

<u>ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ</u>



МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ КАТЕДРА "ТЕОРИЯ НА МЕХАНИЗМИТЕ И МАШИНИТЕ"

маг. инж. Янко Иванов Ралев

СИСТЕМИ ЗА ДОБИВ НА ЕНЕРГИЯ ЧРЕЗ СПЛАВИ С ПАМЕТ НА ФОРМАТА

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "ДОКТОР"

Област: 5.1 Технически науки

Професионално направление: 5.1 "Машинни инженерство" Научна специалност: 02.19.08 "Динамика, якост и надеждност на машините, уредите, апаратите и системите"

> Научен ръководител: проф. д-р инж. Тодор Стоилов Тодоров

> > СОФИЯ, 2018г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Теория на механизмите и машините" към Машинно-Технологичен Факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 29.01.2018г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 12.06.2018г.от 15.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед ОЖ- 64 / 20.02.2018г. на Ректора на ТУ-София в състав:

- 1. чл. кор. проф. д.т.н. инж. Венелин Стоянов ЖИВКОВ МТФ, кат. ТММ външен хабилитиран за ТУ-София
- 2. проф. д-р инж. Веселин Илиев ПАВЛОВ ФА, кат. АЕЗ външен хабилитиран за ТУ-София
- 3. доц. д-р инж. Аспарух Любомиров АНДОНОВ МТФ, кат. ТММ външен хабилитиран за ТУ-София
- 4. доц. д-р инж. Вътко Александров ДРАГАНОВ МТФ, кат. ТММ Председател на първото заседание
- 5. проф. д-р инж. Тодор Стоилов ТОДОРОВ МТФ, кат. ТММ научен ръководител на докторанта

Рецензенти:

- 1. чл. кор. проф. д.т.н. инж. Венелин Стоянов ЖИВКОВ МТФ, кат. ТММ
- 2. доц. д-р инж. Вътко Александров ДРАГАНОВ МТФ, кат. ТММ

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно-Технологичен Факултет на ТУ-София, блок № 3 кабинет №3230.

Дисертантът е редовен докторант към катедра "Теория на механизмите и машините" на факултет Машинно-Технологичен Факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Янко Иванов Ралев Заглавие: Система за добив на енергия чрез сплави с памет на формата Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

Актуалност на проблема

Добивът на енергия от алтернативни енергоизточници е една от най-актуалните теми в наши дни. Консумацията на все повече енергия води до динамичното изчерпване на ресурси като въглища, нефт, земен газ и налага търсенето на нови технологии за тяхната замяна. Разработката на така наречените възобновяеми енергийни източници (ВЕИ), които използват енергийния потенциал от слънце, вятър, вода и други природни ресурси дават сравнително добри резултати, въпреки относително ниската си ефективност и високата цена.

Цел на дисертационния труд:

Цел на дисертационния труд е създаване и изследване на устройства за преобразуване на топлинна в електрическа енергия чрез СПФ.

Основни задачи за постигане на целта:

- 1. Създаване на стенд за изследване на свойствата и характеристиките на СПФ.
- 2. Експериментално и теоретично изследване на сплави с памет на формата, необходими за проектиране на енергийни харвестери.
- 3. Проектиране на система за преобразуване на топлинна в електрическа енергия с прекъсване на топлинния поток чрез СПФ и пиезоелектрични преобразуватели.
- 4. Проектиране на комбиниран енергиен харвестер със СПФ, базиран на първично термо-механично преобразуване и вторично механо-електрично енергийно преобразуване.
- 5. Създаване на динамични модели на системите за преобразуване на енергия.
- 6. Симулиране и изследване на динамичните модели и оптимизиране на параметрите.

Практическа приложимост и Научно-приложни приноси

Изработен е стенд за изследване на СПФ, с който е обогатена научно-техническата база на ТУ-София и е създадена възможност за повишаване на знанията в областта на СПФ на студенти, докторанти и преподаватели.

Изработен е енергиен харвестер със СПФ с прекъсване на топлинния поток и опитна постановка за изследването му. Проведени са експерименти, потвърждаващи теоретичните резултати.

Изработен е енергиен харвестер със СПФ и пиезоелектрична конзола тип СПФ-ПЕХ и опитна постановка за изследването му. Проведени са експерименти, потвърждаващи теоретичните резултати.

Създаден е стенд за калибриране на силов сензор, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създаден е стенд за калибриране на сензор за позициониране, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създаден е стенд за калибриране на акселерометър, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създадена е методика и за изработване и изследване чрез стенд за калибриране на термодвойка, намираща приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Апробация

Части от дисертационния труд са докладвани на:

- 1. Първа научна конференция за млади учени, докторанти и постдокторанти "YoungFIT" 2014, Проект BG051PO001-3.3.06-0046 "Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени в областта на виртуалното инженерство и индустриалните технологии".
- 2. Международна научна конференция "70 години МТФ" 11-13 Септември, 2015, Созопол, България.
- 3. International Conference on Engineering Vibration, Sofia, Bulgaria, 4-7 September, 2017."

Публикации по дисертационния труд

- 1 Ралев Я., "Двигатели със сплави с памет на формата: кратко проучване", Първа научна конференция за млади учени, докторанти и постдкоторанти "YoungFIT" 2014
- 2 Тодоров Т., Николов Р., Ралев Я., Изследване на термохарвестер от сплави с памет на формата, Годишник на Международна научна конференция "70 години МТФ" 11-13 Септ. Созопол, 2015, стр. 595 599.
- 3 Ралев Я., Тодоров Т., Стенд за изпитване на сплави с памет на формата, Българско списание за инженерно проектиране, бр. 27, 2015, стр. 5-10.
- 4 Тодоров Т., Николов Р., Ралев Я., Експериментално изследване на сплави с памет на формата чрез специализиран стенд, Българско списание за инженерно проектиране, бр. 29, апр.2016, стр. стр. 51-56.
- 5 Ралев Я., Тодоров Т., Комбиниран топлинен пиезоелектричен генератор на електрическа енергия със сплави с памет на формата, CAx Technologies, 4, 2016, pp. 46-51.
- 6 Ралев Я., Тодоров Т., Моделиране на сплави с памет на формата и стенд за тяхното изследване, САх Technologies, 4, 2016, pp. 52-59.
- 7 Todorov T., Nikolov N., Todorov G., Ralev Y., Modelling and Investigation of a Hybrid Thermal Energy Harvester, International Conference of Engineering Vibrations, 2017
- 8 Тодоров Т., Тодоров Г., Ралев Я., Вибрационен термоелектричен генератор, заявка за полезен модел, 2017

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 207 страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 99 литературни източници, като 1 са на латиница и 77 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 146 фигури и 17 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Глава I Обзор

Интелигентните технологии придобиват все по-голямо значение за развитието на всички клонове на науката и съвременната индустрия, благодарение на своя огромен потенциал и практическа приложимост. Тези технологии се използват за справяне с предизвикателствата в: космонавтиката, въздухоплаването, автомобилостроенето, медицината и много други. Едно от съвременните технологични предизвикателства, каквото е оползотворяването на отпадъчна енергия от околната среда в по-голямата си част се основава на развитието на модерните технологии.

Концепцията за събиране на енергия като цяло се отнася до процеса на използване енергията от околната среда, която се преобразува най-вече в електрическа енергия, за да захрани малки консуматори, независими електронни устройства, батерии и други.

В природата енергията съществува под различни форми и състояния, което предизвиква учените да търсят все по-нови методи за нейното усвояването. Намаляването на природните ресурси в световен план представлява огромен проблем за човечеството, който може да бъде частично решен с развитието на технологиите в производството (добива) на чиста и евтина енергия. В последните години се появиха и нов вид устройства за добив на енергия, наречени в англоезичната литература "energy harvester" (преобразовател, събирач, жетвар или комбайн на енергия) Тези устройствата добиват и преобразуват енергия от околната среда и я превръщат в електрическа енергия. Електрическата мощност на тези устройства може да бъде от µW до mW и дори да достигне няколко W, като генерираната енергия се събира в батерия, кондензатор/и или се консумира директно. Така наречените "harvesters" "харвестер" могат да бъдат проектирани като самостоятелни елементи или да се вграждат в по-големи устройства. Те са познати с наименованията Microelectro Mechanical System (NEMS). Тези малки преобразователи на енергия, (MEMS) и (NEMS) имат своето предназначение, а имено да трансформират енергия от околната среда и да захранват консуматори в системи изолирани от електрическа енергия. Такива системи са: безжични сензори, устройства монтирани в/върху човешкото тяло, космически апарати, машини, и др.

На базата на направените проучвания е установено, че възможностите за създаване на микрогенератори за преобразуване на енергия на базата на ефекта на паметта на формата не са изчерпани. Такива възможности се разкриват предимно за устройства, при които топлинната енергия се преобразува в междинна кинетична или потенциална енергия и тази механична енергия се преобразува в електрическа. На базата на тези заключения е формулирана целта на дисертацията.

Глава II. Стенд за изпитване на сплави с памет на формата

2.1 Определяне характеристиките, подлежащи на изследване и изпитване.

При изследване на СПФ могат да се снемат редица характеристики, които не са описани в техническата им документация. Тези изследвания са необходими за проектиране на нови устройства и системи. Създаването на този стенд е една стъпка напред в учебната и научно-изследователската работа със сплавите с памет на формата.

За целта е предвидено да се изследват следните характеристики:

- Температура *T* във функция на времето T = T(t);
- Преместване *s* във функция на времето s = s(t);
- Силата *F* генерирана от сплавта във функция на времето F = F(t);
- Електрическото R съпротивление във функция на времето R = R(t). Това е косвено измерване, като с помощта на точен резистор се определя токът във веригата и след това при зададен напрежение на източникът на напрежение се пресмята съпротивлението по закона на Ом.

2.2.Проектиране и моделиране на стенд за СПФ.

2.2.1 Принцип на действие на стенда.

На фиг. 2.1 е показан 3D SolidWorks модел на стенда. За база се използва масивна стоманена квадратна тръба, върху която са разположени елементите за опън на жило от СПФ 4 чрез винтово-гаечна предавка 1, отклоняваща пружина 7 и сензор за сила 1, сензор за положение 5, разтоварващ съединител 6 и термодвойка 3. Завъртането на изследваната система се предотвратява чрез ротационен съединител 8. Силовият сензор 1 се натоварва чрез лост 2.





Фигура 2.1 SolidWorks 3D модел на стенда за изпитване на СПФ и разтварящ съединител.

Фигура 2.2 Обща схема на стенда:

На краищата на жицата от СПФ от фиг. 2.1 се подава постоянно стабилизирано напрежение и всички сензори се свързват към система за събиране и обработване на данни (DAQ). За измерване на тока се използва

Сензор на Хол. Закрепената жица от СПФ лоста (2) и съединителя (6) се деформира на определена дължина чрез винта, чиято позиция може да се регулира грубо и фино. Чрез пружината (7) и винта (8) се създава товар върху сплавта. Експериментът се провежда като се подава напрежение на сплавта с памет на формата, вследствие на което електрическия ток я нагрява и тя възстановява първоначалната си дължина. След това токът се изключва и жицата постепенно се охлажда и под действие на пружината се деформира отново. Продължителността на целият процес на свиване и разтягане може да бъде от 10 ms до няколко минути в зависимост от: сечението на сплавта, дължината й, деформацията и подаденото задвижващо електрическо напрежение. За преобразуване на аналоговия сигнал в цифров и запис се използват налични в катедрата модули на фирма National Instruments NI9234, NI9211 и система за събиране на данни NI сDAQ 9174 (фиг.2.2). Обработка на цифровия сигнал се извършва чрез програмата LabVIEW, с която се създава приложение за запис на данните на Excel. Получените резултати се обработват чрез числени методи и се чертаят графиките дискутираните характеристики.

2.6 Провеждане на експеримента

2.6.1 Описание на опитната постановка

Опитната постановка е показана на фиг. 2.24 Елементи от тази постановка за изяснени на фиг. 2.19 – 2.27. На фиг. 2.19 е даден цялостен вид на стенда 1 със захранващите блокове 2, системата за събиране на данни 3 и лаптоп 4. Съединителят за мигновено разтоварване е демонтиран.



Фигура 2.19. Цялостен вид на опитната постановка:



Фигура 2.20 Основни модули на експерименталната постановка:

Основните модули на стенда са показани на фиг. 2.20. Силовият сензор 1 се натоварва от жицата от СПФ, чрез лостова система 2. Термодвойката 5 е закрепена неподвижно в средната част от жицата от СПФ, за да се избегне неравномерното разпределение на температурата в краищата близо до закрепването на жицата. Показан е и новият сензор за преместване 6.

Силовият сензор се захранва чрез отделен специален изправител със стабилизирано напрежение 10 V. Налага се да се използва отделен изправител за силовия сензор, за да не се даде накъсо някой от диагоналите на уитстоновия мост на четирите пиезорезистора. Системата за събиране на данни е базирана на шаси тип сDAQ 9174 на фирмата National Instruments с 4 слота, в които са монтирани: модул Ni9211 – предназначен за измерване на сигналите на силовия сензор и модул Ni9263 за сензора за преместване.



Фигура 2.22 Сензор за преместване, монтиран чрез магнитна лета



Фигура 2.24. Електрическо табло на стенда.



Фигура 2.25 Силов сензор

На фигура 2.22 е дадена снимка на сензора за преместване като част от стенда за изпитване на сплави с памет на формата. Сензорът е закрепен към стоманения корпус на стенда чрез магнитна лента, която му осигурява стабилно закрепване като същевременно създава възможност за лесна промяна на положението на сензора спрямо жицата от СПФ. Така механично може да се извърши груба настройка на нула. Точното нулиране на сензора за преместване е предвидено да се прави чрез програмата на LabVIEW.

В първоначалната концепция бе решено всички кабели на захранванията и сензорите да се свързват чрез свои куплунги върху предното табло на стенда както е показано на фигура 2.26. В последствие частта от изходящите сигнали на сензорите беше обединена в многожичен кабел, а за захранването се разработва общ блок, като съставна част от стенда.

Монтажът на силовия сензор е показан на фигура. 2.25. Използвана е специална скоба за закрепване към корпуса, а сигналите са отведени чрез клеморед. На снимката се вижда и част от лостовата система, която може да се регулира така че да осигури точно предавателно отношение 1:1 при оптимален ъгъл на предаване на силата.

На фигура 2.26 е показан вида на релето и сензора за ток в процеса на монтаж. Захранващото напрежение на тези два компонента е от USB порта на лаптопа. За това напрежение е изработен специален кабел, показан на фиг. 2.27. В по-следващите конструкции за захранване на релето и сензора за ток е предвиден специален изправител.

2.6.3 Обработка на резултатите от експеримента

Проведено е изпитване на жица от СПФ тип флексинол (търговско название на нитинол), производство на фирма Dynalloy Inc. В каталога фирмата дава следните параметри: диаметър на жицата d=0.38 mm; съпротивление $\rho=8.3 \text{ }\Omega/\text{m}$; опънова сила F=22,5 N за 172 МРа напрежение; приблизителен ток за свиване за 1 s I= 2.25 A; време за охлаждане tc=10,5 s; финална аустенитна температура Af=70°C. Избрана е недеформирана дължина на жицата L=0.385 m.

За провеждане на експериментални изпитания жицата от СП Φ е свързана с пружината и е деформирана на зададената стойност чрез винта. Включено е напрежението на жицата от СП Φ и чрез показанията на термодвойката е зададена температура на загряване от 70 °C. след достигане на температура на жицата от 70 °C електрическото напрежение е изключено и жицата от СП Φ е оставена да се охлажда. При загряване жицата от СП Φ възстановява първоначалната си дължина като се свива. Тогава тя се преобразува от мартензит в аустенит Това води до преместване на активната част на сензора за преместване и показанията за позицията се променят. Пружината се деформира и това води до увеличаване на силата и респективното изменение на показанията на силовия сензор. По време на охлаждането жицата от СП Φ преминава от аустенитна в мартензитна фаза. За мартензитната кристалографска структура е характерно, че модулът на Юнг е значително по-нисък от този в аустенитната фаза. Вследствие на по-ниския модул на линейна еластичност, жицата в мартензитната фаза е по-мека и това позволява пружината да я деформира на опън отново.

Diameter Size	Resistance ohms/inch	Pull Force* pounds	Approximate* Current for 1 Second	Cooling Time 158° F, 70°C "LT" Wire	Cooling Time 194° F, 90°C "HT" Wire
menes (mm)	(ohms/meter)	(grams)	Contraction (mA)	(seconds)	(seconds)
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4000	16.8	14.0

Таблица.2.10

Чрез винтовия механизъм и позиционния сензор е зададена деформация на жицата $\Delta L = 0.017$ m, което съответства на 4.4% относителна деформация. Чрез силовия сензор е отчетена начална сила F = 14 N.

Напрежението е включено в продължение на 12 s, като захранващия блок се използва в режим на източник на ток с I = 2.25 A. Получено е напрежение U=6,28 V.

Част от графиките, записани в Excel файл са дадени на фигурите по-долу. Изменението на температурата във функция на времето е показана на фиг. 2.30. За 17 ѕ жицата достига финалната аустенитна температура и изстива за 240 ѕ при температура на въздуха от 20 °С.



Графиката на силата показана на фиг. 2.32 също се изменя стръмно в началото и достига максимум след 9 s.



След изключване на времето от горните характеристики са получени хистерезисни зависимости. На фиг. 2.33 е показан хистерезиса между преместването и температурата, а на фиг. 2.34 между силата и температурата. Механичният хистерезис, с помощта на които може да се определят загубите е показан на фиг.2.35

2.7 Концептуален модел на СПФ

Реалната система, подлежаща на моделиране тук е специално задвижване, съставено от жица от СПФ и възстановяваща пружина. Първоначално жицата от СПФ е деформирана чрез пружината на зададена стойност. Тогава кристалната структура на жицата от СПФ е мартензит, модулът на надлъжна еластичност е нисък и това позволява на пружината да удължи жицата. Системата се задвижва чрез електрически ток, който протича през жицата и я загрява. Топлината предизвиква мартензитно-аустенитна трансформация в СПФ. В аустенитна форма модулът на надлъжна еластичност се увеличава почти двойно спрямо мартензитната фаза. Жицата възстановява първоначалната си дължина и поради удвоената си коравина държи пружината разтегната на първоначално зададената деформация. След прекъсване на електрическия ток жицата се охлажда, преминава в мартензитна фаза, омеква и пружината отново я деформира.

За валидиране на модела и реалната система е създаден стенд, схематично показан на фиг. 1. Жицата от СПФ 1 в левият си край е закрепена неподвижно към корпуса чрез силов сензор 4. Десният край на жицата от СПФ е свързан към пружина 2, а другият ѝ край е фиксиран. Деформацията на СПФ и пружината S се измерва чрез сензор за преместване 5. Термодвойка 3 измерва температурата T на СПФ.



Фигура 2.38 Схема на стенд за изпитване на сплави с памет на формата

Силата F, с която се натоварват СПФ и пружината се отчита чрез сензора 4. Всички сензори и жицата от СПФ получават напрежение от захранващ блок 6. В система за събиране и обработка на данни 7 едновременно постъпват сигналите за сила F, температура T, преместване ток i и напрежение I. Всички резултати се обработват от компютър 8 чрез специална програма на LabVIEW.

В концептуалния модел на реалната система е прието да се изследва динамичното взаимодействие на гореописаните физически параметри.

Изпълнимият модел на системата е прието да бъде разработен на базата на съсредоточени параметри.

В концептуалния модел на реалната система е прието да се изследва динамичното взаимодействие на гореописаните физически параметри.

Изпълнимият модел на системата е прието да бъде разработен на базата на съсредоточени параметри. Изпълнимият модел на системата е възможно да бъде описан чрез следните диференциални уравнения

iR(T

$$\pi\rho cRSMA^{2}\left(L+s\right)\frac{dT}{dt}\approx ui-2\pi RSMA\left(L+s\right)h\left(T-T_{ext}\right),$$
(2.1)

$$) = u \tag{2.2}$$

И

$$m\frac{d^2s}{dt^2} + b(T)\frac{ds}{dt} + k(T)s = F_s \quad .$$
(2.3)

Първото уравнение 2.1 описва топлинните процеси. Тук T е температурата, RSMA е радиус на жицата, L е дължина на жицата, ρ е плътността, c е специфична топлина при постоянно налягане и h е коефициент на топлопренасяне [1]. Чрез уравнение (2.2) може да се определи силата на електрическия ток i във функция на съпротивлението R и захранващото напрежение U. Диференциалното уравнение (2.3) дава баланса на силите в механичната част. В това уравнение с m е означена масата, съсредоточена в преместващия се карай на жицата, с коефициента на вискозно съпротивление, зависещ от температурата и с коефициента на еластичност на жицата от СПФ, който зависи също от температурата. F_s е пружинната сила, която е пропорционална на преместването (деформацията) s на свободния край на жицата.

Обобщаване на резултатите от глава II

Проектиран и изработен е стенд за изпитване на сплави с памет на формата с възможност за изпитване на сплави с различна форма на сечението и дължина от 5 до 1000 mm.

Създадена е възможност за измерване на натоварвания до 150 N.

Чрез електрически ток изпитваните СПФ може да се загряват до 200 °С.

Чрез изпитване на образец от нитинол са доказани възможностите за едновременно изследване на няколко физични характеристики с достатъчно висока точност и честота на дискретизация.

Получените резултати може да бъдат полезни за определяне на специфични характеристики на СПФ, за създаване на модели и тяхното валидиране.

Създаденият стенд намира приложение за обучение на студенти и подпомагане изследователската работа на докторанти и научни работници.

Първоначалните изводи по отношение на измерванията показват, че зададените каталожни данни не винаги съответстват на реалните.

Така конструираният и изработен стенд предоставя широки възможности за изследване на СПФ.

Устройството е внедрено в учебната програма на ТУ-София и с него се провеждат лабораторни упражнения и научни изследвания.

Глава III Харвестер с прекъсване на топлинния поток чрез СПФ

3.1 Описание и принцип на действие на харвестер с прекъсване на топлинния поток

На фиг.3.1 е дадена принципна схема на енергийния преобразувател, базиран на принципа на прекъсване на енергийния поток. Към свободния край на жица от СПФ 1 е закрепен постоянен NdFeB магнит 2, който взаимодейства с друг такъв магнит 3, разположен между две еластични мембрани 4 с пиезоелектрични слоеве 5 от РZT. Системата с мембраните и дисковете е поместена в корпус 6. Стойка 7 служи за закрепване на неподвижния край на жицата от СПФ. Върху жицата е захванат въртящо елемент огледало/обтюратор 8, който се завърта с помощта на канална гърбица 9, когато СПФ се свива или отпуска и магнитът 2 се отдалечава или приближава към мембраните.

Жицата от СПФ е разположена във фокуса на огледалото (фиг. 3.1 б). Когато върху огледалото пада успореден сноп светлинни лъчи вследствие на фототермичния ефект жицата се загрява. При достигане на температурата на мартетензитно–аустенитното превръщане жицата започва да се скъсява и повдига нагоре задвижващия магнит 3. Промяната на положението на магнита предизвиква промяна в деформацията в еластичните мембрани и пиезоелектричните слоеве генерират електрическа енергия.

Отражателят 8, освен че концентрира топлината върху жицата от СПФ играе роля на обтюратор, който чрез завъртане прекъсва достъпът на топлина до жицата от СПФ. За завъртането на обтюратора се използва гърбицата 9, която преобразува вертикалното движение на обтюратора във въртеливо. Когато жицата от СПФ е максимално скъсена, обтюраторът застава между източника на топлина 10 и жицата 1.



Фигура 3.2 Схема на опитна постановка:

Фигура 3.1 Принципна схема на устройството: а) обща схема на харвестера; б) разположение на нишката от СПФ спрямо фокуса на кръглото огледало

Следва охлаждане на жицата и съответното й удължаване под действие на магнитната сила. Обтюраторът пада вертикално и едновременно с това се завърта като отново заема позиция на огледало. Така при наличие на светлина или подходяща лъчиста топлина, движението на системата циклично се повтаря, генерирайки електричество.

3.2 Опитна постановка за изследване на базовите характеристики на системата.

Опитната постановка е предварителен етап от изработването на харвестера, целящ да се определят основните параметри.

Схемата на опитната постановка е показана на фиг. 3.2 Огледалото от фиг. 3.1 е свалено и вместо с топлинен източник, жицата от СПФ е захранена директно в краищата си от източник на постоянно напрежение 8. Честотата и широчината на импулсите на захранващото напрежение е задавана чрез система за събиране на данни на National Instruments. Температурата се измерва с термодвойка 9, а позицията от магнито-релуктивен безконтактен сензор. Данните от сензорите се записват в системата за събиране на данни 11, в която са поместени съответните функционални входни и изходни модули 12, 13 и 14. Експериментът се управлява чрез програма на LabVIEW с блок диаграма.

Жица от сплав с памет на формата 1 е закрепена неподвижно на стоика 7. В долният край на жицата е монтиран подвижен постоянен магнит 2. В основата са закрепени две еластични мембрани 4 с пиезоелектрични слоеве 5, между които е поставен задвижващ магнит 3. Жицата от СПФ се загрява с помощта на генератор на импулси 12 и усилвател 8. Температурата се измерва чрез термодвойка 9. Позицията на магнита се определя чрез позиционен магниторелуктивен сензор 10. Данните от сензорите се обработват чрез система за събиране на данни 11 с модули 13 и 14, от където постъпват в лаптоп 15.



Фигура 3.3 Снимка на опитната постановка. 1. Лаптоп 2. Стойка, 3. Термодвойка, 4. Термометър измерващ температурата на околната среда, 5. Сплав с памет на формата 6. Магнит, 7. Система от пиезоелектрични преобразуватели, 8. Фундамент, 9. Блок на NI, 10. Захранващ блок;

3.3 Резултати от експеримента

На фиг. 3.8 е показано измерване, направено при следните параметри: дължина на жицата 110 mm; начална междина 12 mm; температура на околната среда 25.9 °C; ток 1.52 A; жица тип Flexinol d=0.38 mm. Широчина на импулса на електрическия ток 0.099 sec при период 1 sec.



Фигура 3.8 а) Изменение на температурата на жицата със СПФ при широчинно импулсно (ШИМ) управление на загряването; б) Напрежение на пиезоелектричен диск

Максималното генерирано напрежение на отворена верига само в една от мембраните е 33 mV. Другата мембрана генерира идентично, но противофазно напрежение.

Резултатът показва, че по отношение на параметрите на тока устойчив режим не е постигнат, защото на графиката е видно, че въпреки променливия си характер температурата в жицата непрекъснато нараства.

3.4 Обобщаване резултатите за глава III

Проведените експерименти потвърждават възможността за изграждане на осцилиращ комбиниран харвестер със сплави с памет на формата.

Такава система може да работи при всякакви условия, където има светлинен източник, не се нуждае от настройване и въпреки сравнително сложната конструкция, проявява надеждно поведение.

За да се извлече максимална енергия, подвижният магнит трябва да бъде разположен максимално близо до пиезоелектричните слоеве. Опитът показва, че съществува една минимално възможна начална междина след преминаването, на която следва удар на магнита в мембраната. В динамичен режим тази критична междина се увеличава.

Енергоотдаването на системата може да се повиши като в корпуса се монтира бобина с висока индуктивност, която да генерира допълнително електричество.

Недостатък на системата е относително трудното й миниатюризиране.

Очевидно, е че максимален коефициент на полезно действие на системата ще се получи, когато собствената честота на пиезоелектричната система с неподвижния магнит, съвпадне с честотата на осцилациите на подвижния магнит.

Енергийният харвестер може да работи в среда, която топлинният поток е променлив във времето.

Така проектираният енергиен харвестер може да се разглежда като хибриден, защото освен топлина може да преобразува вибрации, ако корпусът е монтиран върху вибриращ или подвижен обект.

Глава IV Комбиниран термоелектричен генератор със сплави с памет на формата

4.1 Описание на комбинирания термоелектричен генератор със СПФ

Проектиран и изработен е комбинирания термоелектричен генератор със СПФ с цел изследване на неговите характеристики.

Схемата на генератора за електрическа енергия е показана на фиг. 4.1 На фиг. 4.1 *а)* е изобразено неактивираното състояние на генератора. В това състояние жицата от СПФ 1 не е загрята и е опъната до относителна деформация от 5%. Подгряващата пластина 4 е нагрята от нагревателят 5 до 80 °C, което е с 10 °C над границата на пълната аустенитна фазова трансформация. За известен период от време жицата от СПФ се нагрява чрез пластината 4 до температура от 30 °C, което поставя началото на М-А трансформация. Тази трансформация предизвиква възстановяване на първоначалната ѝ форма, което се изразява в скъсяване дължината на жицата. Стига се до състоянието, показано на фиг. 4.1 δ). Скъсяването на жицата предизвиква преместване на свободния край на конзолната греда 3, което води до деформиране на пиезоелектричния слой 2. Едновременно с това подгряващата пластина 4 с помощта на топлоизолационните ограничители 6 се завърта около оста на нагревателя 5 и се отдалечава от жицата със СПФ. Следва краткотрайно охлаждане на жицата и нейната А-М трансформация. Преминалата в мартензитно състояние жица от СПФ има значително по-нисък модул на Юнг, от този при аустенитната форма. Това позволява на конзолата да опъне жицата отново и да се стигне до неактивираното състояние от фиг. 4.1 а).



Фигура 4.1 Принципна схема на комбинирано устройството за генериране на енергия: а) некативирано състояние; б) активирано състояние; 1. Жица от СПФ; 2 Пиезоелектричен слой; 3. Конзолна еластична мембрана; 4. Подгряваща пластина; 5. Нагревател; 6. Топлоизолационни ограничители



Фигура 4.2 3D модел на комбинирано устройството за генериране на енергия. 1 Основа, 2 Стойка, 3 Нагревател, 4 Подгряваща пластина, 5 Сплав с памет на формата, 6 Рамка, 7 Пиезоелектричен *генератор*.

В така проектираната система процесите се повтарят периодично при условие, че температурата на нагревателя е по-висока от температурата на средата в която се намира жицата от сплав с памет на формата.

Опростен 3D модел на горе описания термогенратор е даден на фиг. 4.2. За топлоисточник е използван нагревател 3, който е поялник, закрепен чрез стойка 2 към масивна основа 1. Жицата от сплав с памет на формата е фиксирана в горния си край към рамката 6, а долният ѝ край е захванат към пиезоелектрична мембрана фиксирана в корпус 7. Нагревателят 3 загрява подгряващата пластина 4, която повишава температурата на СПФ и активизира ефекта памет на формата.

4.2 Приблизителен динамичен модел на комбинирания термогенератор

Топлинният баланс на елементарен цилиндричен обем от жицата от СПФ, установяващ се с разликата между входящата топлина Q(x) и изходящия топлинен поток Q(x+dx) е сумата от конвекционния топлинен поток и натрупаният топлинен поток, който предизвиква промени в температурата

$$\frac{\partial Q(x)}{\partial x}dx = Q(x+dx) - Q(x) = -hP\left[T(x) - T_{\exp}\right]dx + \rho C_p \frac{dT}{dt}dx$$
(4.1)

където $P = 2\pi R$ е периметъра на напречното сечение, ρ е плътността, C_p специфична топлина при постоянно налагане и h е коефициент на топлопренасяне [2]. Кондуктивният топлинен поток Q(x) през елементарния обем е

$$Q(x) = -kA \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.2}$$

където k е термична проводимост, $A = \pi R^2$ е напречното сечение на елементарния обем.

След заместване на уравнение (4.2) в (4.1) за изменението на температурата T(x,t) във функция на надлъжната координата x и времето t е получено

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} - \sigma (T - T_{ext}) = \frac{\partial T}{\partial t}$$
(4.3)

където

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \qquad \sigma = \frac{\rho C_p}{hP} \tag{4.4}$$

За диференциалното уравнение (3) са в сила следните гранични и начални условия

$$Q_1 = Q(0,t) = -kS \frac{\delta T}{\delta x}(0,t)$$
(4.5)

$$Q_2 = Q(l,t) = -kS \frac{\delta T}{\delta x}(l,t)$$
(4.6)
11

$$T(x,0) = T_{ext} \tag{4.7}$$

където *l* е дължината на цилиндъра.

На базата на опростяващи предпоставки [3] диференциалното уравнение (3) е представено във вида

$$\pi \rho c R^2 L \frac{\partial T}{\partial t} \approx Q_0 - 2\pi R L h (T - T_{ext})$$
(4.8)

Madill и Wang [4] използват горното уравнение допускайки, че h и c са константи. В действителност в общия случай h е температурно зависим [5] и c също [6]. Dutta M и Gharbel F [7] на базата на експериментални резултати предлагат

$$h = \begin{cases} a_1 + a_2 T & \dot{T} \ge 0\\ a_3 + a_4 erf \frac{T - m_1}{n_1} & \dot{T} < 0 \end{cases}$$
(4.9)

И

$$c = b_1 + b_2 erf \frac{T - m_2}{n_2}$$
(4.10)

където $a_i, (i=1,2....4)$ b_j, m_j и n_j (j=1,2) са константи.

В разглеждания тук случай ролята на активираща функция има външната температура T_{ext} . Тя зависи от наклона на подгряващата пластина и деформацията на долния карай на жицата ΔL , която в незатоплено състояние, изразена с параметрите на жицата има вида

$$\Delta L = \frac{L}{AE_M} F, \tag{4.11}$$

а чрез параметрите на конзолата

$$\Delta L = \frac{l_0^3}{3EI}F,\tag{4.12}$$

където E_M е модул на Юнг на жицата в мартензитна фаза, E е модул на Юнг на конзолата, l_0 е дължината на конзолата l е инерционния момент на сечението и F е силата, която опъва жицата и в същото време деформира конзолата. От функционална гледна точка е прието

$$\Delta L_{\max} = 0.05L \tag{4.13}$$

От формулата за напрежението при огъване

$$\sigma_b = \frac{Fl_0}{W} \tag{4.14}$$

е изразена силата и е заместена във формула (4.12), от където следва

$$\Delta L = \frac{l_0^2 \sigma_b W}{3EI} \,. \tag{4.15}$$

Прието е, че при загряване опъната жица се скъсява по зависимостта

$$\Delta L(T) = \Delta L_{\max} - qT, \qquad (4.16)$$

където коефициента *q* се определя от зависимостта

$$\Delta L(T) = \Delta L_{\text{max}} - qT_A = 0. \tag{4.17}$$

Тук T_A е температурата на финалната мартензитна трансформация.

Като вземем предвид (16) диференциалното уравнение (8) придобива вида

$$\pi\rho cR^{2} \left(L + \frac{\Delta l_{\max}}{T_{A}}T \right) \frac{dT}{dt} \approx Q_{0} - 2\pi R \left(L + \frac{\Delta l_{\max}}{T_{A}}T \right) h \left(T - T_{ext} \right)$$
(4.18)

Приемаме, че външната температура зависи линейно от тангенса на ъгъла на завъртане на подгряващата пластина, от което следва

$$T_{ext} = T_0 - w \frac{\Delta l}{\delta} = T_0 - \frac{w \Delta l_{\max}}{\delta T_A} T.$$
(4.19)

След заместване на горния резултат в (17) получаваме

$$T_{ext} = T_0 - w \frac{\Delta l}{\delta} = T_0 - \frac{w \Delta l_{\max}}{\delta T_A} T T_{ext} = T_0 - w \frac{\Delta l}{\delta} = T_0 - \frac{w \Delta l_{\max}}{\delta T_A} T.$$
(4.20)

Горното уравнение е представено във формата

$$\alpha_4 T \dot{T} + \alpha_3 \dot{T} + \alpha_2 T^2 + \alpha_1 T + \alpha_0 = 0, \qquad (4.21)$$

където

$$\alpha_4 = \pi \rho c R^2 \frac{\Delta l_{\text{max}}}{T_A}, \qquad (4.22)$$

$$\alpha_3 = \pi \rho c R^2 L \quad , \tag{4.23}$$

$$\alpha_2 = 2\pi c R \frac{L_{\text{max}}}{T_A} h \left(1 + \frac{w \Delta l_{\text{max}}}{\delta T_A} \right), \tag{4.24}$$

$$\alpha_1 = 2\pi RL \left(1 + \frac{w\Delta l_{\text{max.}}}{\delta T_A} \right)$$
(4.25)

И

$$\alpha_0 = 2\pi R L T_0 h - Q_0. \tag{4.26}$$

Това диференциално уравнение съвместно с (4.9) и (4.10) е използвано за моделиране на температурата на жицата T. След като тази функция е получена като функция на времето, от формула (15) е изразена и абсолютната деформация ΔL във функция на времето t. Чрез нея и с помощта на (4. 14) е пресметнато напрежението на опън в пиезоелектричния слой

$$\sigma_b(t) = \frac{3\Delta L(t)EI}{l_0^2 W} \tag{4.27}$$

Генерираното електрическо напрежение ^{*V*} е намерено по формулата

$$v(t) = g_{33}\sigma_b(t)t_p = \frac{12REg_{33}t_p}{l_0^2}\Delta L(t)$$
(4.28)

където g₃₃ е напрежителна пиезоелектрична константа по направление 33 и t_p е дебелината на пиезоелектричния слой.

4.3 Теоретични и експериментални резултати

Изработен образец на комбинирания пиезоелектричен-СПФ генератор и стенд за провеждане на експерименти са показани на фиг. 4.3.



Фигура 4.3 Комбиниран пиезоелектричен-СПФ генератор и експериментална постановка.

Използвана е жица от СПФ тип нитинол с диаметър 0.1 mm. Върху конзолата е нанесен тънък слой от пиезоелектричната керамика РZT.

За изследване на генерираното напрежение е използвана система за събиране на данни NI DAQ с честота на дискретизация 102.2 kHz. Проведени са серия експерименти. Резултати от такъв експеримент са дадени на фиг. 4.4.



Числено решение на диференциалното уравнение (4.20) за 10 пъти по-кратко време от това на експеримента е показано на фиг. 4.5.

Сравнението на двата резултата показва, че има добро съвпадение по отношение на амплитудите. Пренебрежимо малките различия по отношение на началните условия както и неточностите в периодите на двата резултата се дължат на различните условия за провеждане на експеримента и в симулацията на модела.

От експерименталните резултати е видно, че така проектираното устройство може да генерира напрежение от порядъка на 30 mV.

4.4 Обобщаване на резултатите от глава IV

Проектиран и изработен е комбиниран пиезоелектричен-СПФ термогенератор на енергия.

Създаден е динамичен модел на термо-механичната и електрическата система на термогенератора.

Проведени са експерименти чрез реалното устройство.

Направени са множество симулации на динамичния модел.

Показано е, че получените експериментални резултати потвърждават теоретичните изследвания с висока степен на достоверност.

Разгледаният тук комбиниран термоелектричен генератор надеждно преобразува постоянна или променяща се топлинна енергия в електрическа енергия с мощност, достатъчна за захранване на микроелектронни и микроелектромеханични системи.

ГЛАВА V Моделиране на комбиниран термоелектричен генератор, задвижван от СПФ

5.1 Конструктивна концепция на пиезоелектричен харвестер със сплав с памет на формата

Принципната схема на разглеждания в тази глава сплав с памет на формата- пиезоелектричен харвестер (СПФ- ПЕХ) е същата като тази показана на фиг. 4.1. Тук това описание е допълнено и са дадени някои допълнителни пояснения. Описание на предложения СПФ-ПЕХ за началото на затоплянето на СПФ жицата. Жицата от СПФ 1 е опъната чрез конзолата 3, съдържаща пиезоелектричен биморф 2. Месингова пластина 4, загрята от нагревател 5 допира СПФ жицата 1, която започва да се загрява. Фигура 4.1 (b) илюстрира СПФ-ПЕХ с нагрята жица. Когато СПФ жицата се нагрее тя си променя кристалната структура от мартензит до аустенит и се

свива и свободният край на конзолата се движи. Деформацията на конзолата предизвиква електрически заряд в пиезоелектричния биморф. В същото време чрез ограничителите 6 топлата СПФ жица завърта месинговата пластина 4 около топлинния източник 5 и затоплянето на жицата прекъсва. Междувременно охлаждането на СПФ води до аустенитно-мартензитно преобразуване, което намалява коравината на СПФ жицата. Това води до удължаване на СПФ жицата отново под действието на силата на конзолата и месинговата пластина се завърта обратно на часовниковата стрелка до позицията си показана на фиг. 4.1 (а). Движението на свободния край на конзолата деформира пиезоелектричния слой и се индуцира втори електрически заряд. След това всички гореописани процеси се повтарят.

Предназначението на така предложения SMA-ПЕХ е да преобразува част от постоянната топлинна енергия на нагревателя в осцилиращо движение на месинговата пластина, което да индуцира променливо изходно електрическо напрежение в пиезоелектричната конзола.

5.2 Принцип на действие

Принципът на действие на хибридния харвестер е пояснен чрез фиг. 5.1. В началото пластината е загрята до температурата на нагревателя и се поддържа постоянна. Нишката има стайна температура. След като топлата пластина (ТП) се допре до нишката от СПФ, започва процес на нагряване на нишката. При достигане на финална аустенитна температура нишката се е скъсила максимално. Скъсяването на нишката предизвиква от една страна генериране на електрически заряди в пиезоелектричната конзола (ПЕК), а от друга страна отдалечаване на ТП. Започва процес на охлаждане на СФП нишката. Коравината на нишката постепенно намалява, което позволява на ПЕК да я опъне до първоначалната ѝ дължина. Новата деформация на нишката предизвиква движение в ПЕК, която генерира електричество и завърта ТП, така че отново да допре СПФ нишката. Следва циклично повтаряне на изброените действия.

5.3 Съставяне на приблизителен динамичен модел на хибридния харвестер

На фиг. 5.2 (а) схематично е представено взаимодействието на пиезоелектричната конзола и нишката с памет на формата в статично положение, когато нишката е студена и температурата ѝ T е равна на стайната температура T_{∞} . В свободния край на конзолата приемаме да има обобщена маса, в която по условието за еквивалентност на кинетичните енергии са взети предвид всички маси по оста на нишката от СПФ, масата и масовия инерционен момент на топлата пластина.

Преди свързване на краищата на конзолата и нишката, конзолата има формата на правата *CD*, а нишката има дължина l_{SO} .

В момента на окачване на конзолата към нишката в точка A е прието, че конзолата е максимално деформирана на разстояние Δy_0 , а нишката е запазила своята дължина. След свързването на края



Фигура 5.1: Пояснение на принципа на действие на хибридния харвестер. Използвани съкращения: СПФ – сплав с памет на формата; ТП – топла пластина; ПЕК –пиезоелектрична конзола; ЕЗ –електричен заряд.

на нишката с този на конзолата е допуснато, че е има статично равновесие в точка B. Тогава еластичната сила на конзолата F_{C0} плюс теглото G са се уравновесили с еластичната сила на нишката F_{SMA0} от което следва уравнението

$$F_{C0} + G = F_{SMA0}.$$
(5.1)



Фигура 5.2: Схема на натоварване и деформации на нишката от СПФ и пиезоелектричната конзола: а) при стайна температура на нишката; б) при загрята нишка до температура по-висока от финалната мартензитна температура и пренебрегнато ускорение.

Силата на конзолата е пресметната чрез формулата

$$F_{C0} = k_c \Delta y_{c0} \tag{5.2}$$

където

$$k_{C} = \frac{3E_{C}I}{l_{C}^{3}} = \frac{12,5.10^{9}.7,85.10^{-5}}{0,046^{3}} = 56,505N/m$$
(5.3)

е еластичната константа на конзолата, $E_C = 12,5~GPa$ е модул на Юнг на материала на конзолата, $l_C = 0,046~m$ е дължината на конзолата,

$$I = \frac{wh^3}{12} = \frac{0,022.0.0002^3}{12} = 7.854.10 - 9 \ m^4, \tag{5.4}$$

w=0,022 m е ширината на конзолата и h= 0,0002 m е дебелината ѝ. Теглото на обобщената маса е намерена чрез формулата

$$G = mg = 0.124 N$$
, (5.5)

където m=12,6.10⁻³ kg е масата, g=9,81 m/s² е земното ускорение. Силата на нишката от СПФ в мартензитно състояние е изчислена с формулата

$$F_{SMA0} = \frac{E_M A}{l_{S0}} \Delta l_{S0} , \qquad (5.6)$$

където *E_M*=28.10⁻⁹ Ра е модулът на надлъжна деформация (модул на Юнг) на материала на нишката от СПФ – нитинол, когато се намира в мартензитно състояние.

$$A = \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi 0.0001^2}{4} = 7.854.10^{-9} m^2 \tag{5.7}$$

е площта на напречното сечение на СПФ нишката и $d_s = 0.1.10^{-3}\,\mathrm{m}$ е диаметърът на нишката.

След заместване на изразите за трите сили от формули (5.2), (5.5) и (5.6) в уравнението за равновесие при стайна температура (5.1), е получено

$$k_c \Delta y_{c0} + mg = \frac{E_M A}{l_{S0}} \Delta l_{S0}$$
(5.8)

Като е взето предвид, че първоначалната деформация на конзолата е равна на сумата от деформациите на нишката и конзолата в равновесно положение (фиг.5.3) е записано

$$\Delta y_0 = \Delta l_{SO} + \Delta y_{C0} \tag{5.9}$$

Чрез съвместното решение на (5.8) и (5.9) е намерена статичната деформация на свободния край на конзолата при стайна температура във вида

$$\Delta y_{c0} = \frac{\Delta y_0 E_M A - l_{S0} mg}{E_M A + k_c l_{S0}},$$
(5.10)

а за статичното удължение при стайна температура на нишката от сплав с памет на формата е получено

$$\Delta l_{S0} = \frac{\left(\Delta y_0 k_C + mg\right) l_{S0}}{E_M A + k_C l_{S0}}.$$
(5.11)

В реалната конструкция на енергийния харвестер се регулира разстоянието *DE*, което може да се разгледа като задаване на началната сумарна деформация Δy_0 , защото началната недеформирана дължина l_{S0} на жицата от СПФ е известна и $\Delta y_0 = DE - l_{S0}$. Предварителната деформация на конзолата Δy_0 трябва да се съобрази с конструктивните и якостните ограничения на устройството. Например при $\Delta y_0 = 4$ mm с избраните по-горе параметри чрез формули (10) и (11) е пресметнато $\Delta y_{c0} = 3,683 \, mm$ и $\Delta l_{S0} = 0,318 \, mm$. Допустимата деформация на конзолата е определена от условието за максимално напрежение на огъване σ_{max} да е по-малко от граничното пропорционално напрежение σ_p , от което следва

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} < \sigma_p \,, \tag{5.12}$$

където

$$M_{\max} = F_{\max} \, l_c \,. \tag{5.13}$$

е максималният огъващ момент, а

$$W = \frac{wh^2}{6}.$$
(5.14)

е съпротивителен момент на огъване на сечението на конзолата.

Максимално допустимата сила, която действа в свободния край на конзолата е изразена чрез деформационното уравнение при огъване, което има вида

$$F_{\max} = \frac{3E_c I}{l_c^3} \Delta y_{\max} .$$
(5.15)

Вземайки предвид (14) и (15) след като заместим в (5.12) е получено

$$\frac{18EI}{l_c^2 w.h^2} \Delta y_{\max} < \sigma_p , \qquad (5.16)$$

откъдето е изразена максимално допустимата деформация за конзолата

$$\Delta y_{\max} < \frac{l_c^2 w.h^2 \sigma_p}{18EI}, \qquad (5.17)$$

За материал на конзолната греда бронз 70*Cu*-30*Zn* от справочниците определяме $\sigma_p = 70 Mpa$ и с приетите по-горе размери е изчислено $\Delta y_{\text{max}} = 0,00395 \, m$.

Максималната деформация на нишката Δl_{max} от СПФ не бива да надвишава 5%, за да се гарантира дълъг живот на устройството. От това условие е намерено

$$\Delta l_{\max} < 0.05 l_{S0} = 0.05.0, 21 = 0.0105 \,\mathrm{m} \tag{5.18}$$

За по-голяма прегледност резултатите от деформациите са дадени в таблица 5.1. Очевидно е, че пиезоелектричната конзола е натоварена близо до границата на деформация, а нишката от СПФ почти не е натоварена. Освен това резултатът показва, че първоначално зададената сумарна деформация $\Delta y_0 = 4$ mm предизвиква деформация в конзолата близка до граничната и тя няма да може да понесе динамични натоварвания в диапазон по-голям от 7% спрямо допустимата. Този проблем може да се отстрани, като се намали сумарната деформация, но тогава влиянието на деформацията на нишката от СПФ ще стане още по-малко.

Понеже конзолата се изработва от стандартни дискове [8] и производителите не предлагат по-малки дебелини от 0,2 mm, се налага да се преизбере диаметърът на нишката от СПФ.

Избирана нишка с диаметър 0.05 mm.

на опън

Понеже избраното сечение е малко се налага да се провери напрежението на опън в нишката, което е пресметнато чрез известната формула

$$\sigma = \frac{F_{C0} + mg}{A} = \frac{0.136 + 0.124}{1.96.10^{-9}} = 146 MPa < 172 MPa = 146 MPa < 172 MPa$$
(5.19)

където максимално допустимото напрежение е 172 МРа според каталога на производителя До аналогичен извод се стига като се сравни сумата от силите, които действат на жицата $F_{\Sigma 0} = F_{C0} + G = F = 0,164 + 0,124 = 0,29 N$ с дадената в каталога теглителна сила $F_{catalogue}=0,036.9,81=0,35$ N. Тук трябва да имаме предвид, че теглителната сила се отнася за по-яка жица, която е затоплена, намира се в аустенитна фаза и има по-високо допустимо съпротивление

. Видно е, че отношението на реалната към допустимата деформация за нишката от СПФ е нараснало със 7%, а същото съотношение за ПЕК се е намалило с 20%.

Звено	Допустими деформации [mm]	Реални деформации [mm]	Отношение реална/допустима деформация %	Дял в сумарната деформация $\Delta y_0 ~\%$
Нишка от СПФ	10,5	1,09	10 %	27%
ПЕ конзола	3,95	2,9	73 %	73%

Таблица 5.1: Деформации на СПФ и конзола след корекциите

Въпреки подобреното отношение на двете деформации е видно, че нишката от СПФ има почти 3-пъти помалка статична деформация от тази на конзолата. Следващо оптимизиране на това отношение може да се постигне с удължаване на конзолата и други конструктивни изменения.

На фиг. 5.2б е изобразено статичното натоварване на разглежданата механична система, когато нишката е загрята до някаква температура T над финалната мартензитна температура Mf. Загряването на нишката води до фазови промени в структурата, вследствие на което се увеличава модулът на Юнг. Нишката става по-корава и това води до намаляване на еластичната ѝ деформация. Разстоянието Δl_S , с което се е намалила еластичната деформация в следствие на загряването, тук приемаме да наричаме температурна деформация. Изразявайки отново равновесието на вертикалните сили, аналогично на формула (5.1) може да се запише

$$F_{CT} + G = F_{SMAT} \,, \tag{5.20}$$

където силата, която предизвиква конзолата при появата на температурна деформация е пресметната чрез формулата

$$F_c = k_c \left(\Delta y_C + \Delta l_S \right), \tag{5.21}$$

а силата в нишата от СП Φ е

$$F_{SMA0} = \frac{E(T)A}{l_{S0}} \Delta l_{S0T} .$$
(5.22)

Аналогично на уравнение (5.9) тук също може да се запише

$$\Delta y_0 = \Delta l_{S0T} + \Delta y_{c0} + \Delta ls . \tag{5.23}$$

След заместване на (5.6), (5.21) и (5.22) в (5.20) съвместно с (5.23) е получена система от две уравнения, от която е намерено

$$\Delta l_S = \frac{A l_{S0} \left(k_c \Delta y_0 + gm \right) \left[E(T) - E_M \right]}{\left(A E_M + k_c l_{S0} \right) \left[A E(T) + k_c l_{S0} \right]},$$
(5.24)

$$\Delta l_{S0T} = \frac{\left(k_c \Delta y_0 + m_g\right) l_{S0}}{E(T) A + k_c l_{S0}} \,. \tag{5.25}$$

Прието е, че зависимостта на модулът на Юнг спрямо времето може да се апроксимира чрез формулата

$$E(T) = 2E_M + \frac{E_A - E_M}{2} \tanh\left[k_E(T - Af)\right],$$
 (5.26)
където

$$k_E = \frac{E_A - E_M}{Af - Mf}.$$
(5.27)

Графиката на зависимостта (5.13) е показана на фиг. 5.3.





Фигура 5.4: Изменение на температурната деформация на нишката от СПФ във функция на времето

При апроксимирането на надлъжния модул на еластичност (модулът на Юнг) е прието, че в приблизително линейния участък функцията E = E(T), се отклонява минимално от правата минаваща през точките $A(Ms, E_M)$ и $B(Af, E_A)$.

Заместването на апроксимационната формула (5.26) в (5.24) води до намиране на зависимостта на температурната деформация във функция на времето. Графиката на тази зависимост е показана на фиг. 5.5.

От графиката на фиг. 5.5 е видно, че максималната стойност на температурната деформация $\Delta l_{Sm} = 0,683 \ mm$. Чрез (5.25) пресмятаме $\Delta l_{SOT} = 0,41 \ mm$, което е еластичната деформация на нишката в аустенитната фаза. Тази стойност показва, че в аустенитната фаза, когато има пълно температурно възстановяване, дължината на нишката не е напълно възвърната. Еластична деформация в аустенитната фаза може да се възстанови едва след силово разтоварване, което в нашия случай практически може да се постигне, ако се прекъсне връзката

между нишката и конзолата. Освен това е видно, че при намаляване на температурата $\Delta l_S \rightarrow 0$, а при покачване на температурата $\Delta l_S \rightarrow \Delta l_{Sm}$, т.е имаме поведение аналогично на това в реалната система.

От кинематичната схема на фиг. 5.2 е изведена зависимостта на ъгъла на завъртане φ на топлата пластина във функция на температурната деформация във формата

$$\varphi = \arctan \frac{\Delta l_s}{\delta}.$$
(5.28)

За моделирането на топлопренасянето от ТП до СПФ нишката са приети следните опростяващи предпоставки: 1. Прието е, че през цялото време ТП е с постоянна температура по цялата и дължина, равна на тази на нагревателя. Малките изменения вследствие на взаимодействието със СПФ нишката и с въздуха при движение и покой са пренебрегнати. 2. СПФ нишката се загрява по непрекъснат закон, който зависи от ъгъла на завъртане на пластината. Не се отчита точно влиянието на топлопренасянето при допир между ТП и нишката и не се отчитат другите два вида топлобмен лъчист и конвекционен, когато пластината е отдалечена от СПФ нишката.

Този закон е наричен функция на температурно топлопренасяне *T*_{hp}, която дефинираме във вида

$$T_{hp} = T_r + \frac{I_h}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi \varphi}{\varphi_m} \right).$$
(5.29)

където T_h е температурата на нагревателя, φ_m е максималния ъгъл на завъртане на пластината и T_r измерена температура, която има нишката, когато ТП е максимално отдалечена.



Фигура 5.5: Изменение на ъгъла на завъртане φ на топлата пластина във функция на температурата T на нишката от СПФ.

Въз основа на направените по-горе допускания е съставен приблизителен динамичен модел чрез уравнението за изменение на температурата на нишката под въздействието на процеса на топлопренасяне от топлата пластина към нишката от СПФ [2]. Съставено е диференциалното уравнение

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_c A_c}{\rho A c_p} \left[T_{\infty} - T + T_{hp} \left(\varphi \right) \right].$$
(5.30)

където $\rho = 6450 \ kg \ / m^3$ е плътността на нитинола, $c_p = 857, 1 \ J \ / \ kg^\circ C$ е специфичната топлина $h_c = 150 \ J \ / \ (m^2 \ C \ s)$ коефициент на топлопренасяне, $A_c = \pi d = 1,57.10^{-4} \ m$ е лицето на околната повърхнина на нишката за единица дължина.

Решението на диференциалното уравнение е изобразено на фиг. 5.8. При начално условие $T(0)=T_{\infty}$ температурата на нишката започва да се увеличава и достига до температура от 45,64 °C, която се явява асимптота на решението.

На фиг. 5.9 е показана температурната деформация на нишката, която е получена след като се замести закона за изменение на температурата в израза (24).

Чрез числено диференциране са получени графиките за скоростта и ускорението на температурната деформация, показани съответно на фиг. 5.9 и фиг. 5.10.





Фигура 5.9: Скорост на температурната деформация на нишката от СПФ.



)

Времето на преходния процес зависи от стойността на времеконстантата

$$\tau = \frac{\rho A c_P}{h_C A_C} \qquad (5.31)$$

Видно е, че при така приетите опростяващи предпоставки се стига до устойчиво решение, в което има движение само в началото и след това всички температури са в равновесие.

Въпреки, че инерционните сили са пренебрегнати, е видно, че в началото има сравнително високи ускорения, които може да предизвикат движение в инерционен модел. Това означава, че даже при нулеви начални условия в инерционен динамичен модел тривиално решение *y*=*const* не може да се получи.

Очевидно, е че това решение не отразява реалните свойства на системата в общия случай, но от него може да се направи извода, че ако съществува само топлинно задвижване, се стига до равновесно състояние при, което няма трептения на конзолата и електрическа енергия в стационарния режим не се произвежда.

Друг извод, който можем да се направи е, че за първоначално приетите параметри температурната деформация има много малък дял в сумарната деформация, а това може да доведе до много малко влияние на температурната деформация върху движението на свободния край на пиезоелектричната конзола.

5.4 Съставяне на подобрен динамичен модел на хибридния харвестер

За съставяне на по-точен динамичен модел е разгледано движението на свободния край на конзолата с редуцирана маса, в която са взети предвид всички маси по оста на нишката от СПФ, масата и масовия инерционен момент на топлата пластина. Разглеждаме силовото натоварване, показано на фиг. 5.11. За справка с началните деформации на фиг. 5-11 а) е изобразено натоварването на системата преди активирането ѝ. По същия начин както при фиг. 5.26) на фиг. 5.116) е разгледана нишката от СПФ, загрята до някаква температура на фазова трансформация T. В това състояние нейната дължина е скъсена на разстоянието равно на температурната деформация Δl_S , а масата тогава е в позиция означена с координатата у. Причината тази позиция да не съвпада с температурната деформация е инерционната сила, която допълнително огъва пиезоелектричната пластина и отпуска нишката или обратно: допълнително опъва нишката и отпуска конзолата.



Фигура 5.11: Деформации и сили: а) начални равновесни деформации при студена нишка от СПФ; б) деформации и сили при температурата T_r<T(t)<T_A.

Силата, с която нишката от СПФ опъва масата е дефинирана чрез израза

$$F_{SMA} = \begin{cases} \frac{E(T)A(\Delta l_{s} - y + \Delta y_{c0})}{l_{s0}} & y < \Delta y_{c0} + \Delta l_{s0} \\ 0 & y \ge \Delta y_{co} + \Delta l_{s0} \end{cases}$$
(5.32)

Така в отчетено, че нишката от СПФ има само еднопосочно действие върху свободния край на конзолата и че ако деформацията на конзолата надмине сумата от предварителните деформации на конзолата и нишката от СПФ, нишката няма да понесе натоварване на натиск.

Друго важно допускане за новия динамичен модел следва от геометричния анализ на конструкцията на харвестера. От формула (5.15) е видно, че ако числителят стане отрицателен, ъгълът φ също става отрицателен. Конструктивно това е невъзможно, защото топлата пластина опира нишката при ъгъл $\varphi=0$ и за да стане този ъгъл отрицателен трябва пластината да проникне през нишката, което е невъзможно. На базата на тези разсъждения е записана зависимостта

$$\varphi = \begin{cases} \arctan \frac{y - \Delta y_{c0}}{b} & y - \Delta y_{c0} > 0\\ 0 & y - \Delta y_{c0} \le 0 \end{cases}$$
(5.33)

Еднопосочното действие на нишката от СПФ оказва влияние и на демпферирането на системата, поради което

$$\beta = \begin{cases} \beta_{SMA} + \beta_c & y < \Delta y_e + \Delta l_{S0} \\ \beta_c & y \ge \Delta y_e + \Delta l_{S0} \end{cases}$$
(5.34)

където β_{SMA} е коефициент на демпфериране на нишката от сплав с памет на формата, а β_c е коефициент на демпфериране на пиезоелектричната конзола.

Съставен е динамичен модел, описващ се с диференциалните уравнения

$$m\frac{d^{2}y}{dt^{2}} + \beta\frac{dy}{dt} + k_{c}y = F_{SMA}$$

$$\rho Ac_{p}\frac{dT}{dt} - h_{c}A_{c}\left\{T_{\infty} - T + T_{hp}\left[\varphi(y)\right]\right\} = 0$$
(5.35)

За да се реши горната система диференциални уравнения числено, е понижен редът ѝ във вида

$$\frac{dy}{dt} = v$$

$$\frac{dv}{dt} = -2\eta v - \Omega^2 y = \frac{F_{SMA}}{m}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_c A_c}{\rho A c_p} \left\{ T_{\infty} - T + T_{hp} \left[\varphi(y) \right] \right\}$$
(5.36)

където е положено $\eta = \frac{\beta}{2m}$ и $\Omega = \sqrt{\frac{k_c}{m}}$. В показания динамичен модел е пренебрегнато влиянието на

пиезоелектричния ефект върху коравината на конзолната греда. За начални условия при t=0 са избрани $y=y_{c0}$, v=0, $T=T_{\infty}$.

5.5 Решаване и изследване на решението на подобрения модел

Системата диференциални уравнения е решена числено чрез неявен метод на Euler от 5-ти ред. За целта е съставена оригинална програма на Maple.

На фиг. 5.12 е показано решението за преместването на свободния край на конзолата за избраните и пресметнати горе данни. На фиг. 5.13 и 5.14 са дадени скоростта и ускорението, а графика на температурата е показана на фиг. 5.15. Изменението на температурната деформация е показано на фиг. 5.16.



Фигура 5.12: Преместване y(t) на масата

0.015 0.010 0.005 -0.005 -0.01 -0.01

Фигура 5.14: Ускорение a(t) на масата





Фигура 5.16: Температурна деформация $\Delta Ls(t)$

Получените резултати показват, че вибрациите на системата са модулирани честотно и амплитудно в резултат, на което може да се приеме, че движението се извършава в условия на параметрична резонансна система. Получените по-горе решения са за време равно на 5 времеконстанти. При период от 10 времеконстанти се вижда, че температурата стига до равновесно положение, около което извършва трептения с честотата на механичната част (фиг.5.18.).



Фигура 5.18: Поведение на температурата за време 10 т.

За да се изследва причината за честотната модулация, е извеждена зависимостта за собствената честота на харвестера. Понеже еластичната конзола и еластичната нишка от СПФ може да се разгледат като паралелно свързани пружини, то еквивалентната им еластична константа k_{Σ} е

$$k_{\Sigma} = k_c + k_{SMa} \,, \tag{5.37}$$

където k_c е еластичната константа на пиезоелектричната конзола, а еластичният коефициент на нишката от СПФ е

$$k_{sma} = \frac{E(T)A}{l_{S0}}.$$
(5.38)

където е намерено, че той се изменя между 261,8 и 785.4 N/m. За собствената честота на енергийния харвестер можем да се запише

$$\Omega_{\Sigma} = \sqrt{\frac{k_c + k_{sma}}{m}} \,. \tag{5.39}$$

Амплитудната модулация е вследствие на температурното скъсяване на нишката, което внася директни промени в движението на обобщената маса. Освен това прекъсванията във функциите на ъгъла на завъртане на топлата пластина и на демпферирането може също да модулират амплитудите на трептенията. Промяната в демпферирането води до промени и в честотата

Периодът на температурните трептения е пропорционален на времеконстантата $\tau = 0,46$ s. От графиките е измерен периода на температурните трептения 0,86 s, което е 1,87 τ и съответства на температурна честота от 1,62 Hz. Периодът на механичните трептения е 0,2362 s, съответстващ на механична честота от 42,34 Hz. Определената тук механична честота е над горната граница на изчисления диапазон, от което може да се заключи, че в оценката на честотите по двата подхода има известни отклонения.

По-надолу се дискутира влиянието на масата върху параметрите на решението. Прието е, че първоначалната маса е увеличена на 144,6 g, а всички други параметри са с предишните си стойности. Преместването е изобразено на фиг. 5.22, на фиг.5.23 е показана скоростта, температурата е на фиг.5.25. От това решение е видно, че има по-малка разлика между периодите на температурата и на механичната част. Отново се забелязва тенденция към устойчиво решение, което се потвърждава и от графиката на фазовия портрет.



Следващото решение е за маса 12,6 gr и диаметър на нишката 0,1 mm, т.е. два пъти по-дебела нишка. На фиг. 5.27 и фиг. 5.28 са представени съответно преместването и температурата за време от 5т, а същите графики за време 5т са показани на фиг. 5.29 и фиг. 5.30. Фазовият портрет е представен на фиг. 5.31.



оконострание при d=0.1 mm и маса

Фигура 5.28: Решение при d=0,1 mm и маса 12,6 gr за t=5т:температура





gr за t=2т: температура

Фигура 5.31: Фазов портрет v=v(y) при d=0,1 mm и маса 12,6 gr t=5т

Тук почти не може да се различи влиянието на механичните трептения върху температурната графика. Освен това затихването в стационарния режим още повече намалява това влияние. Можем да се заключи, че при двойно по-голяма времеконстанта периодът на температурните трептения е също два пъти по-голям.

Едно решение за преместването на динамичния модел с голяма времеконстанта 4,61 s и малка маса 12,6 gr е дадено на фиг. 5.32. На фигурата ясно се виждат двата вида модулации. Видно е, че с повишаване на температурата честотата на механичните трептения също се увеличава. Тук е интересно да се отбележи, че механичните трептения не са модулирали температурната графика и тя е гладка крива. На фиг.5.34 е дадена температурната деформация на нишката от СПФ. Тя също е гладка крива. Тук се забелязва, че формата на температурната деформация съвпада с формата на амплитудната модулация на механичните трептения, показани на фиг. 5.34.



gr с честотна и амплитудна модулация



Фигура 5.34: Температурна деформация за т=4,61 и

m=12,6 gr

При малка маса 2,6 gr и голяма време константа са получени резултати, показани на фиг. 5.35 -5.39. Видно е, че според очакванията собствената честота е увеличена и в преходния режим преместванията са малки.



Фигура 5.35: Решение за маса m=2,56 gr и d=0,1 mm: преместване.



Фигура 5.37: Решение за маса m=2,56 gr и d=0,1 mm: скорост.



Фигура 5.36: Решение за маса m=2,56 gr и d=0,1 mm: температура.



Фигура 5.39: Фазов портрет v(y) за маса m=2,56 gr и d=0,1 mm.

5.6 Конструктивна концепция на експерименталния стенд

Стендът за изследване на СПФ-ПЕХ е показан на фиг. 5.40. Сигналите от сензорите на СМА-ПЕХ 1 се обработват чрез система за събиране и обработване на данни (DAQ) 2. Сензорите и нагревателя се захранват чрез два изправителя 3, 4 и терморегулатор 5. Изходът на DAQ-а е включен в лаптоп 6 където експериментът се управлява чрез LabVIEW програма.



Фигура 5.40: Експериментална установка за изследване на СПФ-ПЕХ: 1. СПФ-ПЕХ, 2. Система за събиране на данни; 3., 4. Захранващи блокове; 5. Терморегулатор; 6. Лаптоп.



Фигура 5.41: Близък план на СПФ-ПЕХ. 1. Силов сензор; 2. Гореща пластина; 3. Нагревател; 4. Пиезоелектрична конзола; 5. Акселерометър. 6. Термодвойка за нагревателя; 7. Термодвойка за стайна температура

На фиг. 5.41 е показан СПФ-ПЕХ със сензорите. Пиезорезистивен МЕМС силов сензор 1 тип FSG15N1A измерва надлъжната сила в СПФ жицата. Топлата платина 2 се върти около неподвижна ос на нагревател 3, който е част от поялник. Ускорението на конзолната греда 4 ние измерваме чрез три-осев MEMC акселерометър 5 тип ADXL345.

За получаване на необходимите температурни данни ние използваме три термодвойки. Термодвойката 6 измерва температурата на нагревателя. Термодвойката 7 се използва за измерване на стайната температура. Поради много малките им диаметри СПФ жицата и нейната термодвойка не може да се видят на снимката.

За да повишим бързодействието на температурния сензор за СПФ жицата ние използваме термодвойка с малък диаметър.

5.9 Експериментални резултати

С помощта на описаната по-горе експериментална постановка са проведени серия опити с различни параметри. Обработени резултати от един експеримент са дадени на фигурите по-долу.

Данните от акселерометъра, чрез които се измерва ускорението на свободния край на конзолата са дадени на фиг.5.52. С известни уговорки може да се приеме, че ускорението се променя по хармоничен закон с амплитуда 0.006 m/s².

Изменението на силата е показано на фиг. 5.53. Поради сравнително ниската амплитуда на сигнала от около 0,012 N. Сравнението на графиките от фиг. 5.52 и фиг. 5.53 ни навежда на, факта че инерционната сила и ускорението са в противофаза, с което показва, че е спазен принципът на *D'Alembrt*. Въпреки привидно нестабилния характер на функцията на температурата от фиг. 5.54 следва заключението, че температурата се изменя по периодичен закон със същата честота както на останалите измерени параметри. Напрежението от фиг. 5.55 потвърждава периодичността на процесите. Чрез напрежението при известно товарно съпротивление R_L е опредена пиковата мощност на



Фигура 5.52: Експериментална графика на ускорението спрямо времето



Фигура 5.53: Експериментално измерена графика на силата в нишката



на температурата на нишката спрямо времето

Фигура 5.55: Измерено изходно напрежение във функция на времето

изследвания енергиен генератор. В настоящия случай за товарно съпротивление R_L=10kΩ е получено

$$P = \frac{U^2}{R_L} = \frac{0.08^2}{10000} = 6,5 \ \mu W \tag{22}$$

където измерената максимална амплитуда на напрежението е U=0,08 V. В действителност е получена максималната експериментално установена пикова амплитуда от 0.4 V, и съответстващата ѝ мощност от 80 µW.

5.10 Анализ на резултатите

Сравнението на експерименталните с теоретичните резултати дава относително добро потвърждение за истинността на теоретичния модел.

Малките разлики по отношение на честотата на процесите в двата вида изследвания предполагаме, че се дължат на приетите опростяващи предпоставки. Някои от тези предпоставки касаят пресмятанията за коравината на пиезоелектричната конзола. Пренебрегнато е неравномерното сечение като пиезоелектричния слой не взет предвид в пресмятанията. Не е пресметната промяната на коравината на конзолата, което се дължи на обратния пиезоелектричен ефект.

При моделирането на въртенето на топлата пластина не е взето предвид триенето във въртящата двоица, не е отчетено влиянието на инерционните сили, които може да предизвикат отскок и прекъсване във преместването.

В топлинните процеси е прието че топлината от топлата пластина към нишката се пренася само чрез топлопроводимост. Не са описани точно конвекцията и лъчистата топлина. В действително топлопроводимост има само когато топлата пластина допира нишката от СПФ. Не е взет предвид факта, че нишката се нагрява неравномерно по дължината си. Разликите в изчислената и експерименталната равновесни температури по-всяка вероятност се дължи на този факт. Термодвойката измерва топлината само в една точка и не дава представа за разпределението на температурата по дължината на нишката. Тук се проявява и един съществен недостатък на експерименталната установка за измерване на температурата на нишката. В бъдещи изследвания предвиждаме да поставим поне три термодвойки по дължината на нишката от СПФ. По този начин може да се измери средната температура и тя да се приема за меродавна.

Като цяло може да се направи заключението, че има много добра потвърждаемост на резултатите от изследването на теоретичния модел с данните от експеримента.

5.11 Обобщаване на резултатите за глава V

Проектиран е и изработен оригинален хибриден енергиен харвестер, съдържащ сплави с памет на формата и пиезоелектричен гъвкав елемент, който преобразува температура на постоянен топлоизточник в електрическа енергия.

Създаден динамичен модел на харвестера, в който термодинамичните процеси са описани чрез взаимно свързани уравнения за механичната и топлинната част.

При създаването на динамичния модел е използван нов инженерен подход за апроксимиране на модула на Young във функция на температурата като по този начин са избягнати сложни микромеханични описания на фазовите трансформации в сплавите с памет на формата.

Доказано е, че пълно възстановяване на дължината на нишката от СПФ в аустенитна фаза се получава едва след разтоварване. Факт, на който досега не се отделя достатъчно внимание в литературата.

Проведени са експериментални изследвания, с които успешно е валидиран теоретичния модел.

Доказване с нови средства на съществено нови страни на познати научни проблеми и теории

Установено е, че трептяща система съставена от жица със сплав от памет на формата еластична греда или мембрана и маса притежават свойства на параметрична резонансна система, на която собствената честота зависи от температурата на сплавта с памет на формата.

Установено е, че трептяща система съставена от жица със сплав от памет на формата еластична греда или мембрана и маса притежават свойства на параметрична резонансна система, която възпроизвежда честотно и

амплитудно модулирани трептения, зависещи от температурата на сплавта с памет на формата и по-точно от нейния модул на линейна еластичност и дължина.

Създаване на нови класификации, методи на изследване, нови конструкции, схеми технологии и др.

Проведени са експерименти с енергиен харвестер с прекъснато действие на топлинния поток, доказана неговата функционалност и са потвърдени теоретичните резултати

Проведени са експерименти с енергиен харвестер тип СПФ-ПЕХ, съставен от жица от СПФ и еластична конзола или мембрана и са изследвани условията за резонанс като условие за най-добра работа на устройството.

Глава VI Проектиране на СМА-ПЕХ минихарвестер

6.1. Основни конструктивни концепции

Създаденият в глава V енергиен макрохарвестер е възможно да се минимизира и миниатюризира. Основанието за тези твърдения са, че с намаляване на размерите съгласно теорията на мащабирането силите в СПФ не намаляват и електрическата енергия на пиезоелектричната част не се редуцира.

В тази глава се разглежда устройство с размери по-малки от 10 mm за преобразуване на отпадъчна топлинна енергия в електрическа, чрез вибрираща еластична пиезоелектрична пластина, задвижвана чрез тънка нишка от СПФ с цел генериране на електрически заряди с минимална изходящата мощност от няколко микровата.

Тази задача се решава като се създава устройство за преобразуване на отпадъчна топлина в електрическа енергия, включващо корпус, към който е прикрепен деформируем елемент с пиезоелектричен слой, характеризиращо се с това, че деформируемият елемент представлява напрегната лъкообразно огъната еластична пластина, на една от плоските страни на която е нанесен пиезоелектричният слой. Еластичната пластина е прикрепена към корпуса в средната си част посредством държач, като за осигуряване на деформацията на еластичната пластина между двата ѝ края е натегната поне една нишка, изработена от сплав с памет на формата и фиксирана в двата си края за краищата на еластичната пластина. В натегнатата си форма нишката от сплав с памет на формата се опира по дължината си до монтирана към корпуса топлопроводяща шина, свързана към източник на топлина. Във възстановената си форма нишката от сплав с памет на формата на еластичната пластина на еластичната пластина и фиксирана в се опира по дължината си до монтирана към корпуса топлопроводяща шина, свързана към източник на топлина. Във възстановената си форма нишката от сплав с памет на формата не се опира до топлопроводящата на еластичната пластина топлопроводяща шина, към източник на топлина. Към двете срещулежащи плоски страни на еластичната пластина директно или индиректно са прикрепени електропроводящи изводи за отвеждане на генерираната от пиезоелектричния слой електроенергия.

В предпочитан вариант на полезния модел носачът се състои от два прикрепени към корпуса и електроизолирани един от друг опорни елемента от електропроводящ материал, при което единият опорен елемент е фиксиран към плоската страна на еластичната пластина с пиезоелектричния слой, а другият опорен елемент е фиксиран към срещулежащата плоска страна на еластичната пластичната пластина, като опорните елементи имат съответни електропроводящи изводи за отвеждане на генерираната от пиезоелектричния слой електроенергия.

В друг предпочитан вариант на изпълнение нишката от сплав с памет на формата е нагъната във формата на меандър.

За предпочитане нишката от сплав с памет на формата е прикрепена към краищата на еластичната пластина чрез втулки или кримпове.

6.2 Предимства на минимизирания СМА-ПЕХ

Предимствата на предложеното устройство, съгласно полезния модел се основават на ниската температурна времеконстанта на тънката нишка от сплав с памет на формата и на липсата на топлинен контакт между нишката и еластичната пластина по цялата ѝ дължина. В следствие на тези предимства са създадени условия за бързо загряване и охлаждане и съответни на тях бързи свивания и отпускания на нишката от СПФ. Тези кратковременни деформации предизвикват вибрации в еластичната пластина, чийто пиезоелектричен слой генерира електрически заряди.

Загрятата нишка от СПФ свива еластичната пластина и това отдалечава нишката от топлопроводящото тяло. Отдалечената нишка от СПФ се охлажда и под действието на еластичната пластина се удължава. Същевременно еластичната пластина се отпуска и това води до опиране на нишката в топлопроводящото тяло. Така при съществуване на определена разлика между температурата в корпуса и тази на топлопроводящото тяло се създават условия за цикличното повторение на деформациите и възникване на напречни вибрации в пиезоелектричната пластина. Колкото по-висока е честотата на тези вибрации, толкова по-голямо е генерираното от пиезоелектричния слой количество електричество.

6.3 Описание на проектираният СМА-ПЕХ минихарвестер

Предложеното устройство за преобразуване на отпадъчна топлина в електрическа енергия се състои от корпус 1, за предпочитане топлинно изолиран, към който е прикрепен деформируем, елемент представляващ напрегната лъкообразно огъната еластична пластина 5, на една от плоските страни на която е нанесен пиезоелектричен слой 6. За предпочитане еластичната пластина 5 е изработена от бронз, месинг, стомана, но

може да бъде изработена и от друг подходящ материал. Пиезоелектричният слой 6 може да е изработен, например, от PZT, AlN, ZnO₂ или от друг подходящ материал с пиезоелектрични свойства.

Еластичната пластина 5 е прикрепена към корпуса 1 в средната си част посредством държач 2. Държачът може да е монолитен или да е съставен от два и повече елемента. За да се осигури поддържане на еластичната пластина в напрегнато положение, след огъването ѝ между двата ѝ края е натегната като тетива поне една нишка 7, изработена от сплав с памет на формата (СПФ). Сплавта с памен на формата за изработването на нишката 7 може да е, например, нитинол. Нишката от СПФ 7 е фиксирана в двата си края за краищата на еластичната пластина 5. Осигурена е и топлопроводяща шина 8, монтирана на корпуса и свързана към източник на топлина. Топлопроводящата шина 8 е изработена от подходящ топлопроводим материал, например, мед, алуминий, дуралуминий и други. Топлопроводящата шина е закрепена неподвижно към корпуса чрез винтове. В натегнатата си форма нишката 7 се опира по дължината си към топлопроводящата шина 8. Във възстановената си форма нишката 7 не се опира до топлопроводящата шина 8. За отвеждане на генерираната от приезоелетричния слой 6 електроенергия към двете срещулежащи плоски страни на еластичната пластина 5 директно или индиректно са прикрепени електропроводящи изводи.

Подходящ източник на топлина са, например, топли машини, топлина генерирана от компютри или мощна електронна апаратура, загрята земна повърхност, топлина на тялото и други.

При ниска температура, зависеща от химичния състав, нишката от сплав с памет на формата 7 се намира в мартензитно състояние. Тогава нейният модул на линейна еластичност е нисък и тя се деформира лесно. При това деформиране нишката 7 се опъва от еластичната пластина 5 и се удължава. След загряване на нишката 7 над определена температура, зависеща от химичния ѝ състав, структурата ѝ се превръща от мартензит в аустенит. В аустенитно състояние нишката 7 става по-твърда, защото модулът



Фигура 6.1 Конструктивна схема на миниатюризирания СМА-ПЕХ; а) общ вид; б) вариант с менадрова форма на нишката от 1.СПФ. Корпус; 2. Придържаща шина, 3 Основна шина, 4. Изолираща лента, 5. Еластична пластина, 6.Пиезоелектричен слой, 7. Нишка от сплав с памет на формата, 8. Топлопроводяща шина, 9. Втулка, 11. Пластмасов винт, 12 Винт

на линейна еластичност се е повишил. Освен това в аустенитно състояние нишката 7 възстановява еластичните деформации, които е получила, когато е била в мартензитната форма. Това възстановяване на формата в случая се изразява в скъсяване на нишката 7 до недеформираната ѝ дължина. В предпочитан вариант на полезния модел държачът е оформен от два опорни елемента, под формата на две шини от електропроводящ материал, за които са свързани електропроводящите. Електропроводящите шини може да са изработени, например, от дуралуминй, бронз или месинг.

В примерното изпълнение, дадено на фигура 6.1 а), към корпуса 1, посредством електронепроводящи винтове 10 и 11 са закрепени двете електропроводящи шини 2 и 3 на държача. Шините в конкретния случай имат Г-образна форма. Между шините на държача 2 и 3 е разположена изолираща лента 4. Към основна шина 3 посредством придържаща шина 2 е притисната огънатата еластична пластина 5, върху която е нанесен пиезоелектричен слой 6. Придържащата шина 2 контактува с пиезоелектричния слой 6. Основната шина 3 служи за електрически извод на пиезоелекричната повърхнина, която контактува с еластичната пластина 5, а придържащата шина 2 осигурява електрически контакт с външната повърхнина на пиезоелектричния слой 6. В специални отвори в краищата на еластичната пластина 5 е монтирана нишка от сплав с памет на формата 7, която е фиксирана осово чрез две втулки 8. Нишката от СПФ 7 поддържа деформацията на еластичната пластина 5. Втулките 8 са фиксирани неподвижно върху нишката от СПФ от външната страна на еластичната пластина 5. Нишката от СПФ 7 може да се прикрепи към еластичната пластина 5 и чрез кримпване на краищата на нишката, които се подават от отворите на еластичната пластична 5.

В показания на фигура 2 вариант на устройството за преобразуване на отпадъчна топлина в електрическа енергия със същата конструкция нишката от сплав с памет на формата 7 има меандрова форма с цел да се увеличи опъновата сила и да се повиши нагревната площ. Меандровидно нагънатата нишка с повече от един клон преминава през отворите, изработени в краищата на еластичната пластина.

От страната на пиезоелектричната пластина 5 към нишката от СПФ 7 е допряна топлопроводяща шина 8, която е закрепена към корпуса 1 чрез винтове 11. Топлината от топлинен източник се предава чрез топлопроводящата шина 8 на нишката от СПФ 7. Нишката от СПФ 7, се загрява и след достигане на определена температура се свива, защото под действието на ефекта на паметта на формата се стреми да възстанови първоначалната си дължина. Същевременно свиването на нишката от СПФ 7 деформира допълнителното еластичната пластина 5 и пиезоелектричния слой 6 генерира електрически заряд. Това допълнителното свиване на еластичната пластина 5 води до успоредно преместване на нишката от СПФ 7, при което тя се отдалечава от топлопроводящата шина 8. При това отдалечаване нишката от СПФ 7(14), се охлажда и под действието на силата на еластичната пластина 5 се удължава до първоначално зададената дължина. Еластичната пластина 5 се връща също в първоначално деформираната си форма и това води до осъществяване на повторен контакт между топлопроводящата шина 8 и нишката от СПФ 7. Следва многократно повторение на гореизброените премествания. Поради малката маса на нишката от СПФ 7 загряването и охлаждането и се извършват с достатъчно висока за появата на вибрации скорост. Тъй като при всяко деформиране и асластичната пластина, при по-висока честота на вибрациите се генерира по-голям заряд и съответно по-високо електрическо напрежение.

По този начин е постигната поставената цел за създаване на устройство за преобразуване на отпадъчна топлина в електрическа енергия.

Така проектираното устройство може да бъде изработено чрез технологиите за микроелектромеханичните (MEMC) системи и да се миниатюризира. В този случай е предвидено да се използва тънък лист от СПФ, върху който е нанесен тънък пиезоелектричен филм. Разработването на микрохарвестер е предмет на бъдеща работа по темата.

6.4 Обобщаване на резултатите от глава VI

На базата на изследванията от глава V е проектиран миниатюрен енергиен харвестер с нишка от СПФ и пиезоелектрична греда.

В проектираният тук миниатюрен енергиен харвестер обемът на загряваното тяло е малък, защото за целта се използва тънка нишка от СПФ. Това води до намаляване на температурната времеконстанта, повишаване на честота на вибрациите и като цяло повишаване на мощността.

Създадени са предпоставки за проектиране на енергиен микрохарвестер.

ПРИНОСИ НА ДИСЕТАЦИОННИЯ ТРУД

Доказване с нови средства на съществено нови страни на познати научни проблеми и теории

Установено е, че трептяща система съставена от жица със сплав от памет на формата еластична греда или мембрана и маса притежават свойства на параметрична резонансна система, на която собствената честота зависи от температурата на сплавта с памет на формата.

Установено е, че трептяща система съставена от жица със сплав от памет на формата еластична греда или мембрана и маса притежават свойства на параметрична резонансна система, която възпроизвежда честотно и амплитудно модулирани трептения, зависещи от температурата на сплавта с памет на формата и по-точно от нейния модул на линейна еластичност и дължина.

Създаване на нови класификации, методи на изследване, нови конструкции, схеми технологии и др.

Проведени са експерименти с енергиен харвестер с прекъснато действие на топлинния поток, доказана неговата функционалност и са потвърдени теоретичните резултати

Проведени са експерименти с енергиен харвестер тип СПФ-ПЕХ, съставен от жица от СПФ и еластична конзола или мембрана и са изследвани условията за резонанс като условие за най-добра работа на устройството.

Научно-приложни приноси:

Изработен е стенд за изследване на СПФ, с който е обогатена научно-техническата база на ТУ-София и е създадена възможност за повишаване на знанията в областта на СПФ на студенти, докторанти и преподаватели.

Изработен е енергиен харвестер със СПФ с прекъсване на топлинния поток и опитна постановка за изследването му. Проведени са експерименти, потвърждаващи теоретичните резултати.

Изработен е енергиен харвестер със СПФ и пиезоелектрична конзола тип СПФ-ПЕХ и опитна постановка за изследването му. Проведени са експерименти, потвърждаващи теоретичните резултати.

Създаден е стенд за калибриране на силов сензор, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създаден е стенд за калибриране на сензор за позициониране, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създаден е стенд за калибриране на акселерометър, намиращ приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Създадена е методика и за изработване и изследване чрез стенд за калибриране на термодвойка, намираща приложение в лабораторни упражнения на студентите.

Литературни източници използвани в автореферата

- 1. Pierens M. Thermeau J.P. Le Pollès T. Duthil P. Experimental characterization of a thermoacoustic travelling-wave refrigerator. International conference on fluid mechanics, heat transfer and thermodynamics (2011)
- <u>http://www.inspection.ie/insize-2173-360-insize-digital-protractor-description-insize-digital-protractor-used-as-level-and-protractor-range-0-360-degrees-resolution-0-1-degree-buttons-data-hold-zero-set-power-on-off-absolute-and-relative-measurement-work-surfaces-4.html (04.04.2016)</u>
- 3. Lopez-Walle B., Gauthier M., Chaillet N., Dynamic modelling for thermal micro-actuators using thermal networks, International Journal of Thermal Sciences Volume 49, Issue 11, November 2010, pp. 2108–2116.
- 4. Brailovski V., Trochu F., Daigneault G., Temporal Characteristics of Shape Memory Linear Actuators and their Application to Circuit Breakers, *Materials and Design*, vol. 17, no. 3, 1996, pp. 151–158.
- Madill D., Wang D., Modeling and L2-Stability of a Shape Memory Alloy Position Control System, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 6, no. 4, 1998, pp. 473–481.
- 6. Sukhatme S., A Textbook on Heat Transfer. Hyderabad: Universities Press, 1996.
- 7. McNichols J., Cory J, Thermodynamics of Nitinol, Journal of Applied Physics, vol. 61, no. 3, 1987, pp. 972–984.
- 8. <u>http://www.piezo.com/prodbm5disk.html</u> (11.12.201)

RESUME

ENERGY HARVESTING BY SHAPE MEMORY ALLOYS

These days production of energy from alternative energy sources is one of the hottest topics. Consumption of more energy leads to a dynamic running low of resources such as coal, oil and natural gas and necessitates the demand of their replacement with new technologies. The development of the renewable energy sources (RES) that use the energy potential of the Sun, wind, water and other natural resources gives comparatively good results, despite the relatively low efficiency and high cost.

Energy micro-generators, also known as energy harvesters, are devices that convert waste energy of the environment into electric power with low power of the order of tens of microwatts to milliwatts. Their task is to ensure the self-contained power supply or batteries charging of micropower consuming units, such as modern microelectronic, microelectromechanical systems (MEMS) and nanoelectromechanical systems (NEMS). The main difference between the energy harvesters and the renewable energy resources is the amount of power generated and the type of energy sources used, as with the harvesters energy sources are usually secondary or waste as vibrations of machines, movement of people, heat of industrial and domestic appliances, light of lighting fittings, radio waves, etc.

This dissertation includes designed, modelled and tested, theoretically and experimentally, energy-extraction devices that use shape-memory alloys (SMA). These devices convert heat energy into mechanical utilizing the one-way effect of the shape memory alloys. The resulting mechanical vibrational energy is converted into electricity via the piezoelectric effect. This type of energy harvesters has a combined characteristics, because they use a combination of two types of conversion, thermal-mechanical and mechanical-electrical. On the other hand, this kind of energy harvesters can be associated with the hybrid ones because they can use two energy sources different by nature, thermal and mechanical, as along with the thermal impact they are subjected to additional external mechanical vibration.

A stand for testing of shape-memory alloys has been designed and made to get comprehensive information of the properties of shape-memory alloys. By using the data of the tests, made on this stand, it was possible to make more precise dynamic models and to obtain confirmatory experimental evidence.

Conducted has been research with the objective to investigate the possibility of creating an energy harvester with interrupted access to the heat flow. With the help of this research, it has been shown that energy harvester with a similar effect can be made.

Designed and constructed was an energy harvester that converts the heat of a constant temperature source into mechanical vibrations using SMA and then an energy vibration conversion into electrical energy via a piezoelectric vibrating cantilever. This type is called harvester SMA-PEH (shape-memory alloy-piezoelectric harvester). Created have been dynamic models of SMA-PEH, conducted has been theoretical and experimental research with a high degree of validation.

Designed was a miniaturized version of the energy SMA-PEH - filed was an application for a utility model. A total of eight publications on the subject of the dissertation have been made, one of which is the article indexed in Scopus.