и охладителната течност [123]. Съществуват и разработки, при които радиаторът на автомобила е заменен със специално конструиран термоелектрически топлообменник, генериращ напрежение [47, 50].

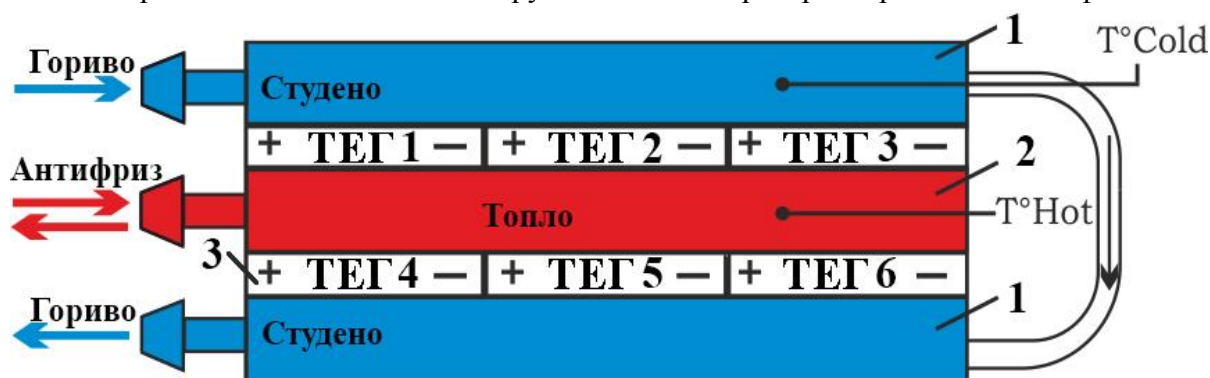
При работа си двигателите с вътрешно горене преобразуват със сравнително ниска ефективност химичната енергия на горивото в механична. При изгаряне на горивото в цилиндрите на двигателя, около $\sim 25\%$ от енергията реално задвижва автомобила (фиг. 3.6) [208]. Останалата част от енергията се разсейва в околната среда под формата на топлина чрез изгорелите газове ($\sim 40\%$) и охладителната система ($\sim 30\%$). Тези стойности са ориентировъчни и могат да варират в зависимост от вида на горивото и от това доколко е оптимизиран конкретният агрегат.

Оползотворяването на част от отпадната енергия би довело до подобряване на редица основни параметри на транспортните средства, а именно – до понижаване на разхода на гориво, осигуряване на по-ниски нива на газови емисии и повишаване на мощността и ефективността. Освен това, би се ограничил приносът на транспортното средство за затопляне на околната среда.

3.2.2. Куплиране в автомобил и изследване на термоелектрическият генератор

В този параграф е разработен, реализиран и изследван термоелектрически генератор, преобразуващ температурната разлика на работни течности в електродвижещо напрежение, който е предназначен за вграждане в автомобил. Предложеният подход е по-различен и според проучването на автора може да се счита за оригинален. При него за осигуряване на топлата страна на термоелектрическият генератор (ТЕГ) е използван антифриз, а за охлаждането – върнатият към резервоара излишен бензин.

Използван е термоелектрическият генератор, представен в §3.1. За реализация на генератора са използвани елементи на Пелтие поради по-ниската им цена, по-широкото разпространение на пазара и поради факта, че температурното им натоварване е но-ниско. Температурата на топлата им страна не надвишава $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, докато на пътя на изгорелите газове температурата може да достигне стойности над $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Принципната схема на конструкцията на генератора е представена на фиг. 3.7.



Фиг. 3.7. Конструкция на автомобилен термоелектрически генератор: 1 – алуминиеви радиатори за бензин; 2 – алуминиев радиатор за антифриз; 3 – шест термоелектрически модула; $T^{\circ}\text{Cold}$, $T^{\circ}\text{Hot}$ – термодвойки за измерване на температурата на студената и горещата страна на генератора.

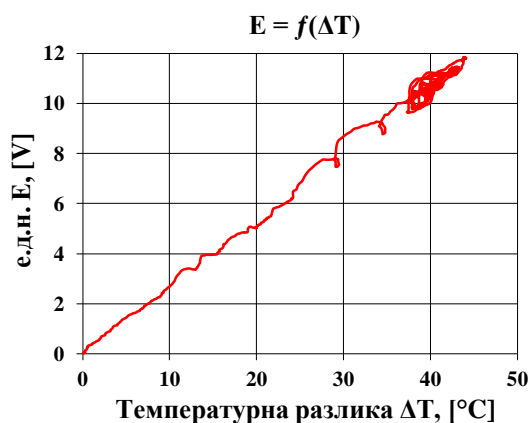
Двата крайни радиатора са свързани чрез медна тръба и през тях циркулира излишният хладен бензин, връщан към резервоара от регулатор на налягането. Този начин на свързване не оказва влияние върху снабдяването на двигателя с гориво,

респективно и върху стабилната му работа. Средният радиатор е свързан към охладителната система на автомобила и през него циркулира горещ антифриз. Охладителната течност чрез конвекция осъществява топлообмен между двигателя и радиаторите на изследвания генератор. Дебитите на бензина и антифриза са променливи и зависят от честотите на въртене на двигателя. Това се дължи на факта, че при конкретния автомобил и водната, и бензиновата помпа са механични и се задвижват от въртенето на агрегата.

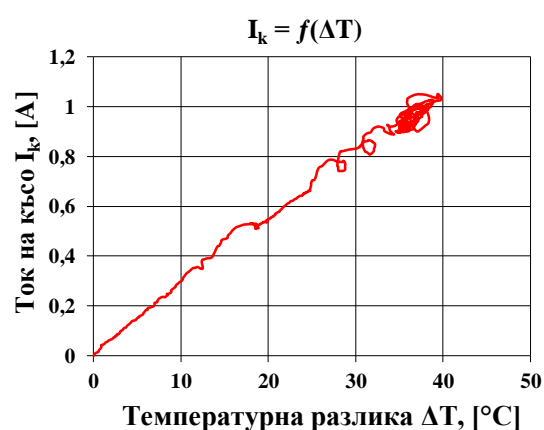
В алуминиевите радиатори са пробити глухи отвори с дълбочина 30 mm , в които са поставени термо-сондите на диференциален термометър. Максималната температура на горещия радиатор (T_{Hot}) варира около работната температура на двигателя ($\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$). Температурата T_{Cold} на студените радиатори, през които циркулира бензин, не надвишава $50\text{ }^\circ\text{C}$. Чрез разликата в температурата между двата флуида се създава необходимият за генериране на електродвижещо напрежение температурен градиент ΔT .

Изследвани са преобразователните характеристики за генерираното е.д.н. и за тока на късо съединение I_k при ΔT до $43\text{ }^\circ\text{C}$. Резултатите са представени на фиг. 3.8 и 3.9.

Броят на отчетените стойности и за двете графики е 2000 (време на отчитане над 33 min). Всички стойности са измерени при движение на автомобила при реални пътни условия. За целта измервателната апаратура е поместена в автомобила.



Фиг. 3.8. Зависимост на генерираното е.д.н. от температурната разлика ΔT – $E = f(\Delta T)$.



Фиг. 3.9. Зависимост на тока на късо съединение I_k от температурната разлика ΔT – $I_k = f(\Delta T)$.

Измерванията са проведени през лятото. При работа през зимния сезон и при ниски температури на околната среда двигателят ще достигне по-бавно до работна температура ($\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$). Това ще се компенсира от по-ниската температура на горивото и по този начин ще се запази относително еднаква ΔT , респективно и производителността на генератора.

Като предимство на разгледания метод може да се посочи, че генераторната система се помещава в двигателния отсек на автомобила. При вариантите с използване на отработените газове системата се помещава под автомобила, на пътя на изпускателните тръби, което може да бъде недостатък.

Максималната получена стойност на електродвижещото напрежение при $\Delta T = 43\text{ }^\circ\text{C}$ е почти 12 V . Разполагайки с този резултат, може да се изчисли коефициентът на термо-е.д.н. за целия генератор, като се получава $\alpha = 280\text{ mV/K}$. За стабилизиране на напрежението на желана стойност може да се използва DC/DC преобразувател, като по този начин се избягват колебанията на температурите.

Въз основа на проведеното в реални пътни условия експериментално изследване на работата на създадения термоелектрически генератор са постигнати следните резултати:

- Максималната измерена стойност на термо-е.д.н. е почти 12 V , а на тока на късо съединение I_k – над 1 A при последователно свързване на шестте елемента.
- Средният коефициент на термо-е.д.н. за целия генератор е 280 mV/K .
- Вътрешното съпротивление за целия генератор е: $r_0 = 12\ \Omega$.
- Максималната мощност на генератора е 12 W при $\Delta T > 40\text{ }^\circ\text{C}$. Площта на модула е 96 cm^2 , от което следва че максималната мощност за 1 cm^2 е $0,125\text{ W}$.

Максималната мощност от 12 W е незначителна в сравнение с мощността, генерирана от автомобилен алтернатор, но общата площ на Пелтие – модулите е под $0,01\text{ m}^2$. Ако сумарната площ е 1 m^2 , генерираната мощност ще бъде над 1 kW , колкото е приблизителната мощност на стандартен автомобилен алтернатор (90 A , 12 V).

§3.3. Разработване на маломощно портативно токозахранващо устройство на базата на елементи на Зеебек

В този раздел са представени проектирането и реализирането на маломощен термоелектрически генератор, подходящ за захранване на светодиодно осветление и зареждане на батериите на различни портативни мобилни устройства.

Устройството е конфигурирано като захранващ източник с напрежение $U = 5\text{ V}$ със стандартен USB изход. Като първичен източник на енергия се използва единствено топлината от пламъка на свещ или спиртна лампа. Предназначението му е да се използва в полеви условия, където няма друг източник на напрежение – при туристически експедиции в отдалечени местности и др.

Системата е автономна и се нуждае единствено от пламъка на спиртна лампа или горяща свещ. Предимството ѝ пред соларните захранващи системи, които могат да работят единствено през деня при наличие на слънчева светлина, е че се осигурява необходимото напрежение през цялата част на денонощието, независимо от метеорологичните условия. За реализирането на устройството са използвани два термоелектрически генератора, тип SP1848 – 27145, чиито характеристики са изследвани подробно в Глава II, §3.1.

На фиг. 3.11 е представена блок-схемата на системата за генериране на електрическа енергия чрез преобразуването на топлината при използване ефекта на Зеебек. Поради динамиката на процеса на отдаване и приемане на топлина се появяват и девиации на изходната мощност от термоелектрическите генератори. Това обстоятелство обуславя и наличието на допълнителни елементи във веригата на преобразуването и пренасянето на електрическата енергията до консуматора, като конвертора на постоянен ток и напрежение.



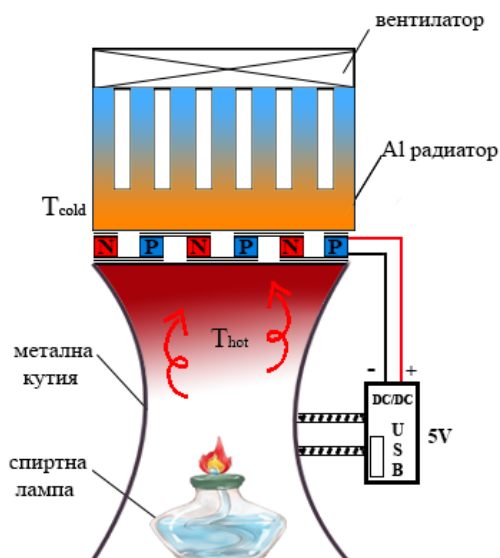
Фиг. 3.11. Блокова схема на системата за генериране на електрическо захранване под действието на източник на топлина.

3.3.1. Постояннотоков преобразувател DC/DC

Поради девиации на генерираната електрическа мощност от ТЕГ се налага напрежението на изхода на системата да се повиши и стабилизира. Това се постига с използването на DC/DC преобразувател с честотно-импулсна модулация [81]. Стойността на входното напрежение, доставено от ТЕГ и необходимо за правилната работа на стабилизатора, е в диапазона $0,9 \div 5 V$ (схемата стартира от $0,9 V$).

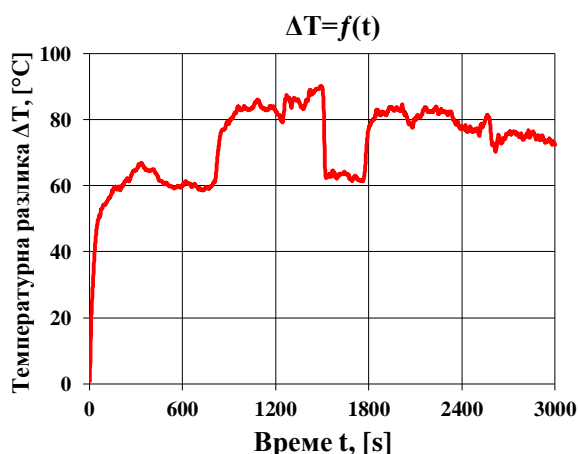
3.3.2. Конструкция на токозахранващото устройство

Портативното захранващо устройство е изградено от два термоелектрически генератора, тип SP1848 – 27145, свързани паралелно. Те са притиснати между плоското дъно на метална кутия и алуминиев ребрен радиатор посредством метална скоба. Охлаждането на студентата страна на ТЕГ се осъществява посредством кондукция към охлаждащ радиатор, комбинирана с конвекция посредством естествено и принудително вентилиране с атмосферен въздух. Принудителната конвекция се осигурява чрез монтажа на вентилатор, захранван с енергия, произведена от устройството. Вентилаторът е монтиран в горната част на радиатора (фиг. 3.14).



Фиг. 3.14. Принципна схема на прототипа на маломощно токозахранващо устройство.

Въздушният поток се подвежда отдолу и се извежда нагоре, за да се подпомогне и от естествената циркулация на топлинните потоци. Конструираното генераторно устройство има потенциал да произвежда стабилизирано електрическо захранване в продължение на няколко часа. След това време генерацията се прекратява поради изравняването на температурите от двете страни на генератора. Продължителността на работа в най-голяма степен зависи от температурата на околната среда и може да бъде удължена чрез подобряване на ефективността на охлаждането.



Фиг. 3.15. Зависимост на изменение на температурната разлика ΔT от времето $t - \Delta T = f(t)$.

На фиг. 3.15 е представена време-температурна графична зависимост, отразяваща изменението на ΔT във функция от времето t . При запалване на пламъка, за няколко секунди се достига до напрежение над $1 V$, необходимо за стартиране на постояннотоковия преобразувател. След първоначален пик, температурната разлика се задържа на ниво $80\text{ }^{\circ}C$ в продължителност на няколко часа. При $\Delta T \sim 80\text{ }^{\circ}C$ изходното напрежение е $\sim 4 V$. Използваната лампа има разход на денатуриран спирт за горене приблизително $15 ml/h$.

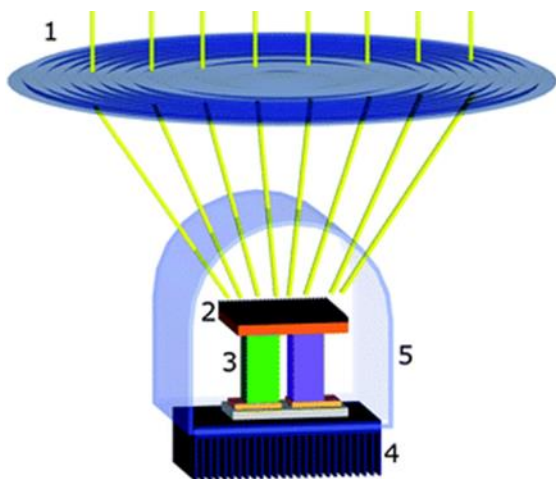
§3.4. Прототип на соларен термоелектрически генератор с френелова леща

През последните няколко десетилетия слънчевата енергия показва голям потенциал за заместване на използването на изкопаеми горива при производството на електрическа енергия. Повечето от изследванията са концентрирани върху разработването и оптимизацията на фотоволтаичните соларни панели за ток. На този фон, разработките на соларни термоелектрически генератори остават на по-заден план. При създаване на подходящи условия ТЕГ също могат да се използват за преобразуване на енергията на слънчевите лъчи в електроенергия [36, 206].

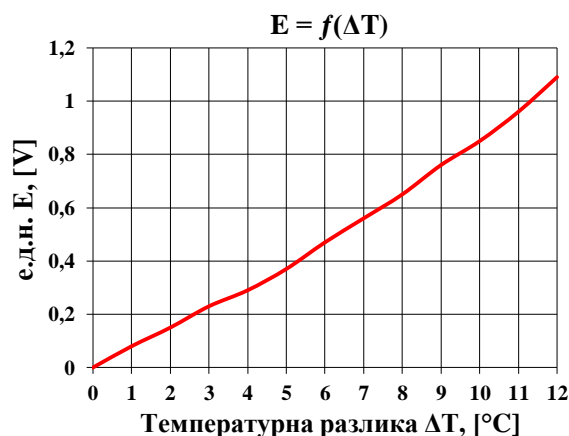
Представен е концептуален прототип на соларна термоелектрическа система за генериране на електроенергия. Конструкцията ѝ се състои от един модул на Пелтие, тип ТЕС1 – 12706, притиснат между два алуминиеви радиатора. Радиаторът от студената страна е по-масивен и има за цел да поддържа ниска температура на модула. Радиаторът от топлата страна представлява мишена, върху която пада слънчевата радиация, концентрирана от френелова леща. Радиаторът мишена е затворен херметически в прозрачен стъклен съд, който минимализира разсейването на топлина към атмосферния въздух.

Френеловата леща, служеща за концентриране на слънчевите лъчи, е акрилна, с размери $28 \times 28\text{ cm}$ и дебелина 5 mm . Фокусното ѝ разстояние е около 15 cm . Предимство при този тип лещи е намаляването на теглото и дебелината в сравнение с обикновена изпъкнала стъклена леща.

Принципната схема на соларната термоелектрическа система е представена на фиг. 3.17. За охлаждането на студения радиатор се разчита или на въздух, или на вода. Ако системата е поставена над водната повърхност, респективно студеният радиатор да е потопен във вода, ефективността значително се повишава. Най-голямото предизвикателство и пречка пред по-масово внедряване на метода се явява създаването на автоматична система за задвижване на френеловата леща, която да поддържа постоянно фокусирана слънчевата светлина върху радиатора-мишена.



Фиг. 3.17. Принципна схема на соларния термоелектрически генератор [130].



Фиг. 3.18. Зависимост на генерираното електродвижещо напрежение E от температурната разлика ΔT – $E = f(\Delta T)$ на соларния ТЕГ.

Максимално достигнатата температурна разлика е $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, при която е измерено генерирано напрежение е от порядъка на 1 V (фиг. 3.18). Тази стойност е сравнително ниска, но е постигната при малки габаритите на системата и кратко време на експозиция. Целта на това концептуално устройство е да се представи възможността на термоелектрическите елементи да бъдат прилагани и в соларни електрически системи. Поради тази причина по-задълбочени изследвания и оптимизации на системата не са проведени.

§3.5. Изводи по Глава III

На базата на проведените експериментални изследвания и създадените реални модели и прототипи на ТГ системи могат да се направят следните изводи:

- Разработен е модел на термоелектрически генератор за оползотворяване на отпадна топлина от различни промишлени и естествени източници. Конструкцията му позволява конвертирането на температурната разлика между две течности в електричество.
- Проведени са изследвания при различни схеми на свързване между шестте модула на разработения термоелектрически генератор до $\Delta T\ 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерени са максималните стойности на напрежението при отворена верига – $U = 18,5\text{ V}$ и на тока на късо съединение – $I_k = 8,94\text{ A}$. Максималната генерирана мощност е $37,2\text{ W}$.
- Създаденият генератор е куплиран в автомобил, като е свързан към охладителната и горивната система. Максималното достигнато напрежения е 12 V .
- Разработен е и е представен прототип на маломощно токозахранващо устройство на базата на модули на Зеебек, захранвано единствено от топлината на пламък. Изходното напрежение е стабилизирано на 5 V от DC/DC преобразувател и успешно може автономно да зарадва батериите на мобилни устройства и да захранва светодиодно осветление няколко часа.

Глава IV – Термоелектрическите генератори за извличане на електрическа енергия от топлината на човешкото тяло

Устройствата, които не изискват периодично зареждане или подмяна на батериите, са по-конкурентоспособни и по-привлекателни за потребителите. За съжаление подобни автономни устройства (с някои малки изключения) са рядкост. Използването на топлината енергия от околната среда, промишлени производства или от човешкото тяло в настоящия момент се прилага рядко за осигуряване на захранване на различни консуматори.

Термоелектрическото захранване на маломощни модули, особено на такива за медицинско приложение, има няколко съществени предимства пред използването на конвенционални батерии [67, 70, 193]. Освен че производствената цена на термоелектрическите генератори обикновено е по-ниска от тази на батериите (особено от тази на литиевите батерии), ТЕГ са по-безопасни. Автономното термоелектрическо захранване не се нуждае от периодична подмяна на батерията, а това, в случай на имплантирано в тялото медицинско устройство, е от първостепенно значение.

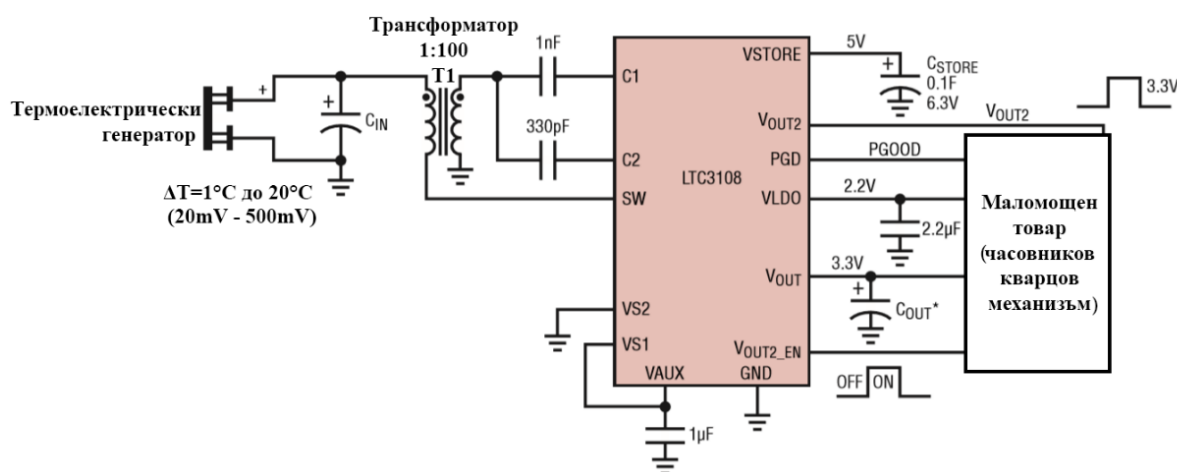
§4.1. Потенциал на човешкото тяло, като източник на топлинна енергия

Около 80% от енергията на човешко тяло се отдава към околната среда като топлина. Човек в покой отделя около $100 \div 120 \text{ W}$.

4.2. Избор на интегрална схема за събиране и управление на енергия от термоелектрически генератор

За целите на експериментите е избрана специализираната ИС от второ поколение – LTC 3108, поради ултраниското ѝ стартиращо напрежение, както и поради основното ѝ предназначение – работа с термоелектрически генератори [229].

Обхватът на входното (стартиращо) напрежение на DC/DC преобразувателя е от $0,02 \text{ V}$ (20 mV) до $0,5 \text{ V}$ (500 mV). Интегралната схема е произведена по нормален $0,8 \mu\text{m}$ CMOS процес с вертикални NPN транзистори и тънкослоен метален слой [22]. Типичното свързване на интегралната схема с периферните компоненти, необходими за работата ѝ (кондензатори, бобина и термоелектрически модул).



Фиг. 4.2. Електрическа схема на термоелектрически часовник.

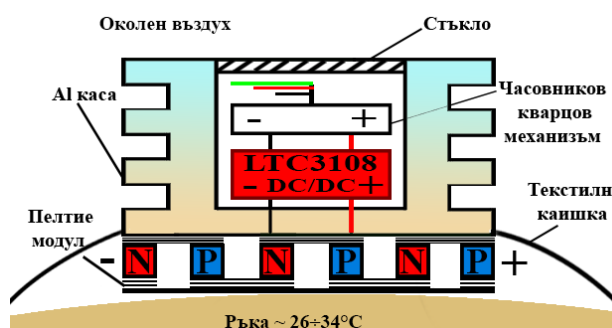
За да стартира схемата използва входен повишаващ трансформатор със съотношение между броя на първичните и вторичните намотки $1:100$. Характеризира се с висока ефективност на преобразуване при оптимален режим на работа. Основният ѝ изход може да бъде програмиран за четири фиксирани напрежения: ($2,35\text{ V}$, $3,3\text{ V}$, $4,1\text{ V}$ и 5 V), което обезпечава изискванията за захранване на широк спектър маломощни консуматори. Схемата приема сигнали от ТЕГ с температурни разлики между двете им страни от порядъка на $1\text{ }^\circ\text{C}$, което я прави идеална за събиране на енергия, когато има разлика в температурата между две повърхности или между повърхност и околната среда.

§4.3. Конструирание, реализиране и изследване на термоелектрически часовник

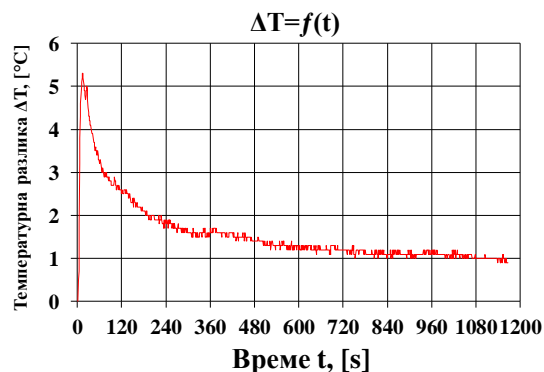
Използваният генераторен елемент е с площ 9 cm^2 , която контактува с $0,05\%$ от общата площ на епидермиса. Температурата на кожата в областта над китката (лъчевата кост), където е часовникът ($\sim 26 \div 34\text{ }^\circ\text{C}$), винаги е по-ниска от тази на торса ($\sim 37\text{ }^\circ\text{C}$) и варира според сезона, облеклото, степента на активност на човека и др.

Основната част на термоелектрическия часовник е неговият корпус – касата. Освен да побере всички елементи – DC/DC преобразувателя, кварцовия механизъм на часовника и елемент за запасяване на енергията, касата има и предназначението да служи като радиатор за студената страна на термоелектрическия генератор. Поради тази причина за изработката ѝ е избран алуминий. С цел подобряване на охлаждането, в касата са изрязани четири надлъжни канала, увеличаващи контактната ѝ площ с въздуха от околната среда. Корпусът е съставен е от две части, свързани чрез метрична резба. За прототипа е използван механизмът на стандартен кварцов часовник (*Miyota*).

Най-важните характеристики, от които зависи изборът на термоелектрическия генератор, са площта му и броят на съставлящите го термодвойки (P-N преходи). Изходното напрежение зависи пряко от броя на преходите, изграждащи генератора, като представлява сума от напреженията им. Използваният елемент на Пелтие TES1-12704 е изграден на базата на бисмут-калай (*BiSn*) със страни $30 \times 30\text{ mm}$, респективно с площ 9 cm^2 и 127 P-N прехода. Генераторът е залепен за предварително полираното дъно на касата посредством термопроводяща лепенка – 6 W/(m.K) , на полския производител *AG Chemia* с размери $30 \times 30 \times 1\text{ mm}$. Конструктивната схема на устройството е показана на фиг. 4.4.



Фиг. 4.4. Конструктивна схема термоелектрическия ръчен часовник.



Фиг. 4.5. Изменение на температурната разлика в зависимост от времето.

От време-температурната зависимост е видно, че температурната разлика е най-голяма в началния момент на поставянето на устройството на ръката. В този момент ΔT достига $5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Важно е да се отбележат и началните условия за провеждане на изследването – температура $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, липса на принудителна конвекция (абсолютно безветрие), човекът е в статична, седяща поза и със сравнително студени ръце. При тези условия схемата успява да захрани движението на часовника за 20 min , което показва, че те са неблагоприятни за ефективното функциониране на устройството.

Проведено е и изследване, при което човек се движи с нормален ход навън при температура на околната среда $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Устройството продължава да работи в продължение на повече от час.

Интегралната схема захранва консуматора при наличие на температурна разлика над $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. При такава температура ТЕГ генерира напрежение 20 mV , което е достатъчно, за да задейства интегралната схема. В изследвания диапазон на ΔT ($5,2 \div 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ТЕГ генерира напрежение от порядъка на $200 \div 20\text{ mV}$. Интегралната схема поддържа изключително стабилни стойности на изходните напрежения, като стойността на изходния ток се променя в зависимост от подаденото на входа напрежение от термоелектрическият генератор. Максималният измерен ток на късо съединение I_k е $200\text{ }\mu\text{A}$, получен при $\Delta T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

§4.4. Изводи по Глава IV

Проведените проучвания на потенциала на човешкото тяло като източник на топлинна енергия и изследванията на синтезирания термоелектрически часовник показват:

- Топлината излъчвана от човешкото тяло вследствие на метаболитните процеси, протичащи в него, може да бъде успешно използвана за захранване на преносими или имплантирани устройства.
- Извършен е кратък обзор на специализираните интегрални схеми за улавяне и преобразуване на енергия от околната среда, събирана посредством различни типове нисковолтови източници.
- Представената термоелектрическа система генерира електрическа мощност, правопропорционална на температурната разлика ΔT между кожата на тялото и околния атмосферен въздух.
- Максималната стойност на мощността на генератора е $3 \div 5\text{ mW}$ и се получава при $\Delta T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Площта на генераторния модул е 9 cm^2 , от което следва че максималната мощност за 1 cm^2 е $0,55\text{ mW}$.
- Реализиран е термоелектрически часовник, захранван единствено чрез топлината на човешкото тяло. Неговата конструкция позволява преобразуване на температурни разлики между човешкото тяло и температурата на околния въздух в енергия, необходима за автономното му захранване.
- Портативни, носими и имплантирани устройства, консумиращи мощност от $2 \div 3\text{ mW}$ или по-малка, включително безжични сензори за здравен мониторинг, могат успешно да бъдат захранвани с помощта на топлината на човешкото тяло.

Глава V – Моделиране на термоелектрически модули в режим на генерация на електродвижещо напрежение

§5.1. Изчислителни и симулационни методи за изследване и моделиране на термоелектрически модули

За нуждите на инженерната практика, свързани с разработване на термоелектрически генераторни системи, е необходимо моделиране и симулиране на работата на термоелектрическите модули в режим на генерация. Моделите могат да бъдат аналитични, математически и теоретико-експериментални [8].

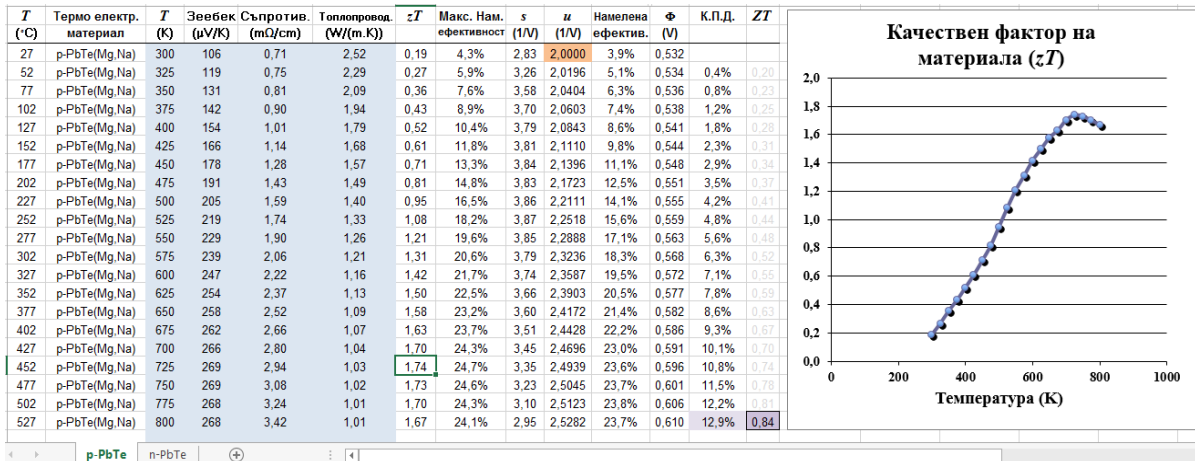
Обикновено в каталожните данни за даден ТЕГ се представят някои преобразователни характеристики. За проектиране и създаване на една високоефективна термогенераторна система, освен тези данни, са необходими и оптималните параметри на конкретния използван модул, а също и основните термоелектрически параметри на използваните за производството на модула материали – коефициент на Зеебек – α [V/K], специфична електропроводимост на материала – σ [S/m] и коефициент на топлопроводимост – κ [$W/(m.K)$]. За съжаление производителите не посочват тази информация в каталозите си относно елементите на Пелтие, работещи в режим на генерация. Именно те са по-достъпни и разпространени и са алтернатива на ТЕГ до определен температурен диапазон.

Специализираните калкулатори, програмите за симулации и изкуствените невронни мрежи представляват инструменти за изчисляване и предвиждане на параметрите и поведението на термоелектрически системи при различни условия. Основното им преимущество пред експерименталните методи е, че са по-лесни и удобни за ползване, но най-вече спестяват значително инженерно време.

5.1.1. Калкулатор за изчисляване оптимума на качествения фактор zT

Първата стъпка при проектиране на едно термоелектрическо устройство е избор на термоелектрически материали за изработка на модулите, участващи в изграждането му. За осигуряване на по-висока ефективност термоелектрическите материали трябва да бъдат максимално адаптирани, най-вече към температурните условия, в които ще работи конкретното оборудване.

Представен е калкулатор на базата на MS Excel, с помощта на който може да се изчисли оптимумът на качествения фактор zT в зависимост от свойствата на термоелектрическите материали, които зависят от температурата, както е описано в [179]. За тази цел са необходими данни за термоелектрическите свойства на изследвания материал във функция от температура. Първата от четирите колони със светлосин цвят (фиг. 5.1) съдържа информация за температурата в Келвин (K). В нея се записват данните за изследваните термоелектрически точки [228]. В следващите колони се записват зависимият от температурата коефициент на Зеебек в ($\mu V/K$), специфичното електрическо съпротивление ($m\Omega/cm$) и топлопроводимостта ($W/(m.K)$). Могат да бъдат използвани повече или по-малко редове данни от тези в примера – фиг. 5.1.



Фиг. 5.1. Табличен калкулатор за изчисляване на оптимума на качествения фактор zT.

За изчислението, първата температура е температурата на студената страна (300 K в примера), а 800 K е максималната температура на горещата страна. Тези две стойности определят температурния диапазон на изследване. В примера е зададена стъпка (температурен интервал) от 25 K между точките от данни, но тази стойност може да варира.

5.1.2. Калкулатор за изчисляване на основните характеристики на ТЕМ в режим на генерация

Разработен и представен лесен и удобен калкулатор, изчисляващ основните изходни характеристики на термоелектрически генератори в зависимост от приложената температурна разлика. Представеният калкулатор, синтезиран на базата на MS Excel, е максимално опростен и пригоден най-вече за бързи пресмятания.

Методът няма претенции за висока точност, но дава сравнително добра представа за потенциала на електрическата енергия, която може да се генерира при съответната температурна разлика. Може да се разглежда както като подходящ изчислителен инструмент за запознаване на студенти с ТЕГ, така и за навлизане в спецификата на областта от неспециалисти в тази сфера. За изчисление на максималното е.д.н., тока на късо I_k , максималната мощност P_{max} и вътрешното съпротивление $R_{втр}$ в определения температурен диапазон е необходимо въвеждане на следните изходни данни (фиг. 5.2):

T hot (°C)	T cold (°C)	ΔT (°C)	ΔT (K)	Брой ТД N	Зеебек α (µV/K)	Ik (µA/K)	е.д.н. (V)	Ток на "късо" Ik (A)	P max (W)	R вътр. (Ω)
140	20	120	393,15	127	378	92	5,76072	1,40208	8,07699	4,1087
T hot (°C)	T cold (°C)	ΔT (°C)	ΔT (K)	Брой ТЕГ Модули	Зеебек α (mV/K)	Ik (mA/K)	е.д.н. (V)	Ток на "късо" Ik (A)	P max (W)	R вътр. (Ω)
140	20	120	393,15	1	48	11,7	5,76	1,404	8,08704	4,10256

Попълнете вашите стойности за температури, генериран ток и напрежение в съответните оцветени полета.

*Калкулатора автоматично изчислява стойността на ΔT в градус °C и K.

Фиг. 5.2. Табличен калкулатор за изчисляване на основните параметри на термоелектрически модул в зависимост от приложената температурна разлика.

5.1.3. Симулация на изходните характеристики на ТЕМ в режим на генерация

Математическото моделиране е свързано преди всичко с начина на представяне на обектите, докато симулацията се свързва с обработката на информацията за тях. За целта се използват методи и алгоритми за изчисление, както и за решаване на уравнения и системи уравнения, представляващи моделите. Компютърната симулация осигурява управляема среда за изследване, в която могат да бъдат анализирани различни множества параметри и сценарии. Тя е изключително полезна при изследване на динамични системи, които трудно подлежат на математическо моделиране.

В този раздел е представен симулатор, който изчислява всички основни изходни характеристики на термоелектрически модул, чиито характеристики са зададени на входа на системата. С помощта на потребителското приложение може да се симулира работата на всеки произволно избран термоелектрически модул, ако за него са налични необходимите за симулацията входни данни [84, 218].

Входно/изходните данни могат да бъдат разделени на три групи:

1) *Геометрични параметри на ТЕГ модула и температури*

В тази входна част на симулатора се задават габаритните размери на термодвойките и на целия генераторен модул – фиг. 5.3:

2) *Термоелектрически свойства на материалите*

В тази част се избират материалите за p и n -типа полупроводник, като предварително са зададени термоелектрическите параметрите за няколко основни вида термоелектрически материали – Bi_2Te_3 , Mg_2Si , $SiGe$ и HMS (висши манганови силициди). Има възможност да бъдат въведени и стойностите за други материали, за които потребителят разполага със следните стойности:

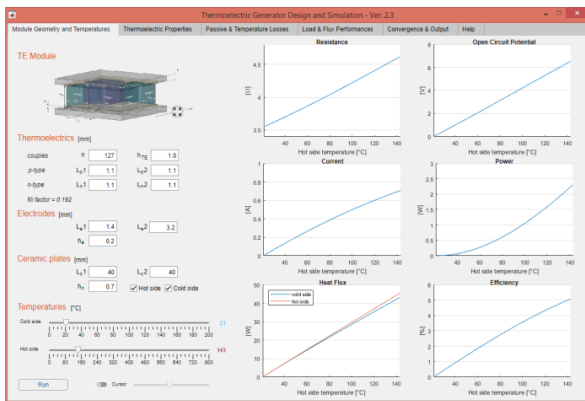
3) *Избор на материали за керамичните плочи, комутационните пластини и параметри на термичния интерфейс*

В тази част на симулатора се задават материалите за керамичните плочи – Al_2O_3 , SiC , AlN , и за комутационните пластини на термодвойките – Cu , Al и Ni . Отново има възможност да бъдат въведени и стойности и за други материали. За настройка на термичния интерфейс е необходимо да се въведат следните стойности:

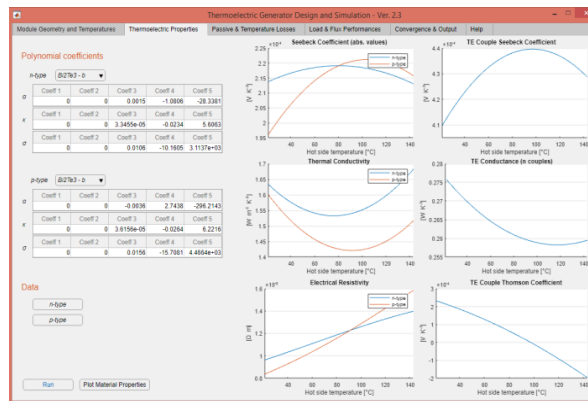
Резултати от моделирането

С цел проверка на степента на достоверност на симулацията са зададени входните данни за геометрията, температурите и материалите на изследвания в Глава II, §3.1. модул на Зеебек тип SP1848 – 27145. Визуализацията на резултатите от моделирането на термоелектрическия модул се извършва с помощта на програмен продукт – TeGDS, реализиран в средата на графичния редактор MATLAB. След първоначалното дефиниране на условията и проверка за коректното им въвеждане се изчисляват и представят последователно в графичен вид следните зависимости и преобразователни характеристики:

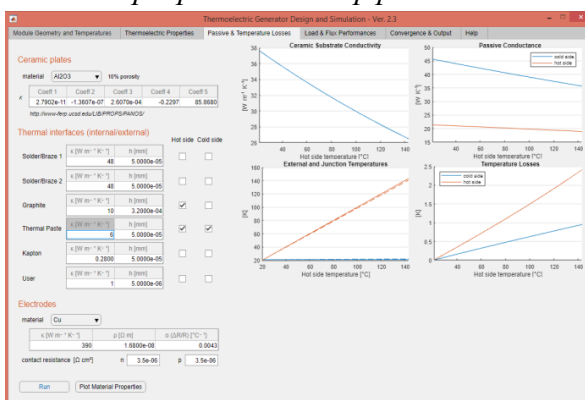
Следва представяне на получените резултати в графичен вид – фиг. 5.4 – 5.7:



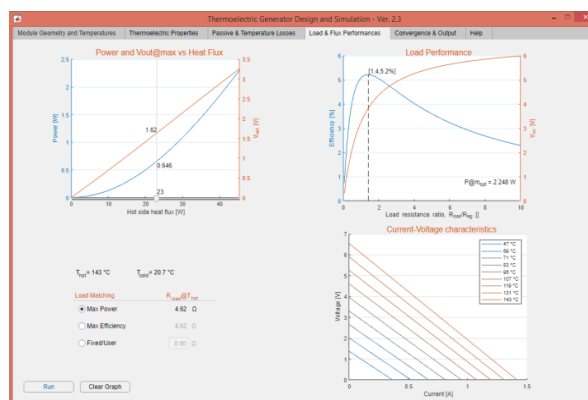
Фиг. 5.4. Геометрия на модула и температури – входно/изходна част на програмния интерфейс.



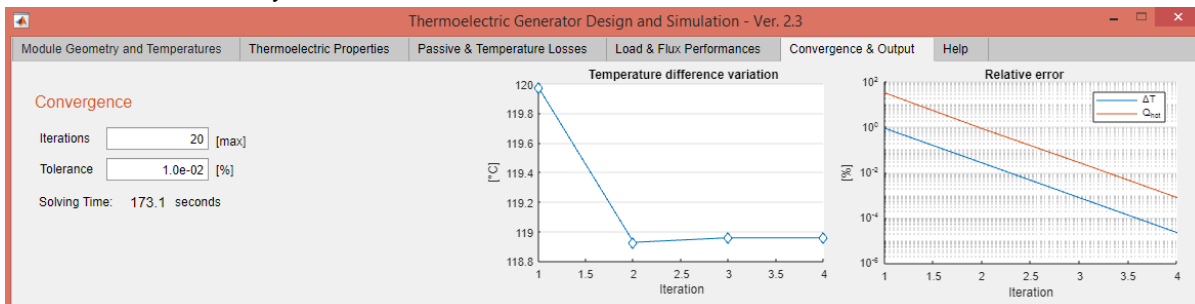
Фиг. 5.5. Термоелектрически свойства на P и N-тип материалите.



Фиг. 5.6. Пасивни и температурни загуби.



Фиг. 5.7. Товарна производителност и топлинен поток.

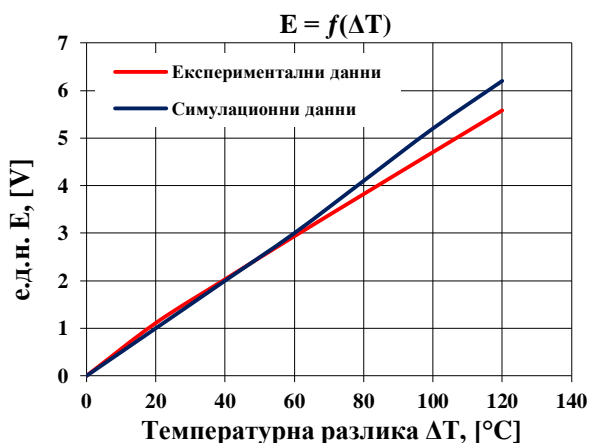


Фиг. 5.8. Конвергенция (сходимост) на симулацията.

5.1.4. Сравнение на резултати от симулацията с експерименталните данни

За верификация на симулационния модел е направено сравнение на резултатите за генерираното е.д.н. на празен ход от реалния експеримент и изходните данни, получени след симулацията. Реалните експериментални данни са средноаритметичните стойности от проведените две изследвания – при нарастване и при намаляване на температурната разлика (Глава II, §2.1, фиг. 2.4.). Резултатите са представени на фиг. 5.9.

Сравнението на резултатите от експериментално получените данни и тези от симулацията показват голямо съвпадение на данните. Разликите от порядъка на 10% се дължат на неточности във въведените входни данни, грешки при експерименталните измервания и на инертността на преноса на топлина.



Фиг. 5.9. Графична сравнителна характеристика за генерираното е.д.н.

От проведените експериментални и симулационни изследвания следва, че модули с по-голям брой термодвойки генерират по-високо изходно напрежение и по-нисък ток. Обратно, модули с по-малък брой термодвойки, но респективно с по-голямо сечение на клоновете генерират по-висок изходен ток. Следователно, за производството на термоелектрически генератор за конкретно приложение е много важна плътността на термодвойките.

Като недостатък на симулацията може да се изтъкне незадоволителното изчисляване на резултатите, когато зададената температурна разлика е по-ниска.

Симулационният модел на термоелектрически генераторен модул е средство, с което потребителят лесно може да изчисли множество основни параметри на ТЕМ и на полупроводниковите термодвойки. Резултатите от симулацията се дават във вид на преобразователни характеристики.

На база на получените резултати може да се подбере подходящ ТЕГ модул при проектирането на термоелектрическа генераторна система.

§5.2. Теоретико-експериментален модел на термоелектрическа генераторна система по метода на регресионния анализ

Задача на изследването е да се построи теоретико-експериментален модел за генерираното от ТЕГ електродвижещо напрежение E в зависимост от температурната разлика ΔT , осигуряваща условието за генерация, товарното съпротивление в електрическата верига R и броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие. В тази връзка температурната разлика ΔT [°C], товарното съпротивление R [Ω] и броят на включените термоелементи N [бр.] са избрани за управляващи фактори.

За да се построи регресионният модел за генерираното електродвижещо напрежение E , се прилагат методиката на планирания експеримент и методът на регресионния анализ.

За провеждане на експеримента е синтезиран ТЕГ, състоящ се от три термоелектрически модула на Пелтие TEC1 – 12710, изградени на базата на бисмут телурид (Bi_2Te_3) и 127 p-n прехода. Трите модула, изграждащи ТЕГ са притиснати между два алуминиеви радиатора. Докато долният топлообменник се загрява

В уравнение 5.1 и 5.2 са изчислени абсолютната (ΔX) и относителната (δX) грешка при най-високата температурна разлика 120°C , където $X_{\text{експ.}}$ – експериментални стойности, а $X_{\text{сим.}}$ – стойности, получени от проведената симулация.

$$\Delta X = X_{\text{сим.}} - X_{\text{експ.}} = 6,2 - 5,58 = 0,62 \quad (5.1)$$

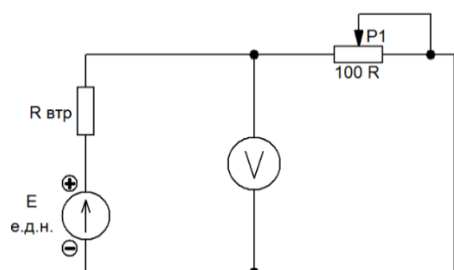
$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_{\text{експ.}}} \cdot 100\% = \frac{0,62}{5,58} = 11,1\% \quad (5.2)$$

посредством електрически нагревател, през горният циркуляционен радиатор протича студена вода. Чрез регулиране на приложеното върху нагревателя напрежение и потока на водата ΔT се стабилизира на 10, 50 и 90 °C.

Броят термодвойки N е еквивалентен на площта на модулите както следва: $N_{127} = 16 \text{ cm}^2$; $N_{254} = 32 \text{ cm}^2$; $N_{381} = 48 \text{ cm}^2$.

За снемане на преобразователните характеристики е използвано променливо товарно съпротивление (P1), осигуряващо нужните за анализа стойности на съпротивлението $R = (10; 55; 100) \Omega$. Електрическата схема на опитната постановка е представена на фиг. 5.11.

Използван е оптимален композиционен план за $n = 3$ фактора, които варират на три нива, и са представени в табл. 5.2. Броят на опитите е $M = 2^n + 2n + 1 = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15$.



Фиг. 5.11. Електрическа схема на опитната постановка за снемане характеристиките.

Таблица 5.2. Нива на факторите в плана на експеримента.

Фактори		Нива на факторите		
		-1	0	+1
x_1	$\Delta T, [^{\circ}C]$	10	50	90
x_2	$R, [\Omega]$	10	55	100
x_3	$N, [бр.]$	127	254	381

Въз основа на измерените стойности на изходния параметър, прилагайки методиката, представена в [2] и програмният продукт QStatLab [222], е построен регресионният модел за генерираното електродвижещо напрежение E :

$$E = -0,09632 + 0,01227 \cdot \Delta T + 0,01996 \cdot R - 0,00021 \cdot R^2 + 0,00017 \cdot \Delta T \cdot N + 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot R \cdot N. \quad (5.3)$$

Моделът е построен в следната последователност:

1. Определени са регресионните коефициенти и е извършена проверка на тяхната значимост по критерия на Стюдънт – табл. 5.4. Значимостта на регресионните коефициенти е определена при ниво на значимост $\alpha = 0,05$, като стойността на квантила на Стюдънт е $t_{(0,025;9)} = 2,26216$.

2. Извършена е статистическа проверка за адекватността на регресионния модел (5.3) по критерия на Фишер – табл. 5.5.

Моделът е адекватен, т.к. е изпълнено условието: $\hat{F} > F_{(\alpha, \nu_1, \nu_2)}$, където: \hat{F} – емпирична стойност на критерия на Фишер, определена като съотношение на оценката на дисперсията на случайната грешка S_R^2 и остатъчната оценка на дисперсията $S_{ост}^2$; $F_{(\alpha, \nu_1, \nu_2)}$ – квантил на Фишер, определен при $\alpha = 0,05$ и брой степени на свобода $\nu_1 = k - 1$ и $\nu_2 = M - k$; k – брой на значимите коефициенти в модела.

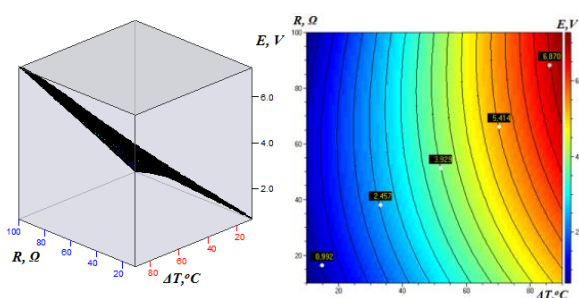
Моделът описва с висока точност зависимостта между генерираното от ТЕГ електродвижещо напрежение E и температурната разлика ΔT , товарното съпротивлението в електрическата верига R и броя на включените термоелементи N от

модулите на Пелтие, което се доказва с определената стойност на коефициента на детерминация \hat{R}^2 .

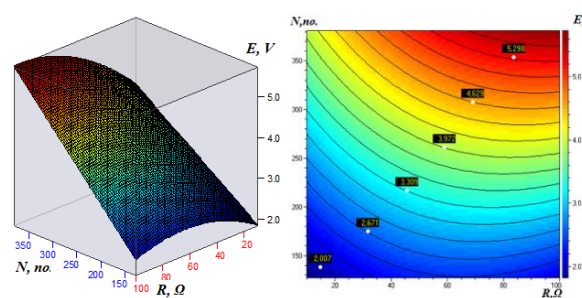
Графичната интерпретация на създадения модел за генерираното електродвижещо напрежение E в зависимост от температурната разлика ΔT , товарното съпротивление в електрическата верига R и броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие е показана на фиг. 5.12, фиг. 5.13 и фиг. 5.14.

Анализът на теоретико-експерименталния модел (5.3) и на построените въз основа на него графични зависимости (фиг. 5.12, фиг. 5.13 и фиг. 5.14), както и интерпретацията на резултатите от дисперсионния анализ (ANOVA), проведен с помощта на програмния продукт QStatLab (фиг. 5.15), показва:

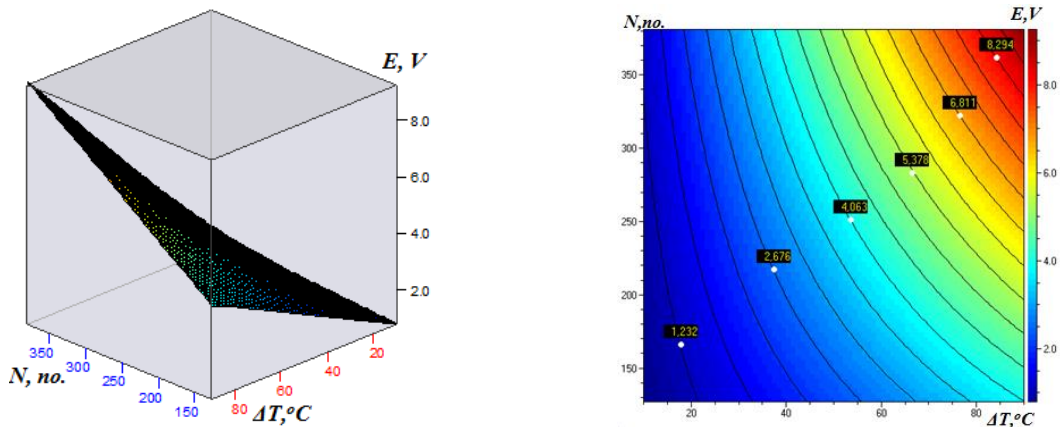
- Най-голямо влияние върху генерираното електродвижещо напрежение E оказва температурната разлика ΔT ($\hat{F} = 23,97529$; $p = 0,00042$), следвано от влиянието на броя на включените в термоелектрическата батерия термоелементи N ($\hat{F} = 6,81699$; $p = 0,01870$). С нарастване на ΔT и N , E също нараства.
- Влиянието на температурната разлика ΔT върху генерираното напрежение се увеличава с нарастване на броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие и намалява с намаляване на съпротивлението R .
- Влиянието на броя на включените в термоелектрическата батерия термоелементи N върху генерираното напрежение зависи от температурната разлика и от съпротивлението като нараства с увеличаване на ΔT и на R .
- Най-малко влияние върху генерираното напрежение E оказва промяната на включеното във веригата товарно съпротивление R ($\hat{F} = 0,99273$; $p = 0,41199$), като с увеличаване на R напрежението E нараства (фиг. 5.15 а). Влиянието на товарното съпротивление нараства с увеличаване на броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие и на температурната разлика ΔT .



Фиг. 5.12. Зависимост на генерираното напрежение E от температурната разлика ΔT и товарното съпротивление R .



Фиг. 5.13. Зависимост на генерираното напрежение E от товарното съпротивление R и броя на термоелементите N .



Фиг. 5.14. Зависимост на генерираното напрежение E от температурната разлика ΔT и броя на термоелементите N .

Таблица 5.6. Оптимални стойности на параметрите на синтезирания ТЕГ, определени по метода на случайното търсене и чрез генетичен алгоритъм.

Оптимални стойности на параметрите на ТЕГ			Генерирано електродвижещо напрежение E , [V]
ΔT , [°C]	R , [Ω]	N , [бр.]	
90	100	381	10,4391

§5.3. Моделиране на електрическите параметри на каскаден термоелектрически модул на Пелтие чрез невронна мрежа

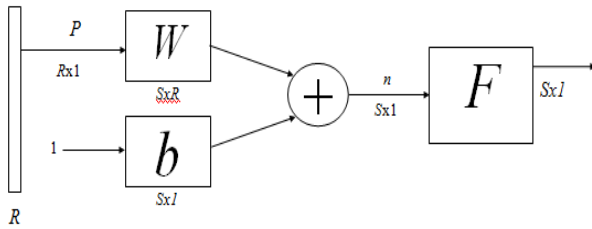
Каскадните модули на Пелтие се използват като високоефективни термоелектрически охладители, чиято работа се основава на ефекта на Пелтие. Те могат да се използват и като термоелектрически генератори, използващи ефекта на Зеебек. Целта е да се представи модел на каскаден Пелтие модул, работещ в режим на генерация, използвайки невронна мрежа. Получените експериментални данни за генерираното е.д.н. – E , в зависимост от температурната разлика ΔT са използвани за обучение на невронната мрежа и за прогнозиране на генерираното напрежение от каскадния модул.

5.3.1. Изкуствени невронни мрежи

Изкуствените невронни мрежи (ИНМ) са мощен съвременен инструмент за моделиране на различни сложни статични и динамични процеси [56, 57, 94, 96, 230]. Те успешно могат да се използват и за предвиждане на някои изходни реакции при термоелектрическите преобразуватели на енергия.

В изкуствения интелект съществува така нареченият конекционистки подход и именно невронните мрежи са типични негови представители. ИНМ са изградени от елементарни модели на биологичните неврони, от които пък е съставен човешкият мозък.

В зависимост от броя на слоевете в мрежата се говори за двуслойни НМ (при тях има само един входен и един изходен слой и липсват т.н. вътрешни или скрити слоеве) и многослойни НМ (при тях има поне един скрит слой). На фиг. 5.19 е представена типична блок-схема на еднослойна ИНМ.



Фиг. 5.19. Архитектура на еднослойна изкуствена невронна мрежа.

ИНМ се състои от:

- R – стойност на входния вектор p ;
- W – теглова матрица;
- b – отклонение;
- F – функция за активиране;
- a – изход на слоя.

Изходът на слоя се изчислява като:

$$a = f\left(\sum_{i=1}^R w_i p_i + b\right) \quad (5.4)$$

5.3.2. Предвиждане на генерираното електродвижещо напрежение на празен ход чрез невронна мрежа

Основната задача е да се предвиди генерираното изходно напрежение E въз основа на приложената разлика в температурата на термоелектрическият генератор. За решаването ѝ се използва ИНМ от контролирания тип обучение. Входните двойки от $\{p, t\}$ трябва да бъдат предоставени, когато:

- p – Входен вектор.
- t – Целева стойност.

Изкуствената невронна мрежа се състои от два слоя неврони, като първият слой е от осем неврона и прилага следната функция на активиране:

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (5.5)$$

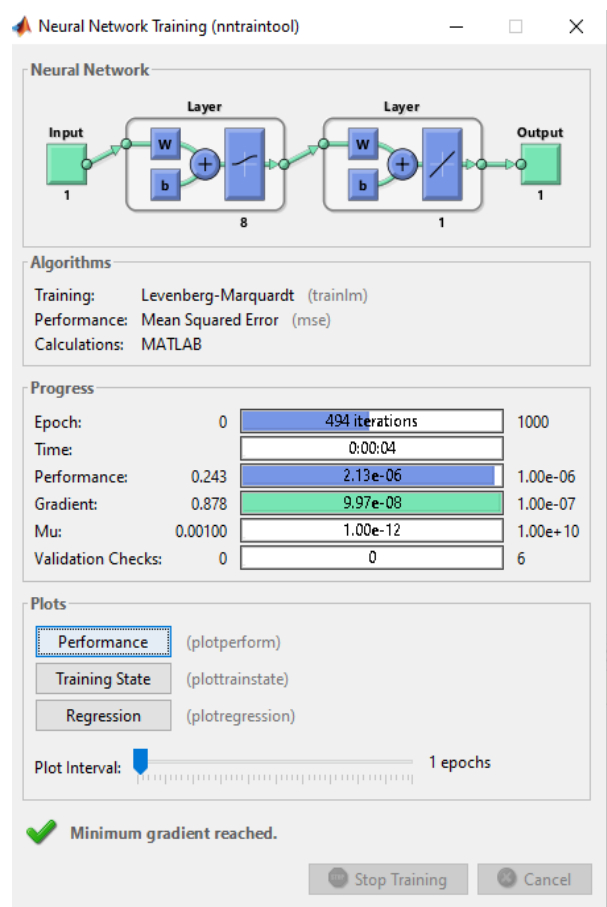
Вторият слой се състои от един неврон и прилага линейна функция:

$$f(n) = n \quad (5.6)$$

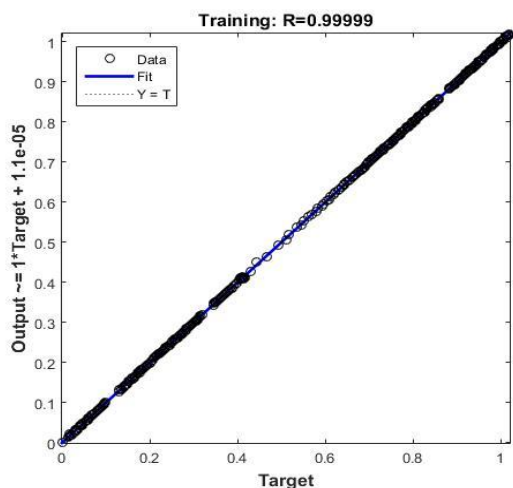
На фиг. 5.20 е показана архитектурата на изкуствена невронна мрежа.

Обучението преминава през 494 епохи. Във всяка епоха се изчисляват средната квадратична грешка и градиентът. Експерименталните данни са разделени на две групи вектори – първият е за обучението на ИНМ, вторият – за валидиране на мрежата.

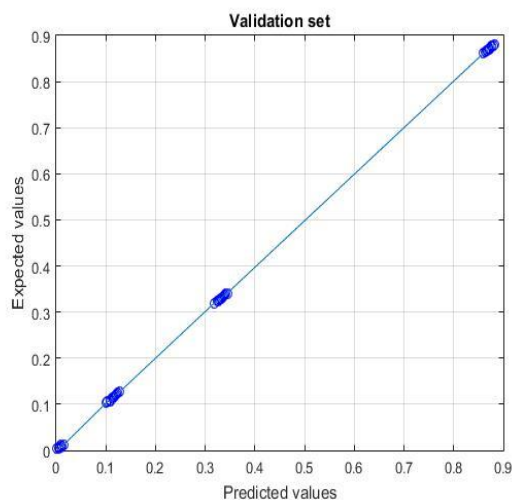
На фиг. 5.21 и фиг. 5.22 са показани регресионните линии на вектори за обучение и валидиране. В графиката за валидиране на оста X са прогнозираните стойности от ИНМ, а на оста Y – наблюдаваните стойности от експеримента.



Фиг. 5.20. Архитектурата на изкуствена невронна мрежа



Фиг. 5.21. Регресионна линия на обучаващи вектори.



Фиг. 5.22. Регресионна линия на валидиращи вектори.

Обучителните вектори са 348 и се състоят от входни вектори p и техните желани стойности t , като при всяка итерация се изчислява разликата между изходната стойност на мрежата и желаната стойност. В края на процеса грешката е обобщена, за да се постигне окончателната грешка в мрежата.

Въз основа на действително получените експериментални резултати е синтезирана изкуствена невронна мрежа. Когато тя се обучава, в мрежата се прилага валидиращият набор, който се състои от 40 вектора, за да се прогнозира техните стойности. Може да се види, че ИНМ правилно прогнозира стойностите от набора за валидиране.

5.3.3. Предвиждане на генерирания ток и на електродвижещото напрежение в зависимост от съпротивлението на товара чрез невронна мрежа

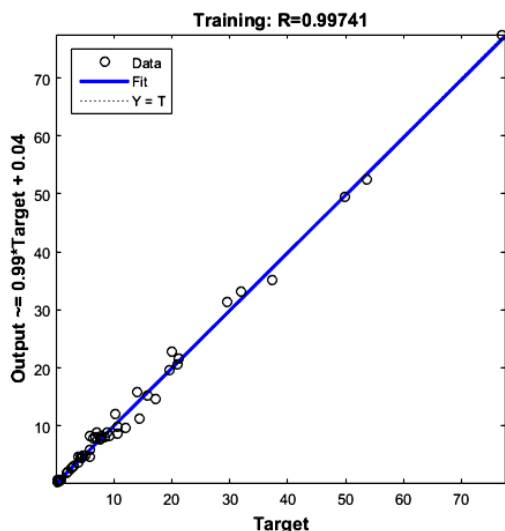
В тази част са представени резултатите от моделирането на електрическите параметри – ток I и напрежение E на многостъпален модул на Пелтие, работещ в режим на генерация, използвайки контролирано обучена невронна мрежа. Извършен е предварителен експеримент за точно определяне на генерирания ток и напрежението в зависимост от приложената температурна разлика ΔT и товарното съпротивление – R .

Невронната мрежа се състои от два слоя неврони. Първият слой използва хиперболична допирателна функция за активиране и има 14 неврона:

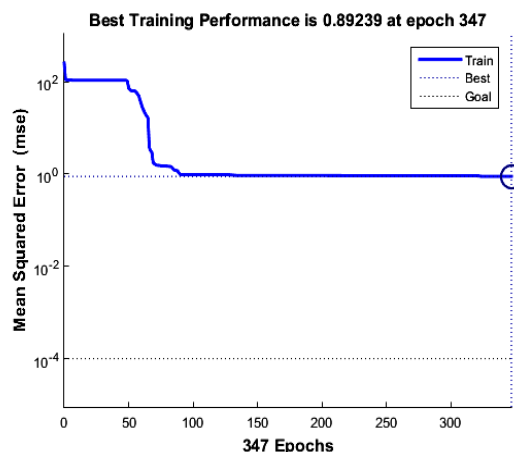
$$f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (5.7)$$

Вторият слой се състои от два неврона и прилага функцията на линейно активиране (5.6).

На фигура 5.24 е показана регресионната линия, която показва колко добре невронната мрежа може да предвиди данните от тренировъчния набор. На фигура 5.25 е показана грешката по време на епохите, които на последния етап са 347.



Фиг. 5.24. Регресионна линия между цели и реални резултати.



Фиг. 5.25. Грешки по време на епохите.

От получени крайни резултати става ясно, че невронна мрежа от контролиран тип обучение може успешно да се използва за прогнозиране на генерираното електродвижещо напрежение – E и на тока – I на многостъпален модул на Пелтие в зависимост от приложената температурната разлика – ΔT и товарното съпротивление – R .

§5.4. Изводи по Глава V

На базата на проведените симулации и създадените модели на термоелектрически генераторни модули и системи могат да се направят следните изводи:

- Представен е специализирани калкулатор на базата на MS Excel, изчисляващи оптимума на качествения фактор на различни термоелектрически материали и основните им параметри.
- Представено е потребителско приложение, реализирано в средата на графичния редактор MATLAB, позволяващо удобно симулиране на изходните генераторни характеристики на термоелектрически модули.
- Създаден е теоретико-експериментален модел за генерираното от ТЕГ електродвижещо напрежение E , като са приложени методът на регресионния анализ и програмният продукт QStatLab. Моделът отразява комплексното влияние на параметрите на ТЕГ – температурна разлика ΔT , товарно съпротивление в електрическата верига R и броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие. Установено е, че най-голямо влияние върху генерираното електродвижещо напрежение оказва температурната разлика ΔT , като това влияние нараства с нарастване на броя на включените термоелементи N от модулите на Пелтие и на съпротивлението R .
- Проведена е оптимизация по метода на случайното търсене с нарастваща плътност и по генетичен алгоритъм и са определени оптимални стойности на параметрите на синтезирания ТЕГ (температурна разлика $\Delta T = 90$ °C; товарно

съпротивление $R = 100 \Omega$; брой на включените термоелементи $N = 381$), при които се получава максимална стойност на генерираното от ТЕГ електродвижещо напрежение E .

- С помощта на изкуствена невронна мрежа са изследвани изходните характеристики на каскаден термоелектрически модул на Пелтие в генераторен режим. Създадената невронна мрежа е обучена с помощта на реално получени експериментални резултати. Направената верификация на симулираните стойности показва добро съвпадение с експерименталните резултати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Настоящият дисертационен труд е посветен на проблеми, свързани с термоелектрическите преобразуватели на енергия, и в частност с термоелектрическите генератори. Направен е обзор на съвременното им състояние – разгледани са термоелектрическите ефекти, устройството на модулите и основните режими на работа. Направена е класификация както на известните термоелектрически елементи, така и на характерните им особености и на материалите, необходими за производството на високоефективни, ниско- и високотемпературни термоелементи.

2. Представено е математическо описание на електрически и термичен модел на термоелектрически генераторни модули и системи. Описани са процесите и зависимостите във всеки един от основните им съставни компоненти. Разгледани са областите на приложение на термоелектрическите генератори.

3. Проведени са експериментални изследвания на работата на различни видове термоелектрически модули на Зеебек и Пелтие в режим на генериране на електродвижещо напрежение. Направени са анализ и сравнение помежду им. Разработени са лабораторни стендове за постигане на високи температурни разлики, необходими за изследването на термоелектрическите генератори. Чрез съвременни методи и модерна измервателна апаратура са изследвани техните характеристики, изходната мощност и потенциалът им да бъдат използвани като алтернативни източници на чиста енергия. Експериментално е доказана пряката зависимост между температурната разлика и генерираната електрическа мощност.

4. Сравнителният анализ между получените експериментални резултати за модули на Зеебек и Пелтие показват, че нискотемпературните термоелектрически модули на Пелтие успешно могат да се използват и за генериране на електродвижещо напрежение.

5. Конструирани, реализирани и изследвани са следните термоелектрически генераторни системи:

- Термоелектрически генератор за отпадна топлина, изграден от шест модула на Пелтие, преобразуващ температурната разлика на различни течности в електрическа

енергия. Експериментално е доказан потенциалът на системата за оползотворяване на топлината от отпадни води от бита, промишлеността, транспортни средства и геотермални източници.

— Маломощно токозахранващо устройство за портативни консуматори, изградено на базата на елементи на Зеебек, захранвано единствено от топлината на горящ пламък.

— Прототип на термоелектрическа соларна система с френелова леща, която преобразува топлината на слънчевата радиация в нископотенциална електрическа енергия.

— Прототип на термоелектрически часовник, захранван единствено чрез топлината на човешкото тяло. Конструкцията му позволява преобразуване на температурните разлики между човешкото тяло и на околния въздух в електродвижещо напрежение.

6. За моделиране и симулация на термоелектрически материали, модули и системи са представени следните програмни средства, методи и подходи:

— специализиран калкулатор на базата на MS Excel, изчисляващ оптимума на качествения фактор на различни термоелектрически материали;

— бърз и удобен специализиран табличен калкулатор, изграден на базата на MS Excel, изчисляващ основните изходните характеристики на генераторен модул при зададена температурна разлика, броя термодвойки и коефициента на Зеебек;

— потребителско приложение, реализирано в средата на графичния редактор MATLAB, което позволява симулиране на изходните генераторни характеристики на термоелектрически модули, като потребителят има възможност да задава голям брой входни параметри: геометрични, температурни и др.;

— чрез планиран експеримент по оптимален композиционен план и с помощта на метода на многофакторния регресионен анализ е построен теоретико-експериментален модел за генерираното електродвижещо напрежение от термоелектрическа генераторна система, състояща се от три модула на Пелтие, отразяващи комплексното влияние на температурната разлика от двете страни на модулите ΔT , на товарното съпротивление R и на броя на термоелементите N , изграждащи модулите;

— чрез едноцелева оптимизация по метода на случайното търсене с нарастваща плътност и по генетичен алгоритъм са определени оптималните стойности на параметрите на синтезирания термоелектрически генератор, при които се получава максимална стойност на генерираното електродвижещо напрежение;

— с помощта на изкуствена невронна мрежа са изследвани изходните характеристики на каскаден термоелектрически модул на Пелтие в генераторен режим, като направената верификация на симулираните стойности показва добро съвпадение с експерименталните резултати.

В заключение може да се каже, че настоящата дисертация представлява комплексно теоретично и приложно изследване на термоелектрическите модули на Пелтие и Зеебек в генераторен режим, както и на генераторни системи и устройства, в които те участват, приложими в бита, транспорта и промишлеността. Целта на дисертационния труд е постигната чрез изпълнението на поставените задачи.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. По метода на регресионния анализ е построен теоретико-експериментален модел на термоелектрическа генераторна система, отразяващ комплексното влияние на температурната разлика, товарното съпротивление и площта (броя на термодвойките) на модулите върху генерираното термоелектродвижещо напрежение. Определени са оптималните стойности на параметрите на синтезирания термоелектрически генератор, при които се получава максимална стойност на генерираното електродвижещо напрежение.

2. С помощта на изкуствена невронна мрежа са моделирани изходните параметри на термоелектрически каскаден модул на Пелтие, работещ в генераторен режим.

3. Създадени са термоелектрически генератори, оползотворяващи отпадна топлина от различни промишлени и естествени източници. На базата на елементи на Пелтие са разработени и изследвани термоелектрически генератор, преобразуващ температурната разлика между две течности в електродвижещо напрежение, термоелектрически генератор, куплиран в автомобил и термоелектрически часовник, захранван единствено от топлината на човешкото тяло.

4. На базата на термоелектрически генератор са разработени и изследвани маломощно захранващо устройство, използващо топлината на пламък, и термоелектрическа соларна система с френелова леща, която преобразува топлината на слънчевата радиация в електрическа енергия. Изходното напрежение е стабилизирано на 5 V и успешно може да заражда батериите на мобилни и портативни устройства.

5. Създадени са таблични калкулатори на базата на MS Excel, изчисляващи основните изходни характеристики и параметри на генераторен модул при зададена температурна разлика, брой термодвойки и коефициент на Зеебек.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Конструиран е лабораторен стенд за изследване на термоелектрически модули в генераторен режим. Изследвани са едностъпални и каскадни термоелектрически модули и тяхната съвместна работа. Построени са преобразувателните и товарните им характеристики. Приложен е иновативен подход за измерване и записване на получените резултати с висока точност и скорост, като са използвани съвременни измервателни уреди, позволяващи връзка с компютър чрез специализиран софтуер.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Списък на публикуваните статии

1. Ivanov, K., A. Aleksandrov. „Method of study of thermoelectric generators“, 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drivers and Power Systems (ELMA) – Proceedings, IEEE, ISBN 978-1-7281-1413-2, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771649
2. Ivanov, K., A. Aleksandrov, I. Belovski. „Synthesis and study on waste heat thermoelectric generator“, 2019 II International conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech) – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-1-7281-4556-3, DOI: 10.1109/HiTech48507.2019.9128262
3. Petkov, T., I. Belovski, K. Ivanov, A. Aleksandrov. „Modeling the parameters of a cascaded Peltier module using neural network“, 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA) – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-1-7281-4346-0, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167122
4. Ivanov, K. „Design, realization and study of thermoelectric watch“, 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA) – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-1-7281-4346-0, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167076
5. Ivanov, K., A. Aleksandrov. „Design and study of an automotive thermoelectric generator“, 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-1-7281-0362-4, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279082
6. Ivanov, K., I. Belovski, A. Aleksandrov. „Study of multi-stage Peltier module in generator mode“, 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE) – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-1-7281-0362-4, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279106

ЦИТИРАНИЯ НА ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Списък на цитиранията

1. Škalic, I., I. Marinović. „Analysis of Thermoelectric Generators Thermally Connected in Serial and Parallel Combinations“, Smart and Sustainable Technologies (SpliTech) 2020 5th International Conference on, pp. 1-4, 2020. – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-953-290-105-4, DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243774
2. Škalic, I., I. Marinović. „Energy Harvesting on Power Amplifiers Based on Application of Thermoelectric Generators“, Information Communication and Electronic Technology (MIPRO) 2020 43rd International Convention on, pp. 58-61, 2020. – Proceedings, IEEE, ISBN: 978-953-233-099-1, DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245110

DEVELOPMENT, STUDY AND APPLICATION OF THERMOELECTRIC GENERATORS BASED ON PELTIER ELEMENTS

Kaloyan Ivanov Ivanov

ABSTRACT

It is indisputable fact that the anthropogenic activity is inevitably associated with the release of heat. Especially after the industrial revolution, in every human activity – extraction and processing of raw materials, use of vehicles with conventional engines, manufacture of various products and goods, significant amounts of heat are released into the environment. In the vast majority of cases this heat is not used. Quantitative estimates of industrial waste heat amount to about 60%. Use of waste heat is an important factor in the increasing of energy efficiency for any type of system. Missing the possibility for purposeful use of the released heat, in addition to material losses, leads also to negative climate changes.

A permanent solution for the conversion of heat into electricity is the use of thermoelectric converters.

Unlike photovoltaic and wind power generation systems, thermoelectric converters are less known to the general consumer. Conventional methods for energy production rely on the natural phenomena sun and wind, while for thermoelectricity the presence of a temperature difference between the working sides of the converting elements is sufficient.

Thermoelectric energy conversion, as a method for direct transformation of temperature difference into electrical energy, is based on effects occurring in solids – Seebeck effect, Thompson effect, Joule effect and others. The unique properties of the thermoelectric energy sources, such as the absence of moving parts, the possibility of using low-potential heat energy, complete environmental cleanness and silent operation, determine the undeniable advantages of using thermoelectric generators as autonomous energy sources. This type of generators is used successfully in space equipment, in medicine, in industry and in everyday life.

Thermoelectric conversion, in which the temperature difference is transformed directly into electrical energy, is based on the Seebeck effect. This effect of thermo-electro generation is discovered and described in 1821 by the German-Estonian physicist Thomas Seebeck. The essence of this phenomenon is that in the presence of a temperature difference between two different metals or semiconductors, soldered in one end, between their free ends a thermo-electromotive force is created. This causes a direct current to flow in the circuit when a consumer is connected.

The studies in the field of thermoelectricity begin with the work of the Soviet academician A. F. Ioffe [13, 14]. He proves that the most suitable materials for thermoelectric conversion are the impure semiconductors. Ioffe is the first scientist who proposes the Peltier effect to be used to create a thermoelectric refrigeration systems of a new type – based on solid elements.

Since the beginning of the century there is a growing interest in thermoelectric generators. The studies and the development of new thermoelectric materials [109, 152, 160, 181, 196, 197, 202, 203] give reason to expect a significant increase in the efficiency of the thermoelectric elements in the near future. Undoubtedly, the revived interest in thermoelectricity is associated also with the environmental problems resulting from the use of traditional methods of electricity production – exhaust gas emissions, environmental pollution, the greenhouse effect, etc. Thermoelectric generators are absolutely safe for the environment. They lack moving and wearing components, which leads to silent operation, absence of any vibration and possibility of stable and continuous operation.

Thermoelectric energy converters have some other characteristic advantages, such as:

- extremely high reliability and compactness;
- very long service life (usually over 20 years);
- ecology and much lower chemical activity unlike the rechargeable batteries;
- suitable for remote applications in places where there is no electricity;
- independence of the parameters of the thermoelectric modules from their position and orientation in space;
- lack of necessity for periodic technical maintenance;
- capable to operate at high temperatures.

Today the market offers a wide variety of thermoelectric energy converters – mainly thermoelectric refrigerators. Unfortunately, in their catalog data, the manufacturers do not specify parameters regarding the generation of thermoelectric voltage. This requires a thorough study of their performance and conversion characteristics with a view to their application as active components in different systems with thermoelectric power.

The purpose and the goals of this thesis relate to the complex and detailed study of the parameters and characteristics of the thermoelectric generators and the seeking of opportunities for their optimization through modeling and simulation, development of highly efficient thermoelectric systems for production of electricity from various heat sources and their adapting to specific applications for the everyday life and the industry.

Keywords: Seebeck effect, Thermoelectric generator, Temperature difference, Peltier Module, Systems for electrical energy collecting, Alternative energy source, Waste heat utilization, Energy harvesting, Human body heat, Wearable device, Neural Network.