



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА”

маг. инж. РУМЯНА АНГЕЛОВА СТОЯНОВА

*“РАЗРАБОТВАНЕ НА ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ И МЕХАНИЗМИ ЗА
ЕНЕРГИЙНИ ПИЕЗОХАРВЕСТЕРИ”*

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: „Микроелектроника“

Габрово, 2024 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА”

маг. инж. РУМЯНА АНГЕЛОВА СТОЯНОВА

**“РАЗРАБОТВАНЕ НА ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ И МЕХАНИЗМИ ЗА
ЕНЕРГИЙНИ ПИЕЗОХАРВЕСТИРИ”**

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: „Микроелектроника“

Научен/ни ръководител/и: 1). доц. д-р инж. Велимира Димитрова
Тодорова

2). проф. д-р инж. Анатолий Трифионов
Александров

Рецензенти: 1). проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев
2). доц. д-р инж. Никола Драганов
Драганов

Габрово, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Електроника“ към факултет „Електротехника и Електроника“ на Технически университет- Габрово, проведен на 15.10.2024г.

Дисертационният труд съдържа 160 страници. Научното съдържание е представено в увод, 4 глави, анализ и заключения и включва 180 фигури и 77 таблици. Цитирани са 200 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката/изследванията на/по дисертационния труд са извършени в катедра „Електроника“ към факултет „Електротехника и електроника“ и катедра „Машиностроене и уредостроене“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет- Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои наг.
от.....ч. в зала.....на Технически университет-Габрово.

Автор: маг. инж. Румяна Ангелова Стоянова

Заглавие: “РАЗРАБОТВАНЕ НА ИНОВАТИВНИ МЕТОДИ И МЕХАНИЗМИ ЗА ЕНЕРГИЙНИ ПИЕЗОХАРВЕСТИРИ“

Тираж: 3 броя

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Нарастващата нужда от енергийни ресурси, води до повишено търсене на алтернативни технологии и възобновяеми ресурси в сферата на енергодобива.

Спецификата на промишления енергодобив определя към настоящия момент голямата нужда от изкопаеми горива, които се изчерпват с нарастващи темпове, като интензивното им използване също така води до влошаване на екологичната обстановка, особено в локациите на енергогенериращите предприятия. Също така с разширеното използване на компактни, мобилни устройства с разширени функционални възможности се налага използването на множество миниатюрни ذخранващи източници, които изискват сравнително редки ресурси и често след изтичане на жизнения им цикъл представляват опасност за околната среда.

Механичната енергия е широко разпространена в околната среда, като може да бъде преобразувана в полезна електрическа енергия. Пиезоелектричното преобразуване е най-значимият механизъм за събиране на механична енергия поради високия си коефициент на електромеханично свързване и пиезоелектричен коефициент в сравнение с електростатичното, електромагнитното и трибоелектричното преобразуване.

Затова настоящият дисертационен труд разглежда възможността за създаване на миниатюрен генератор на електрическа енергия, която да бъде генерирана от механични вибрации, които се явяват несъществени или паразитни за дадено явление.

Цел и задача на дисертационния труд

Във връзка с това настоящата дисертационна разработка има за цел – създаване и оптимизация на съществуващи модели, както и математическо моделиране на пиезоелектрични харвестери от вибрационен и компресионен тип.

Задачите, които трябва да се решат в настоящата разработка са:

1. Представяне на методика за описание на вибрационен харвестер.
2. Разработване на модели на мономорфен и биморфен пиезоелектричен харвестер.
3. Създаване на методика за описание на компресионен пиезоелектричен харвестер.
4. Разработване на модел на компресионен пиезоелектричен харвестер.
5. Експериментални изследвания на предложените модели на пиезоелектрични харвестери от вибрационен и компресионен вид.

Методи на изследване

Методите на изследване имат следната последователност- анализ на състоянието на проблема, анализиране на съществуващи модели на вибрационни и компресионни харвестери, оптимизация и разработване на

нови математически модели, експериментално изследване с цел верификация на предложените модели.

Научна новост

Създадени са математически модели на пиезоелектрични харвестери от вибрационен и компресионен тип. Разширени са еквивалентните схеми с цел определяне на използваемото количество енергия на вибрационен пиезоелектричен харвестер. Предложени са два варианта на планарна конструкция на компресионен пиезоелектричен харвестер и методика за изследването им.

Приложимост

Във връзка с разработката на компресионни пиезоелектрични харвестери е създадена конструкция за по-ефективно събиране на енергия чрез намаляване на разстоянието между активните елементи на харвестера, доказано от направените експериментални изследвания.

Апробация на дисертационния труд

Предложените модели са изследвани експериментално, като част от резултатите, получени при разработката на дисертационния труд, са докладвани на научни конференции с международно участие, три от които са индексирани в SCOPUS.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е структуриран в увод, четири глави, анализ и изводи, списък с публикациите, предоставени от автора, както и списък с цитираната от автора литература, както и декларация за авторство, като общият обем на дисертацията е от 160 страници.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА- ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР НА ЕНЕРГИЙНИ ХАРВЕСТЕРИ И ТЕХНИТЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1.1: Различни източници на енергия за енергийни харвестери [42]

Енергиен източник	Енергийна плътност	Литературни източници
Акустичен източник	0,003 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$, за 75Db 0,96 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$,	Patel, & Roundy, 2000
Температурна разлика	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	(Roundy, Steingart, Frechette, 2004)
Радио честоти	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(Yeatman, 2004)
Дневна светлина	100 mW/cm ² (естествена светлина) 100 W/cm ² (изкуствена светлина)	Средно измерена
Термоелектрична	60 W/cm ²	(Stevens, 1999)
Вибрации (микروجенератори)	4 W/cm ³ (човешко движение – Hz) 800 W/cm ³ (машини – kHz)	(Mitcheson, Green, Yeatman, & Holmes, 2004)
Вибрации (пиезоелектрични)	200 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	(Roundy, Wright, & Pister, 2002)
Въздушно течение	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(Holmes, 2004)
Натискане на клавиши	50 J/N	(Paradiso & Feldmeier, 2001)
Пиезокристали в обувки	330 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	(Shenck & Paradiso, 2001)
Ръчни ел. генератори	30 W/kg	(Starner & Paradiso, 2004)

Възможни източници на енергия на ЕН са: радиовълнов фон, фотоволтаични източници, термоелектрични източници, електростатични

харвестери, електромагнитни харвестери, пироелектрични и пиезоелектрични харвестери.

3.2. *Пиезоелектрични ЕН-* пиезоелектричен ефект е, когато компресирането на пиезоелектричен материал произвежда електричество. Това се случва, когато има преобразуване на кинетична или механична енергия, дължаща се на деформация на кристала в електрическа енергия. Пиезоелектричните материали могат да произвеждат електрическа енергия, поради механична деформация.

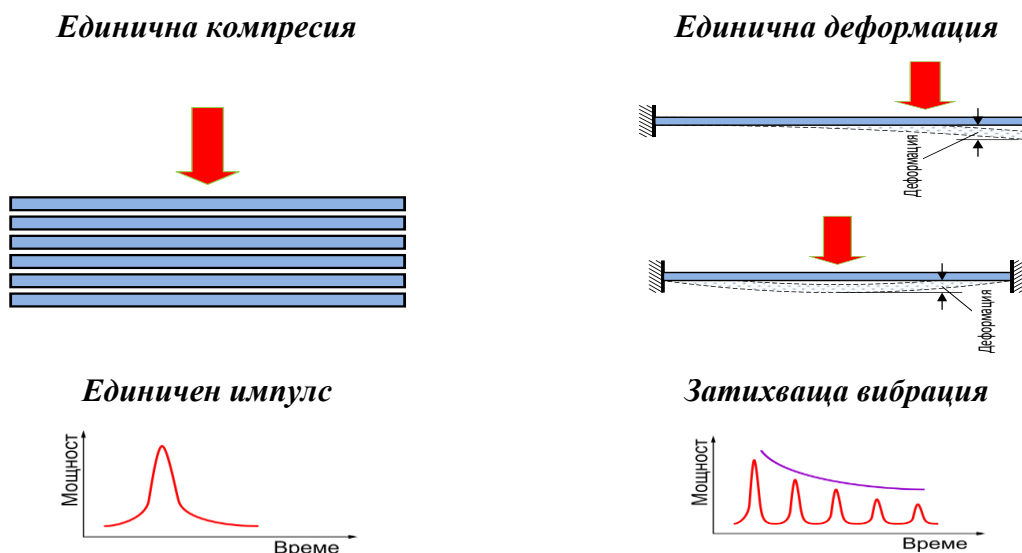
Методи за генериране на електрическа енергия от пиезоелектрични елементи

Когато пиезоелектричен елемент е механично натоварен, той генерира електрически импулс. Съществуват два начина за генериране на енергия от пиезоелектричен елемент - чрез натиск или чрез вибрация. Методът на натиск генерира повече мощност от вибрационният метод, защото включва директен трансфер на енергия към пиезоелектричния модул, но е по-лесно да бъде счупен [68]. Конструктивно тези устройства се реализират по следния начин [68, 158]:

Трябва да се отбележи, че всички предположения и представяния на пиезоелектрични структури, направени дотук, са насочени към описание и моделиране на харвестери от *вибрационен тип*.

Втората група харвестери са от *компресионен тип*, при които освен вибрационна, се наблюдава и пряка механична деформация на активната среда от външното механично усилие, което води до допълнителни затруднения и предизвикателства при процеса на моделирането им.

На фиг. 1.46 е представена конструктивната разлика между компресионен и вибрационен пиезоелектрични харвестери.



а) компресионен харвестер

б) вибрационен харвестер

Фиг. 1.46 Разлика между компресионен и вибрационен харвестер [158]

Няма предложен универсален метод за изследване на механично-електрическите връзки при ПЕХ. Най-често се използват диференциални

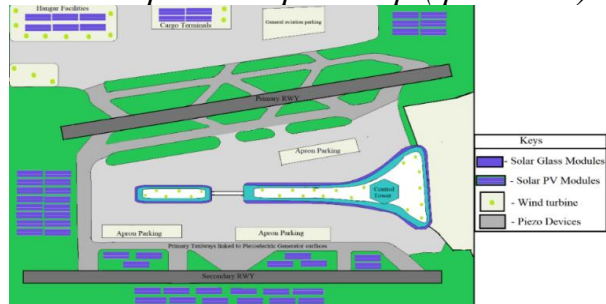
уравнения, като се търси връзки между променливите в двете области (механична и електрическа).

Приложение на пиезоелектричен харвестер

- пиезоелементи вградени в обувка
- пиезоелементи разположени на мостови съоръжения
- модел на компресионен пиезоелектричен харвестер (фиг. 1.50)



Фиг. 1.48 Модел на обувка с пиезоелектрична конзола [16]



Фиг. 1.50 Прототип на проект за генериране на енергия [98]

Извод

От направеният литературен обзор се вижда, че пиезоелектричните харвестери от вибрационен и компресионен вид са перспективни източници за генериране на електрическа енергия от заобикалящата ни среда.

ГЛАВА ВТОРА - МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ ХАРВЕСТЕРИ ОТ ВИБРАЦИОНЕН И КОМПРЕСИОНЕН ВИД

2.1.1. Свойства на униморфен и биморфен ПЕХ

Избрана е пиезоелектрична греда с правоъгълно напречно сечение.

Таблица 2.2. Геометрични размери на вибрационен харвестер

а) еднослоен ПЕХ PPA-1001	б) двуслоен ПЕХ PPA-2014
дължина (l) - 55.4 mm	дължина (l) - 53.00 mm
широчина (w) - 23.4 mm	широчина (w) - 23.4 mm
дебелина (th) - 0.46 mm	дебелина (th) - 0.83 mm
маса (m) - 2.8 g	маса (m) - 2.9 g

Използвани са следните съотношения [115]:

- За изчисляване модула на Юнг за субструктурния слой Y_s и на PZT материала Y_p се използват зависимостите /2.1/:

$$Y_p = \frac{1}{S_{11}^E} = 60.24 \text{ GPa} \qquad Y_s = \frac{1}{S_{33}^E} = 47.62 \text{ GPa} \qquad /2.1/$$

- За описание на позициите спрямо неутралната ос h_a , h_b и h_c /2.2/.

Изчислено е, че за PZT5H $n = 0.79$ от формула /2.1/.

	За PPA- 1001	За PPA- 2014
$h_{pa} = \frac{h_p^2 + 2nh_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)}$	0.19	0.34
$h_{sa} = \frac{h_p^2 + 2h_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)}$	0.11	0.39
$h_{pc} = \frac{nh_s(h_p + h_s)}{2(h_p + nh_s)}$	0.12	0.16

/2.2/

Поради сложността на математическото описание на системите с променливи свойства, ще се въведе ограничение до разглеждане на греда с еднакви свойства по дължината ѝ. В този случай трябва да се изчисли честотният параметър на хармониците на механично трептене на гредата, което ще помогне при описанието на отклонението ѝ, както и на амплитудата на отклонението ѝ [36, 38]:

$$1 + \cos i\alpha * \cos \alpha = 0 \quad /2.4/$$

Долният индекс (1-4), показва че изчислението трябва да се направи и за четирите хармоника на вибрационният ПЕХ.

$$\omega_{1-4} = (\alpha_{1-4})^2 \sqrt{\frac{YI}{ml^4}} \quad /2.6/$$

Където ω е ъгловата честота, Y е модулът на Юнг (при постоянно електрическо поле на пиезокерамиката, l е дължината на гредата, I е инерционният момент, m е съотношението на масата на пиезохарвестера спрямо неговата дължина. I и m се намират по формулите:

$$I = \frac{w * th^3}{12} \quad /2.7/$$

w е широчината на пиезоелектричната греда, а th е дебелината ѝ.

$$m = \frac{M_p}{l} \quad /2.8/$$

M_p е масата на пиезоелектричната греда.

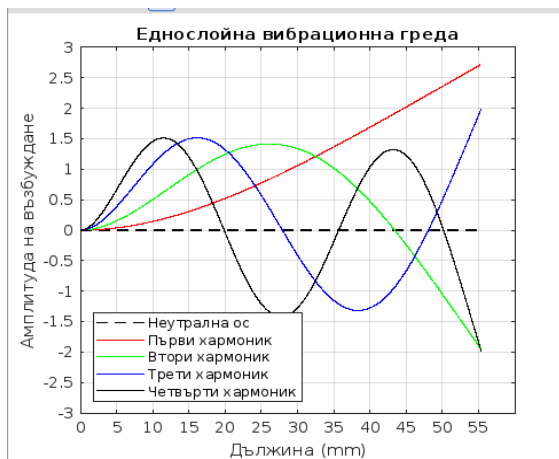
След като се решат уравнения от/2.4/ до /2.8/ се получават основните модални параметри на гредата за отделните хармоници (Таблица 2.4 и фиг. 2.2) на униморфен харвестер и (Таблица 2.5 и фиг. 2.3) на биморфен харвестер.

Таблица 2.4. Модални параметри на еднослойна греда

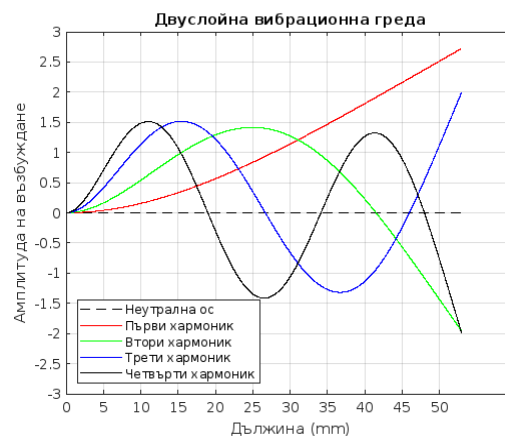
	Честотен параметър (α)	Модална константа (σ)	Естествена честота	
			ω (rad/s)	f (Hz)
Хармоник 1	1,8748	0,734	13.4977	2.1482
Хармоник 2	4,6933	1,0185	84.589	13.4628
Хармоник 3	7,8534	0,999	236.8516	37.6961
Хармоник 4	10,9937	1.003	464.135	73.8693

Таблица 2.5. Модални параметри на двуслойна греда

	Честотен параметър (α)	Модална константа (σ)	Естествена честота	
			ω (rad/s)	f (Hz)
Хармоник 1	1,875	0,735	27,5762	4,3889
Хармоник 2	4,694	1,019	172,8169	27,5047
Хармоник 3	7,854	1,001	483,8923	77,0139
Хармоник 4	11,00	1.004	948,2359	150,9164



Фиг 2.2 Графично представяне на четирите хармоника на еднослойна пиезоелектрична греда



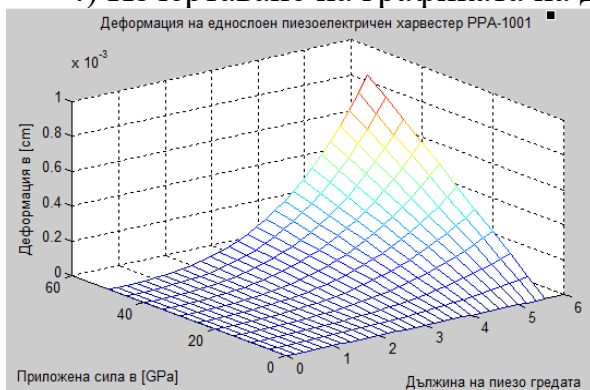
Фиг 2.3 Графично представяне на четирите хармоника на двуслойна пиезоелектрична греда

2.2. Моделиране на еднослоен пиезоелектричен харвестер

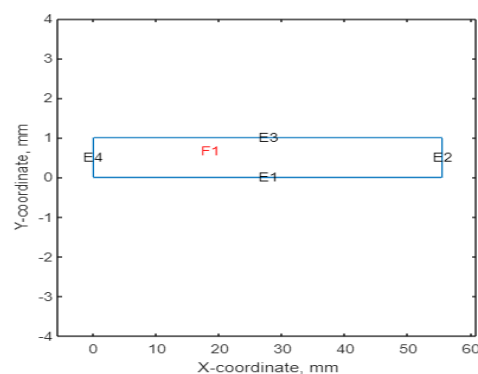
2.2.1. Определяне на пълната деформация на еднослойна греда

За да се изчисли и да се визуализира деформацията на вибрационна греда, е използвана програма Matlab. За целта е необходимо да се изпълнят следните стъпки:

- 1) Въвеждане на геометрични размери на гредата от каталог [161];
- 2) Задаване на натоварването върху гредата F в GPa. За да се покаже деформацията на гредата във всеки един момент по цялата ѝ дължина, се задава натоварването със стъпка за нарастване (в случая е избрана 0.5 GPa);
- 3) Определяне на инерционния момент I гредата по формула /2.7/
- 4) Изчертаване на графиката на деформацията (фиг. 2.4).



Фиг. 2.4. Деформация на PPA-1001



Фиг. 2.5. Положение на гредата спрямо неутралната ос

На фиг. 2.4 се вижда какво е отклонението по цялата дължина на вибрационната греда, когато върху нея е приложена външна сила. Важно е да се направи уточнението, че в левия си край гредата не е свободна, а е захваната към източника на вибрации.

2.2.2. Създаване на математически модел в среда на Matlab

За да се направи анализ на поведението на пиезоелектричната част на харвестера, се изисква решаване на набор от частни диференциални

уравнения. Изследва се еднослоен пиезоелектричен харвестер на фирмата MIDE, модел PPA-1001, като пиезокерамичният материал е PZT5H.

За създаване на математическия модел се задават началните условия [1, 7, 16]:

- Посоката на поляризация сочи надолу (отрицателна у-посока) в горната си част, и сочи нагоре в долната си част;
- Съотношението на дължината l на пиезопластината към дебелината ѝ th е $l/th > 100$
- Когато се приложи напрежение, гредата се отклонява в посока y , защото горната ѝ част се удължава, а долната се скъсява. В посока z е обратно - горната част се скъсява, а долната се удължава.
- Левият край на гредата е закрепен, а десният край е свободен и без инерционен товар.

Стъпките, чрез които се създава са:

1) *Задаване геометрията на модела.* За целта се въвеждат данните за дължина и дебелина на гредата и се задава начинът за визуализация на самата греда (фиг. 2.5).

2) *Описание на свойствата на материала.* Това става чрез въвеждане на модула на Юнг (Y), на коефициента на Поасон (ν), на коефициентите на пиезоелектрична деформация (d_{31} и d_{33}), на диелектричната проницаемост на материала при постоянно напрежение, и на диелектричната проницаемостта във вакуум, модула на твърдост (G). Той представлява съотношението на модуля на Юнг, спрямо коефициента на реакция на материала (коефициент на Поасон).

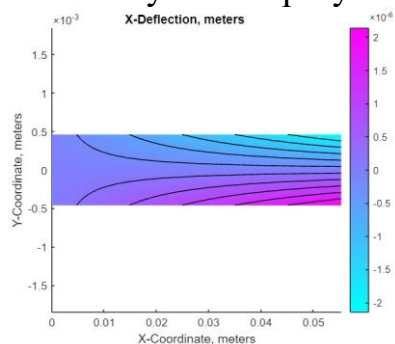
$$G = \frac{Y}{\nu} \quad /2.9/$$

3). *Задаване на входно напрежение.*

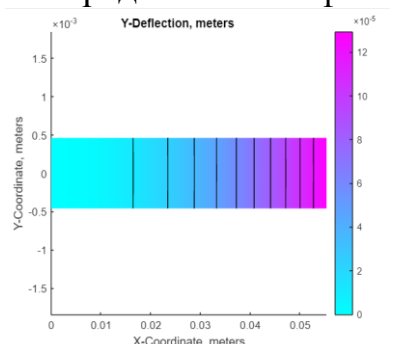
За горната част на гредата (команда *voltTop*) ръб E3 (фиг. 2.5) се задава напрежение 100 V, а долната част ръб E1 (фиг. 2.5) е заземена и там напрежението е нула (команда *voltBot*).

Отчита се фактът, че лявата част на гредата е закрепена.

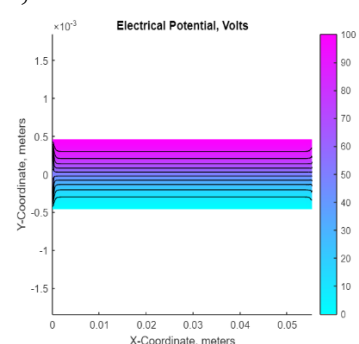
Получените резултати са представени на фиг. 2.6, 2.7 и 2.8.



Фиг. 2.6 Деформация по оста x



Фиг. 2.7 Деформация по оста y



Фиг. 2.8 Електрически потенциал на гредата

На фиг. 2.6 е показана деформацията на пиезоелектричната греда при напрежение 100V. Както и при фиг. 2.4 се вижда, че в закрепения край на пиезо

гредата не настъпва деформация, когато върху нея действат външни сили. На фиг. 2.7 е представена деформацията на пиезогредата в напречен вид (по оста y). Вижда се, че с приближаване до свободния край на вибрационната греда нейното отклонение нараства. На фиг. 2.8 е представен електрическият потенциал на активния слой (в розов цвят) и на неактивния слой (в син цвят) на пиезоелемента на ПЕХ.

2.2.3. *Математическо моделиране на униморфен пиезохарвестер по метода на крайните елементи*

Пиезокерамиката PZT5H е напречно изотропен материал.

Основните уравнения на пиезоелектричната среда описват връзката между механичните и електрическите величини, като обикновено се приемат матричните обозначения. Те могат да бъдат изразени по два основни начина:

- чрез уравнения, даващи връзката между тензорите на механичните напрежения T_{xyz} и вектора на електрическото изместване D_{xyz} (/2.12/, /2.13/);
- чрез матричното представяне на тези уравнения (/2.14/).

Първият начин е описание чрез компонентите на тензора на напрежение T и векторните компоненти на електрическото поле D и има вида /2.12/ и /2.13/:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]^T\{E\} \quad /2.12/$$

$$\{D\} = [e]\{S\} + [\epsilon^S]\{E\} \quad /2.13/$$

където T е тензор на механичното напрежение със 6 компоненти, D е вектор на електрическата индукция с 3 компоненти, S е вектор на механичната деформация с 6 компоненти, E е вектор на електрическият интензитет с 3 компоненти, c^E е матрица на механичните свойства с размер 6×6 , ϵ^S е матрица на електрическите свойства с размер 3×3 , и e е матрица на пиезоелектричните свойства с размер 3×6 , а S^E е коефициент на еластичност [3].

Вторият начин е матрично описание от вида /2.14/:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{32} \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & 0 & -e_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{22}^S & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad /2.14/$$

За материали, чиито свойства се различават по трите ортогонални оси, каквато е керамиката PZT, матрицата на еластичност може да се запише по следния начин:

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_{11}^E} & -\nu_{13} & -\nu_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{S_{21}^E}{S_{11}^E} & \frac{1}{S_{22}^E} & \frac{S_{23}^E}{S_{11}^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12} & -\nu_{31} & \frac{1}{S_{33}^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2 * S_{44}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2 * S_{55}^E} \end{pmatrix} \quad /2.19/$$

Режим 33 се използва за унимофни пиезоелектрични харвестери. В случая напрежението и механичното натоварване се генерират по оста z [160].

Модулът на Юнг на пиезочерамиката Y_p и на неактивния слой Y_s на ПЕХ може да бъде изчислен по следния начин:

$$Y_p = \frac{1}{S_{11}^E} = 60.24 \text{ GPa} \quad /2.20/ \quad Y_s = \frac{1}{S_{33}^E} = 47.62 \text{ GPa} \quad /2.21/$$

След като са известни стойностите на S_{11}^E , E_{33}^T , S_{33}^E , d_{31} и k_p , могат да се намерят коефициентите на еластичност S_{12}^E .

$$S_{12}^E = -S_{11}^E + \frac{2d_{31}^2}{k_p^2 E_{33}^T} = -5.7737 * 10^{-12} \frac{m^2}{N} \quad /2.22/$$

Това позволява да се намери ν_p (коефициент на Поасон на пиезоелектричния слой).

$$\nu_p = -E_p S_{12}^E = -0.3478 \quad /2.23/$$

$$G_p = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)} = 40.18 \text{ GPa} \quad /2.24/$$

Във формула /2.24/ G_p е модулът на сряз на пиезочерамиката.

$$S_{55}^E = \frac{1}{C_{55}^D(1 - k_{15}^2)} = 29 * 10^{-12} \frac{m^2}{N} \quad /2.25/$$

$$G_{zp} = \frac{1}{S_{55}^E} = 34.46 \text{ GPa} \quad /2.26/$$

$$\nu_{pz} = \frac{E_p}{E_z} \nu_{zp} = 0.49 \quad /2.27/$$

$$T_1^P = Y_p(S_1^P - d_{31}E_3) = 9.25 * 10^{11} \quad /2.28/$$

Коефициентът на твърдост (с) е обратно пропорционален на коефициента на еластичност. Следователно: $c_e = s_e^{-1}$.

Таблица 2.8. Данни за константите на еластичност взети от каталог [15]

$S_{11}^E = 6,2 * 10^{10} \text{ N/m}^2$	$S_{55}^E = 1.7 * 10^{10} \text{ N/m}^2$
$S_{22}^E = Y_{11}^E = 6,2 * 10^{10} \text{ N/m}^2$	$\nu_{13}/S_{11}^E = \nu_{31}/S_{11}^E = -6.4583 * 10^{-12}$
$S_{33}^E = 4,9 * 10^{10} \text{ N/m}^2$	$\nu = 0.31$ - коефициент на Поасон

От Таблица 2.8 може да се изчислят елементите на матрицата на еластичност.

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \quad /2.36/$$

Тук с 3 е означена оста z, с 2 - оста y, а с 1 – оста x.

Тъй като в каталожните данни на пиезоелектричния харвестер липсват данни за коефициентите на твърдост, те ще бъдат изчислени с помощта на еластичните коефициенти (модул на Юнг), които са дадени в каталога [161].

След като се заместят съответните коефициенти се получава /2.37/:

$$S^E = \begin{pmatrix} 1.613 & -0.646 & -0.516 & 0 & 0 & 0 \\ -0.646 & 2.041 & -0.646 & 0 & 0 & 0 \\ -0.516 & -0.646 & 1.613 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.9411 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.423 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.9411 \end{pmatrix} 10^{-11} N/m^2 \quad /2.37/$$

Обратната матрица на матрицата „s“ се определя и се записва като матрицата на твърдостта „c“.

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad /2.38/$$

Получените коефициенти за матрицата на твърдост са представени в таблица 2.9:

Таблица 2.9. Коефициенти за матрицата на твърдост

$c_{11}=c_{31}$	$0,954 \cdot 10^{11} N/m^2$	c_{22}	$0,757 \cdot 10^{11} N/m^2$
$c_{12}=c_{21}=c_{23}=c_{32}$	$0,446 \cdot 10^{11} N/m^2$	$c_{44}=c_{66}$	$0,34 \cdot 10^{11} N/m^2$
$c_{13}=c_{31}$	$0,448 \cdot 10^{11} N/m^2$	c_{55}	$0,229 \cdot 10^{11} N/m^2$

Матрицата ‘d’ е съставена от коефициентите на преместване, които са взети от каталог [15] за режим на работа 33 и са представени в таблица 2.10:

Таблица 2.10 Данни за коефициентите на преместване [161]

Пиезоелектричен коефициент	d_{31}	$-320 \cdot 10^{-12} m/V$
	d_{33}	$650 \cdot 10^{-12} m/V$
	d_{15}	$1000 \cdot 10^{-12} m/V$
	$d_{31}=d_{32}; d_{15}=d_{24}$	

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad /2.40/$$

Матрицата на електрическия потенциал (e) се получава, като се умножи матрицата на пиезоелектричните коефициенти с матрицата на твърдостта.

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 22.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 34 & 0 & 0 \\ -15.87 & -9.51 & 33.4 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad /2.42/$$

$$C_p = \frac{E_{33}^S b l}{h_p} = 2,7 \mu F \text{ за еднослойен пиезоелектричен харвестер} \quad /2.43/$$

$$R_p = Q_p \frac{h_p}{b l} = 1 T\Omega \quad /2.44/$$

C_p е капацитетът, а R_p е съпротивлението на пиезокерамиката.

2.3. Моделиране на биморфен пиезоелектричен харвестер (ПЕХ)

2.3.1. Определяне на пълната деформация на биморфна гредата на ПЕХ

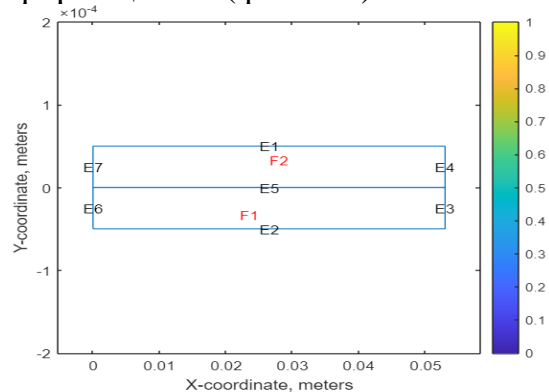
Моделът на биморфен харвестер, създаден чрез частни диференциални уравнения.

Следвана е същата методология, както при мономорфен ПЕХ.

- 1) Въвеждане на геометрични размери на гредата от каталог [161]:
- 2) Задаване на натоварването върху гредата F в
- 3) Определяне на инерционния момент I гредата по формула /2.7/
- 4) Изчертаване на графиката на деформацията (фиг. 2.9).



Фиг. 2.9 Деформация на двуслойна гредата PPA- 2014



Фиг. 2.10. Положение на гредата спрямо неутралната ос

На фиг. 2.9 се вижда какво е отклонението по цялата дължина на вибрационната гредата, когато върху нея е приложена външна сила.

2.3.2. Създаване на математически модел на биморфен пиезохарвестер чрез използване на частни диференциални уравнения в среда на Matlab

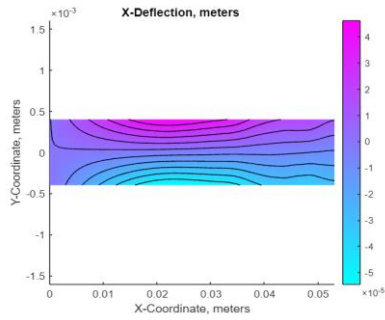
Математическият модел на биморфен пиезоелектричен харвестер на фирма MIDE, тип PPA-2014, е създаден на базата на пиезокерамичен материала тип PZT5H.

Последователността при създаване на модела на биморфен ПЕХ е същата, както при проектирането на еднослойна гредата на ПЕХ.

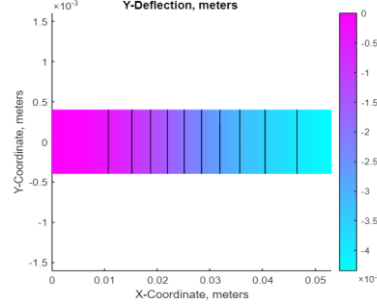
- 1) Задаване геометрията на модела.
- 2) Описание на свойствата на материала
- 3) Задаване на входно

4) Деформацията по оста у

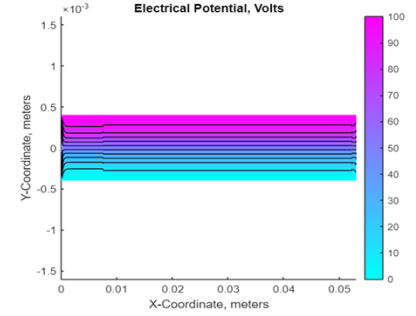
Получените резултати са представени на фиг. 2.11, 2.12 и 2.13.



Фиг. 2.11 Деформация по оста x



Фиг. 2.12 Деформация на по оста у



Фиг. 2.13 Електрически потенциал на гредата

На фиг. 2.11 е показана деформацията на пиезоелектричната гредка при напрежение 100V. Както и при фиг. 2.10 се вижда, че в закрепения край на пиезо гредата не настъпва деформация, когато върху нея действат външни сили. На фиг. 2.12 е деформацията на пиезогредата в напречен вид (по оста у). Вижда се, че с приближаване до свободния край на вибрационната гредка нейното отклонение нараства. На фиг. 2.13 е представен електрическият потенциал на активния слой.

2.3.3. Математическо моделиране на биморфен пиезохарвестер

Биморфните пиезоелектрични харвестери работят в режим на пиезоелемента в направление 31. Напрежението се генерира по оста z, а механичното натоварване е по оста x.

$$S_b^E = \begin{pmatrix} 1 & -v_{12} & -v_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{11}^E & S_{11}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ -v_{21} & 1 & -v_{33} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21}^E & S_{11}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ -v_{31} & -v_{32} & -v_{33} & 0 & 0 & 0 \\ S_{33}^E & S_{33}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2 * S_{44}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2 * S_{55}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_6} \end{pmatrix} 10^{-11} \frac{N}{m^2} \quad /2.45/$$

С S_b^E се отбелязва матрицата на еластичност, долният индекс b, показва, че става дума за биморфна гредка.

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{S_{11}^E} = 1,613 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.49/$$

$$S_{13} = S_{31} = \frac{-v_{13}}{S_{33}^E} = \frac{-v_{31}}{Y_{33}^E} = -0,646 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.50/$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{-v_{12}}{S_{11}^E} = -0,516 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.51/$$

$$S_{33} = S_{23} = \frac{1}{S_{33}^E} = 2,041 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.52/$$

$$S_{44} = S_{55} = \frac{1}{2S_{44}^E} = \frac{1}{2S_{55}^E} = 2,9411 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.53/$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_6} = 0,423 * 10^{-11} N/m^2 \quad /2.54/$$

Числото 3 съответства на ос z , числото 2 – на ос y , а числото 1 – на ос x .

След като се заместят съответните коефициенти в матрица /2.45/, се получава:

$$S_b^E = \begin{pmatrix} 1,613 & -0,516 & -0,646 & 0 & 0 & 0 \\ -0,516 & 1,613 & 2,041 & 0 & 0 & 0 \\ -0,646 & 2,041 & 0,184 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,9411 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,9411 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,423 \end{pmatrix} 10^{-11} \frac{N}{m^2} \quad /2.55/$$

Следователно, коефициентите за твърдост могат да се представят по следния начин (таблица 2.14).

Таблица 2.14. Коефициенти за матрицата на твърдост

c_{11}	$0,691 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$	$c_{23}=c_{32}$	$0,528 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$c_{12}=c_{21}$	$0,218 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$	c_{33}	$-0,417 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$c_{13}=c_{31}$	$0,0199 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$	$c_{44}=c_{55}$	$0,34 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
C_{22}	$0,0215 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$	c_{66}	$2,36 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

Матрицата ' d ' е съставена от коефициентите на преместване, които са взети от каталог [161] и са представени в таблица 2.15.

Таблица 2.15. Основни параметри на пиезокерамика PZT5H

Пиезоелектричен коефициент	d_{31}	$-320 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$	Диелектрична константа- K_3^T	3800
	d_{33}	$650 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$	Диелектрична проницаемост- K_3^S	1200
	d_{15}	$1000 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$	Механичен фактор на качество- Q_m	32
	$d_{31}=d_{32}; d_{15}=d_{24}$			

В случая $d_{31}=d_{32}$ и $d_{15}=d_{24}$, тъй като PZT керамиката е изотропна в ху равнината

За да се изчислят (e), ще се използва съотношението $[e] = [d] \cdot [c]$ [196]. В резултат се получава матричния запис на стойностите на пиезоелектричните коефициенти по напрежение /2.58/.

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 34 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 34 & 0 & 0 \\ -16,22 & 26,6 & -44 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{C}{m^2} \quad /2.58/$$

Таблица 2.16 Обобщение на резултатите

$e_{15}=e_{24}=34 \text{ C/m}^2$	$e_{31}=-16,22 \text{ C/m}^2$
$e_{32}=26,6 \text{ C/m}^2$	$e_{33}=-44 \text{ C/m}^2$

$$C_p = \frac{E_{33}^S b l}{h_p} = 2 \mu F \text{ за двуслоен пиезоелектричен харвестер} \quad /2.59/$$

$$R_p = Q_p \frac{h_p}{b l} = 1 T\Omega \quad /2.60/$$

2.4 Математическо моделиране на компресионен пиезоелектричен харвестер

Има много фактори, които оказват влияние върху изходната мощност на харвестера, което води до липса на универсален начин за тяхното математическо моделиране.

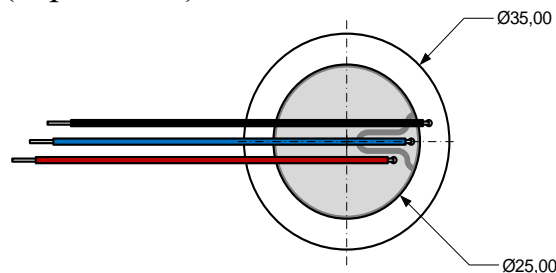
При този вид харвестери се предполага, че външното усилие въздейства за кратки, в повечето случаи повтаряеми интервали, като се предполага, че продължителността на получените деформации е съизмерима с времената на външното въздействие. Следователно, протичащите в пиезоелектричната структура процеси имат изключително динамичен характер, които в първо приближение могат да бъдат описани със синусоидални или косинусоидални функции.

Факторите, които оказват влияние върху генерираната енергия на компресионен ПЕХ:

- Честота на движението
- Сила на приложеният натиск
- Геометричен размер на ПЕХ
- Активни и пасивни точки на предложената конфигурация
- Начин на свързване- серийно, паралелно или комбинирано
- Вид подложка, която се използва за защита на харвестера от счупване (твърда, мека)
- Дълбочина на която е разположен харвестера

Един от вариантите на конструкция на компресионен пиезоелектричен харвестер е използването на стандартен пиезоелектричен резонатор [162] .

На фиг. 2.14. е представен стандартен пиезоелектричен резонатор, с резонансна честота 2,9 kHz (± 500 Hz), дебелина 300 μm и диаметър 25 mm [160, 162] . Избран е поради неговата достъпност и относително ниска цена. Резонаторът има метална основа с диаметър 35 mm, която се разглежда като обикновен електрод (черен цвят) [162].



Фиг. 2.14. Изглед отгоре на компресионен харвестер

Поради факта, че няма стандартен подход при определяне на средното количество на получаваната енергия от компресионният ПЕХ, се предлага методиката [1] за отчитане на енергията [4, 5, 6].

Методиката включва следните стъпки:

- *Определяне силата, която се прилага на един пиезоелемент.*

$$F = m \cdot aN, \quad /2.61/$$

където m е маса, а a е ускорението . Масата е изведена от средното тегло на всички участници в експеримента.

- *Определяне на заряда Q , генериран в един пиезоелемент.*

$$Q = d_{33} \cdot F[C], \quad /2.62/$$

където d_{33} е пиезоелектрична константа [C/N] а F – силата на натиск [N].

- *Намиране на напрежението, генерирано в един пиезоелемент.*

$$U = \frac{Q}{C'} [V] \quad /2.63/$$

където: C' – капацитет на един пиезоелемент, F.

- *Намиране на енергията, генерирана от един пиезоелемент.*

$$W = \frac{C' \cdot U^2}{2} = [J] \quad /2.64/$$

- *Преобразуване на получената енергия в електрическа мощност P :*

$$P = \frac{W}{t} [W] \quad /2.65/$$

където: t – времето на въздействие върху пиезоелементите в s.

Средното въздействие върху пиезоелектричните елементи (времето, прието при експерименталните изследвания) е 5 s.

- *Определяне на електрическата мощност, генерирана от преминаването на един човек през пиезоподложката P' .*

Уравнение /2.66/ съдържа константа 2, показваща, че се генерира електрическа мощност, както в резултат на натиск (поставяне на стъпалото) върху пиезоелемента, така и в резултат на отпускане (отместване на стъпалото) на пиезоелемента:

$$P' = 2 \cdot P \cdot n [W] \quad /2.66/$$

където n – броят на настъпните от преминаващият човек пиезоелектрични преобразуватели

- *Намиране на електрическата мощност, генерирана в една сграда за един ден P_D :*

$$P_D = P' \cdot h \cdot t \cdot r [W] \quad /2.67/$$

където: r – броят подложки, разположени в съответната сграда, h – броят хора, преминаващи през подложките за един ден, t – броят преминавания.

2.5. Изводи.

2.5.1. Предложен е математически модел, който да помогне за оценка на количеството енергия, което е възможно да се извлече от предложените енергогенериращи устройства от вибрационен и компресионен вид.

2.5.2. Вибрационните пиезоелектрически харвестери имат класическа гредова конструкция с един или два закрепени края и те са предмет на по-широки изследвания, както теоретично така и експериментално.

2.5.3. За разлика от вибрационните пиезоелектрични харвестери, компресионните такива нямат обща конструкционна концепция. Това означава голямо разнообразие на конструктивни решения, чиито математически модели могат да се различават кардинално един от друг.

2.5.4. От направения математически анализ на пиезопътеката в динамичен режим, се вижда че масата на субекта и времето през което е оказан натиск върху пиезоелемента са право пропорционални на изходната мощност.

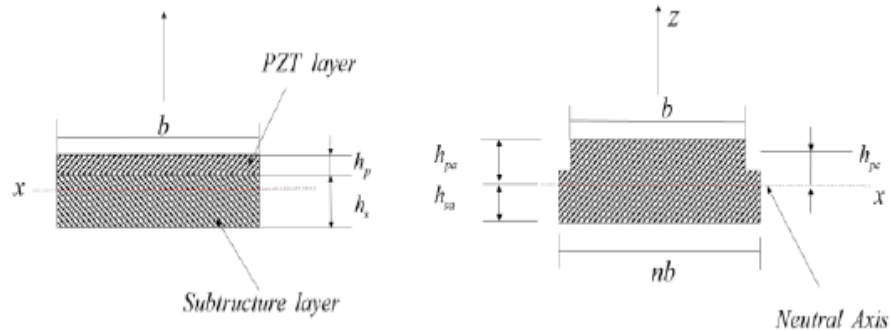
2.5.5. Всички математически модели са направени за идеални условия, при които механичното усилие е непрекъснато във времето и тези математически модели ТЕОРЕТИЧНО могат да дадат максималната изходна мощност за дадена конструкция.

ГЛАВА ТРЕТА - ПРИЛОЖНИ МОДЕЛИ И СИМУЛАЦИЯ НА ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ ЕНЕРГИЙНИ ВИБРАЦИОННИ И КОМПРЕСИОННИ ХАРВЕСТЕРИ

3.1 Моделиране на вибрационен пиезоелектричен харвестер

3.1.1. Моделиране на мономорфен (еднослоен) пиезоелектричен харвестер

Статичното изместване на пиезоелектричната конзола се извежда с помощта на общата теория на лъча на Брес-Кирхоф-Тимошенко, която се основава на предположенията за праволинейност и неразтегливост. Теорията взема под внимание деформацията на срязване и ефектите на ротационно огъване, което я прави подходяща за описанието на пиезоелектрични греди. Всички изводи се основават на баланса на силата и момента на гредата [142].



а) структура на еднослоен ПЕХ

б) сечение на еднослоен ПЕХ

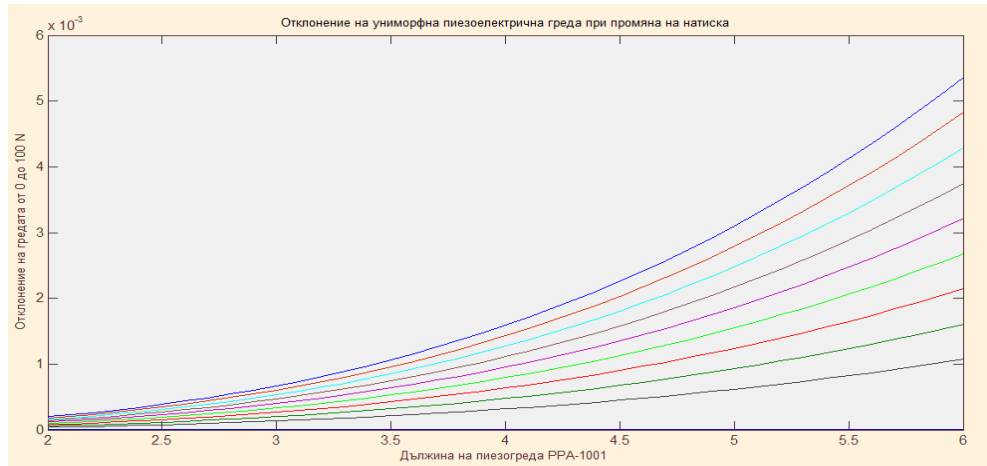
Фиг. 3.2 Структура и сечение на еднослоен ПЕХ

3.1.2. Свързано механично уравнение с разпределени параметри на еднослоен ЕН

Трябва да се въведат началните параметри по отношение на неутралната ос, като се използват уравнения /3.1/, където h_{pa} е разстоянието от началото на PZT слоя до неутралната ос, h_{sa} е разстоянието от края на подложката до неутралната ос и h_{pc} е разстоянието от средата на пиезоелектричния слой до неутралната ос [115].

$$h_{pa} = \frac{h_p^2 + 2nh_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)}, \quad h_{sa} = \frac{h_p^2 + 2h_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)}, \quad h_{pc} = \frac{nh_s(h_p + h_s)}{2(h_p + nh_s)}, \quad /3.1/$$

Обикновено се приема, че гредовата система се възбужда поради движение в мястото на закрепване [125]:



Фиг. 3.3 Отклонение на пиезоелектрична гредка спрямо промяна на механичното натоварване

След това главното уравнение за движението може да бъде изразено [125, 136] като:

$$\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x,t)}{\partial t}, \quad /3.3/$$

където $w_{rel}(x, t)$ е напречното отклонение на гредата спрямо основата ѝ, $M(x, t)$ е вътрешния огъващ момент, $c_s I$ е еквивалентното демпфиращо произведение за съставното сечение, дължащо се на структурната вискозоеластичност, c_a е коефициента за флуидно-вискозното затихване и m е маса за единица дължина на гредата.

Произведението за огъваща якост b_{force} на съставното сечение при условие, че хомогенно електрическо поле е приложено на пиезоелектричния слой, е:

$$b_{force} = b \frac{Y_s(h_b^3 - h_a^3) + Y_p(h_c^3 - h_b^3)}{3}. \quad /3.5/$$

Геометричните параметри h_a , h_b и h_c описват позиции, отстоящи от неутралната ос (фиг. 3.9,б).

Масата за единица дължина m може да бъде получена от:

$$m = b(\rho_s h_s + \rho_p h_p), \quad /3.8/$$

където ρ_s and ρ_p са съответно специфичните плътности на подструктурата и пиезоелектричния материал.

$$\phi_r(x) = \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right], \quad /3.13/$$

където $\phi_r(x)$ и $\eta_r(t)$ съответно са масово собствена функция и модально координатната функция за закрепена в единия край гредка [19, 38]:

където λ_r е безразмерният честотен параметър за даден хармоник и се получава от следното характеристично уравнение:

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda = 0, \quad /3.14/$$

като модалната константа σ_r е изразена като:

$$\sigma_r = \frac{\sinh\lambda_r - \sin\lambda_r}{\cosh\lambda_r - \cos\lambda_r}, \quad 3.15/$$

Трябва да се отбележи, че дадените по-горе отношения /3.13/, /3.14/ и /3.15/ са валидни за закрепена в единия край греда без допълнителна маса, прикрепена към свободния край [59, 82].

3.1.3. Уравнение на електрическа част на пиезокерамичен слой при динамични усилия

За да се получи уравнението за електрическата част и взаимовръзката ѝ с механичната, трябва да се разгледат основните уравнения на пиезоелектричната среда [36, 76] за съответната конструкция на пиезоелектрическия ЕН:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3, \quad /3.25/$$

където D_3 е електрическата индукция, T_1 е аксилното усилие в пиезоелектрическия слой, E_3 е компонента на електрическото поле и ε_{33}^T е компонента на диелектрическата проницаемост при постоянно усилие. Аксиалното усилие T_1 може да се изрази като произведение на огъващата деформация S_1 и модулът на Юнг на пиезоелектрика ($Y_p = \frac{1}{s_{11}^E}$, където s_{11}^E е еластичното съответствие при постоянно електрическо поле), използвайки следната фундаментална зависимост [76]:

$$T_1^p = Y_p(S_1^p - d_{31}E_3). \quad /3.26/$$

След представяне на електрическото поле в пиезоелектричния слой като напреженов пад върху него ($E_3(t) = v(t)/h_p$) и замествайки изразите /3.26/ в отношението /3.25/, се получава следното уравнение:

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_p S_1(x, t) - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p}. \quad /3.28/$$

Средната огъваща деформация за позиция x и време t в пиезоелектричния слой може да бъде изразена като функция на разстоянието h_{pc} от центъра на слоя до оста на неутралност и кривината на гредата за позиция x и време t с уравнение /3.29/ [36]:

$$S_1(x, t) = -h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial^2 x}. \quad /3.29/$$

Тогава израз /3.28/ се изменя както следва:

$$D_3(x, t) = -d_{31}Y_p h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial^2 x} - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p}. \quad /3.30/$$

Както е известно, генерираният в пиезоелектричната среда електрически ток може да се изрази като $i(t) = dq(t)/dt$, където $q(t)$ е зарядът, натрупващ се в пиезоелектричния слой. Зарядът може да се получи чрез интегриране на електрическата индукция по площта на електродите [36, 76]:

$$q(t) = \int_0^A D \cdot n dA = - \int_{x=0}^L \left(d_{31}Y_p h_{pc} b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial^2 x} + \varepsilon_{33}^S b \frac{v(t)}{h_p} \right) dx, \quad /3.31/$$

където D е векторът на електрическата индукция, n е външната нормала и A е площта на електродите.

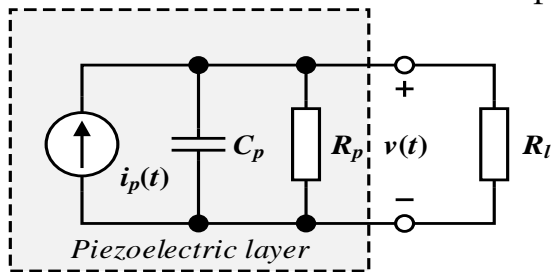
Тъй като ненулевите произведения на тези вектори са тези в посока 3 (т.е., по посока на у-оста), генерираният в пиезоелектричния слой ток може да бъде изразен като:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = - \int_{x=0}^L d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x,t)}{\partial^2 x \partial t} dx - \frac{\epsilon_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt}. \quad /3.32/$$

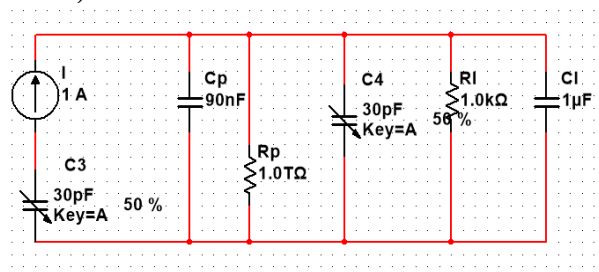
От израз /3.32/ е очевидно, че генерираният ток е двукомпонентна функция, като първата компонента се дължи на вибрационното движение на гредата (интегралната част), а втората отразява появата на напреженов пад в пиезоелектричния слой.

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_l}. \quad /3.33/$$

На тази основа може да се създаде опростена еквивалентна схема, показана на фиг. 3.9 а). [36]. Съгласно математическият модел на вибрационен пиезоелектричен харвестер MIDE PPA-1001 разработен в *Глава 2* е изведена еквивалентната схема показана на фиг.3.9 б)



а) опростена еквивалентна схема на еднослоен ПЕХ



б) разработена еквивалентна схема на PPA-1001

Фиг. 3.4. Еквивалентна електрическа схема на еднослоен пиезоелектричен ЕН

Източника на ток и последователно свързаният към него променлив кондензатор, отразяват външното механично усилие (C_3). Променливият кондензатор C_3 е избран за да отрази наличието на променливо външно механично усилие. При условие че такова няма, входът на еквивалентната схема ще е оставен отворен и на изхода й няма да се генерира енергия - R_l (върху R_l няма да има напреженов пад). C_p (монтажен кондензатор) и R_p (собствено съпротивление) са параметрите на пиезо елемента. C_4 отразява влиянията на външните кондензатори върху работата на електрическата част на схемата, C_1 е сложено за натрупване на енергия. По този начин на схемата е осигурен по- високоомен изход и са компенсирани вътрешните утечки на пиезо средата (фиг. 3.4 б)).

Собственият кондензатор и параметрите за токовия източник могат да бъдат получени чрез [44]:

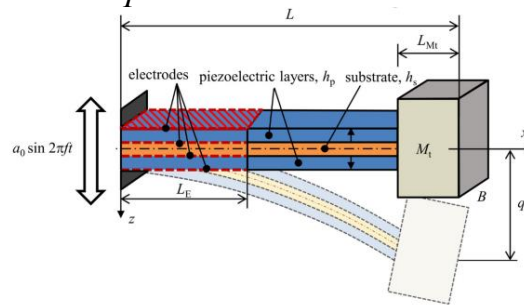
$$C_p = \frac{\epsilon_{33}^S b L}{h_p}, R_p = \rho_p \frac{h_p}{b L} \quad /3.39/$$

$$i_p(t) = \sum_{r=1}^{\infty} k_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}. \quad /3.40/$$

Параметърът ρ_p е специфичното съпротивление на пиезоелектричния слой.

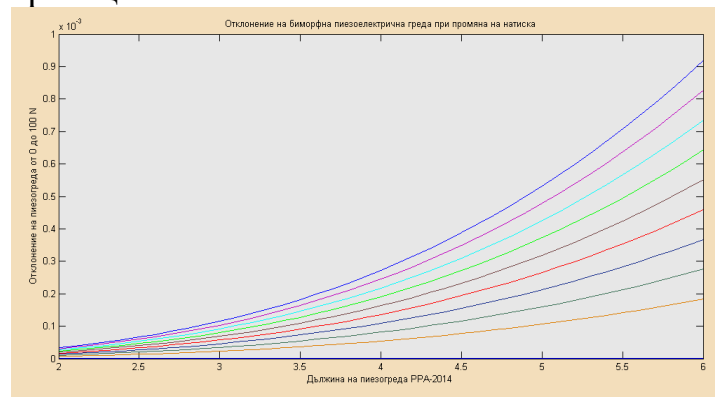
3.2. Моделиране на биморфен пиезоелектричен харвестер

3.2.1 Механично моделиране



Фиг. 3.5. Геометричен размер на биморфна пиезоелектрична греда в режим 31 [138]

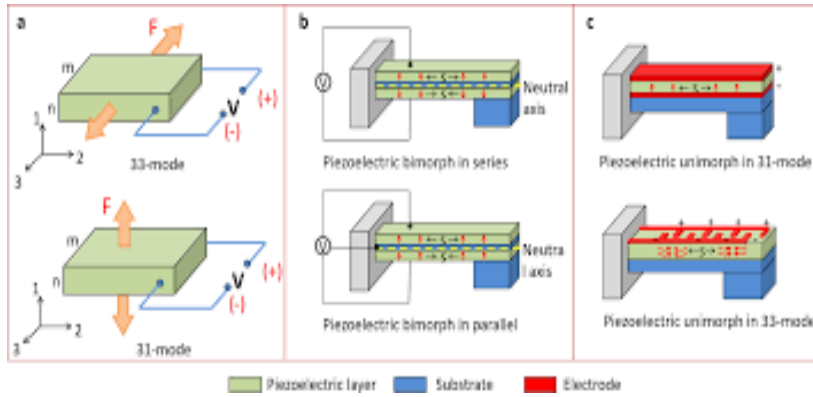
При моделирането на биморфен пиезоелектричен харвестер се разглеждат аналитични решения за симетрични биморфни пиезоелектрични харвестери с последователно и паралелно свързване на пиезокерамичните слоеве. Предполага се, че основното възбуждане, действащо върху биморфния конзолен пиезоелектричен елемент, е трансляция в напречна посока с насложена малка ротация.



Фиг. 3.6. Отклонение на биморфна пиезоелектрична греда спрямо промяна на механичното натоварване

Приема се, че деформациите са малки и че композитната структура има линейно-еластично поведение на материала (фиг. 3.6). Механичните загуби се представят чрез вътрешни и външни механизми на затихване. Предполага се, че вътрешният механизъм на демпфиране е под формата на демпфиране по деформация (по Келвин-Войгт), а ефектът на външното демпфиране се разглежда с отделен коефициент на демпфиране.

Непрекъснатите двойки електроди, които покриват горната и долната повърхност на пиезокерамичните слоеве, са идеално проводими, което спомага през тях да може да се дефинира единична електрическа потенциална разлика [22, 30, 39, 96, 107]. Поради това се приема, че входният сигнал за базовото движение е постоянен, така че от електромеханичната система могат да се извлекат непрекъснати електрически изходи.



Фиг. 3.7. а) Пиезоелектрична греда в режим 31 и 33; б) Биморфна пиезоелектрична греда с последователна и паралелна връзка в режим 31; в) Униморфна греда в режим 31 и 33 [50]

От гледна точка на механиката, биморфните конфигурации, показани на фиг. 3.7 б), са идентични. Това означава, че те имат едни и същи геометрични и материални свойства. Въпреки това ефектът на обратната пиезоелектрична връзка в уравнението на гредата е различен за последователната и паралелната връзка на пиезокерамичните слоеве и това оказва влияние на пиезоелектричната греда.

3.2.2. Основни уравнения на механичната част

Движението на основата на всяка конзола, показана на фиг. 3.7, е представено като транслация $g(t)$ в напречна посока с насложена малка ротация $h(t)$. Следователно ефективното базово преместване $w(x,t)$ в напречна посока може да се запише като [36]:

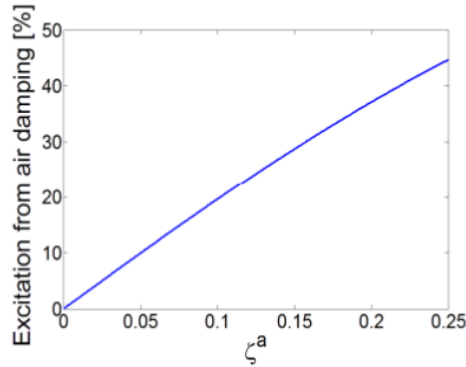
$$w_b(x,t) = g(t) + xh(t) \quad /3.41/$$

Частното диференциално уравнение, описващо принудителните вибрации на пиезоелектричната греда с маса, прикрепена на върха и с възбуждане от основата, може да се запише като:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2} \\ = -[m + M_t \delta(x-L)] \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad /3.42/$$

където $w_{rel}(x,t)$ е напречното преместване на гредата по неутралната ос спрямо нейната основа при позиция x за време t , c_a е коефициент на затихване, c_s е коефициент на затихване на деформациите, m е масата на единица дължина на гредата, M_t е масата поставена на единия свободен край на пиезоелектричната греда, $\delta(x)$ е функция на Дирак [36].

Предполага се, че биморфните конзоли от фиг. 3.7 са пропорционално демпферирани и с нормален режим на работа. Следователно, собствените функции могат да се използват за модален анализ. Вместо да се определят коефициентите на затихване в уравнението на движението, може да се разгледа съответното уравнение без затихване (задава се $c_s I = c_a = 0$ от уравнение (3.42)) и се въвежда модалното затихване в уравнението на движението в модални координати, както е практиката в структурната динамика [23].



Фиг. 3.8 Разпределение на възбудането от външно затихване, към общия член на възбудането, като функция на коефициента на външно затихване (за възбудане при $\omega = \omega_n$) [36].

Вътрешният огъващ момент е първият момент на осовата деформация в напречно сечение [36].

$$M(x, t) = b \left(\int_{-h_p - \frac{h_s}{2}}^{-\frac{h_s}{2}} T_1^{\tilde{P}} z dz + \int_{-\frac{h_s}{2}}^{\frac{h_s}{2}} T_1^{\tilde{S}} z dz + \int_{\frac{h_s}{2}}^{h_p + \frac{h_s}{2}} T_1^{\tilde{P}} z dz \right) \quad /3.43/$$

b е ширината, h_p е дебелината на всеки един пиезоелектричен слой. $T_1^{\tilde{P}}$ и $T_1^{\tilde{S}}$ са компонентите на аксиалното напрежение в пиезокерамичния слой и в слоя на подложката (посока $1=x$, надлъжна посока), която се определя от следните зависимости [36]:

$$T_1^{\tilde{S}} = Y_s S_1^{\tilde{S}}, \quad T_1^{\tilde{P}} = \bar{c}_{11}^E S_1^{\tilde{P}} - \bar{e}_{31} E_3 \quad /3.44/$$

където Y_s е модул на Юнг на подструктурния слой, \bar{c}_{11}^E е модул на еластичността на пиезокерамичния слой при постоянно електрическо поле, \bar{e}_{31} е ефективната константа на пиезоелектрическото напрежение, а E_3 е компонента на електрическото поле в посока 3 (поляризация по z). Долен и горен индекс p и s означават пиезокерамичния и подструктурния слой. [36].

Компонентите на аксиалната деформация в пиезоелектричния слой, както и в слоя на субструктурата се определят като $S_1^{\tilde{P}}$ и $S_1^{\tilde{S}}$, и се дължат само на огъване [53].

Компонента на електрическото поле E_3 , трябва да се изрази и за двата пиезоелектрични слоя на биморфната конфигурация (фиг. 3.8). Приема се, че двата пиезоелектрични слоя са еднакви и напрежението върху всеки слой е $u_s(t)/2$ при последователно свързване (фиг. 3.7 б, която е разположена в горната част). Когато биморфният пиезоелектричен харвестер работи в режим 31 и е свързан последователно, \bar{e}_{31} е с противоположен знак в двата слоя поради противоположната поляризация, но моментните електрически полета са в една и съща посока $E_{3(t)} = \frac{-u(t)}{h_{p1} + h_{p2}}$. При паралелното свързване (фиг. 3.7 б, която е разположена в долната част) напрежението върху електродите на всеки един слой е съответно $u_p(t)$. При него в режим 31 на биморфния харвестер \bar{e}_{31} е с

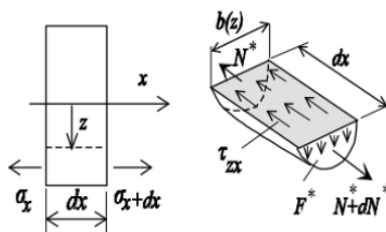
един и същи знак в двата пиезоелектрични слоя, но моментните електрически полета са в противоположна посока: $E_{3(t)} = \frac{-u(t)}{h_p}$, за горния слой и $E_{3(t)} = \frac{u(t)}{h_p}$ за долния слой.

Това е една от основните причини механичните уравнения за последователното и паралелното свързване да се различават едно от друго. За вътрешния огъващ момент при последователно (M^{ser}) и паралелно (M^{par}) свързване може да се изведат следните уравнения [43].

$$M^{ser}(x, t) = b_{force} \frac{\partial^2 w_{rel}^{ser}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta_{ser} u_{ser}(t) \int_{-\infty}^x \delta(t) dt \quad /3.45/$$

$$M^{par}(x, t) = b_{force} \frac{\partial^2 w_{rel}^{par}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta_{par} u_{par}(t) \int_{-\infty}^x \delta(t) dt \quad /3.46/$$

При моделирането на пиезоелектричният харвестер във вид на тънка еластична греда е важно да се отбележи, че няма чисто огъване на напречното сечение на гредата. Това показва, че хипотезата на Бернули за равнинност на напречните сечения не е валидна. Когато върху единия край на гредата действат сили, които я деформира, то гредата ще се опита да запази правилната си форма. Това води до изкривявания в напречните сечения на гредата, които са най-близо до силите, причиняващи деформация. Вследствие наличие на срязваща сила в напречното сечение на гредата се появяват тангенциални напрежения [2].



Фиг. 3.10. Определяне тангенциалните напрежения на пиезоелектричната греда [2]

Ако се приеме, че диференциалният елемент на гредата е с дължина Δx , както е показано на фиг. 3.10, на основание на зависимостта на Журавски следва, че огъващият момент- M_y ще бъде линейна или друга функция от височина степен, т.е. от двете страни на елемента моментът ще бъде различен, следователно и нормалните напрежения ще бъдат различни. Поради нееднаквостта на нормалните напрежения няма да бъдат еднакви и нормалните сили, действащи върху отсечената част от елемента - ако от едната страна силата е N^* , то от другата е $N^* + dN^*$. За да бъде в равновесие, следва че върху надлъжното сечение на елемента действат тангенциални напрежения- τ_{zx} . Приема се, че това напрежение е равномерно разпределено по широчината $b(z)$ на елемента [2].

$$\sum x = 0 \rightarrow N^* + dN^* - N^* + \tau_{zx} b(z) dx = 0 \rightarrow \tau_{zx} = \frac{dN^*}{b(z) dx} \quad /3.49/$$

Интегралната връзка между нормалното напрежение и нормалната сила е:

$$\begin{aligned}
 N^* &= \int_{F^*}^{th} \sigma_x dF = \int_{F^*}^{th} \frac{M_y}{J_y} z dF = \frac{M_y}{J_y} \int_{F^*}^{th} z dF = \frac{M_y S_y^*}{J_y} \rightarrow \frac{dN^*}{dx} \\
 &= \frac{d}{dx} \left(\frac{M_y S_y^*}{J_y} \right) = \frac{S_y^*}{J_y} \frac{dM_y}{dx} = \frac{S_y^*}{J_y} Q_z
 \end{aligned}
 \tag{3.50/}$$

Тук S_y^* е статичният момент на отрязаната част от напречното сечение с площ F^* спрямо оста Y на напречното сечение на гредата. Като заместим в горното уравнение получаваме [2]:

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \frac{Q_z S_y^*}{J_y b(z)}
 \tag{3.51/}$$

Последното уравнение е известно като формула на Журавски, която гласи, че напрежението ще действа освен на успоредните на неутралната ос равнини, но и в перпендикулярната на тях равнина- напречното сечение на гредата.

Използвайки теоремата на Кастиляно, можем да изчислим пълната потенциалната енергия на гредата [3]:

$$\begin{aligned}
 U &= \int_l^l \frac{M_y^2}{2EJ_y} ds + k_z \int_l^l \frac{Q_z^2}{2GF} ds = \frac{1}{2EJ_y} \int_0^l (-P_s)^2 ds + \\
 &\quad \frac{k_z}{2GF} \int_0^l P^2 ds = \frac{P^2 L^3}{6EJ_y} + k_z \frac{P^2 l}{2GF}
 \end{aligned}
 \tag{3.52/}$$

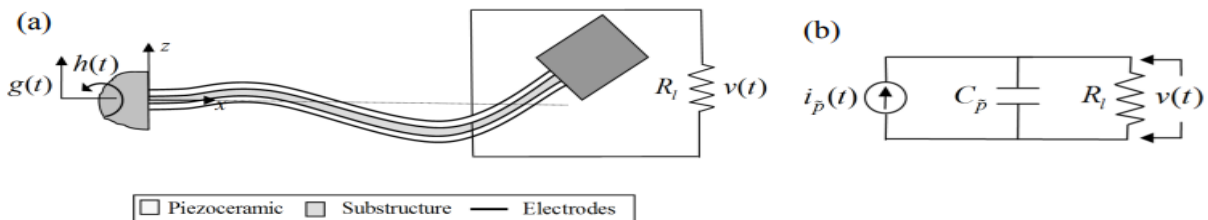
3.2.3. Свързващи уравнения за електрическата и механичната части на харвестера

Основните пиезоелектрични уравнения описват връзката между механичните и електрическите величини в пиезоелектричната среда [195].

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]^T\{E\}
 \tag{3.53/}$$

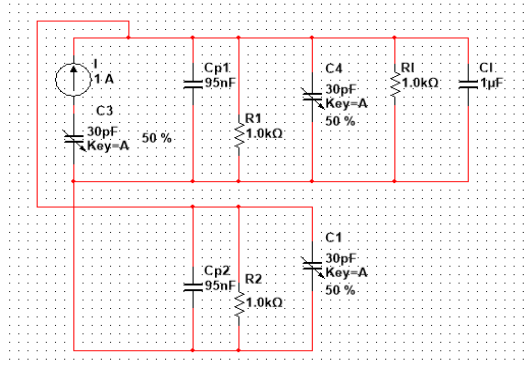
$$\{D\} = [e]\{S\} + [\epsilon^S]\{E\}
 \tag{3.54/}$$

където T е вектор на тензора на напрежение, D е вектор на електрическото изместване, S е вектор на напрежението, E е вектор на електрическият интензитет, c^E е матрица на механичните свойства, ϵ^S е матрица на електрическите свойства, и e е матрица на пиезоелектричните свойства, а c^E е коефициента на еластичност.



а) свързване на пиезоелектричния слой

б) еквивалентна електрическа верига



в) разработена еквивалентна схема на PPA-2014

Фиг. 3.11. Биморфна структура, свързана към резистивен товар [36]

Източника на ток и последователно свързаният към него променлив кондензатор, отразяват външното механично усилие (C_3). Променливият кондензатор C_3 е избран за да отрази наличието на променливо външно механично усилие. При условие че такова няма, входът на еквивалентната схема ще е оставен отворен и на изхода ѝ няма да се генерира енергия $-R_1$ (върху R_1 няма да има напреженов пад). C_{p1} и C_{p2} са монтажни кондензатори, а R_{p1} и R_{p2} са собствени съпротивления, които са свързани паралелно. Те представляват параметрите на биморфният пиезо елемент. C_4 отразява влиянията на външните кондензатори върху работата на електрическата част на схемата, C_1 е сложено за натрупване на енергия. По този начин на схемата е осигурен по- високоомен изход и са компенсирани вътрешните утечки на пиезо средата (фиг. 3.11 в)).

Тензорните уравнения (3.53, 3.54 и 3.55), могат да бъдат изразени в матрична форма [86], което е по-подходящо, когато се използва методът на крайните елементи:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{32} \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & 0 & -e_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{22}^S & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad /3.56/$$

тук D_i е вектора на електрическото изместване, E_i е вектора на електрическото поле, S_i е вектора на деформация, а T_i е вектора на напрежението.

Вторият алтернативен начин, по който могат да се запишат основните уравнения на пиезоелектричната среда на харвестера е:

$$\{S\} = [S^E]\{T\} - [d]^T\{E\} \quad /3.58/$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad /3.59/$$

Използвайки теорията за лъчът на Райли при моделиране на тънка еластична пиезоелектрична греда, единственият ненулев компонент на напрежението е този в аксиална посока - T_1 .

$$T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0 \quad /3.60/$$

Като се вземе под внимание, че електродите покриват площта, перпендикулярна на оста z и формула 3.60, матричното уравнение 3.56 може да се опрости до:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad /3.61/$$

Така за напрежението T_1 и за електрическото изместване D_3 на пиезоелектричната греда може да се запише:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{31} & \bar{\varepsilon}_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad /3.63/$$

Тъй като се приема, че осовата деформация е единственият източник на механична деформация, тензорното представяне на съответната пиезоелектрична зависимост може да се сведе до скалярно уравнение [110].

$$D_3 = \bar{e}_{31} S_1^{\bar{P}} + \bar{\varepsilon}_{33}^S E_3 \quad /3.64/$$

E_3 е електрическото поле в посока на поляризация (посока z).

Тук \bar{e}_{31} е пиезоелектричната константа на усилие, която се изразява чрез пиезоелектричната константа на деформация- $\bar{e}_{31} = d_{31}/s_{11}^E$; $\bar{\varepsilon}_{33}^S$ е диелектричната проницаемост при постоянно деформация, изразява се чрез $\bar{\varepsilon}_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - d_{31}^2/s_{11}^E$; $S_1^{\bar{P}}$ е компонент на аксиалната деформация в пиезоелектричния слой. Върху него указва влияние само огъването [41].

Средната деформация на неутралната ос (x) в пиезоелектричния слой се представя като функция на времето t и разстоянието от неутралната ос до центъра на пиезоелектричния слой h_{pc} , където $h_{pc} = \frac{h_s+h_p}{2}$.

$$S_1^{\bar{P}}(x, t) = -h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \quad /3.66/$$

Тъй като входът на веригата през електродите е $\frac{1}{RL}$, изходният електрически ток на веригата може да се получи от закона на Гаус [110].

$$\frac{d}{dt} \left(\int_0^A D_3 \cdot ndA \right) = \frac{v(t)}{R_l} \quad /3.67/$$

където A е площта на електродите, а D_3 е ненулевият вектор на електрическото изместване в посока z . При заместване на израза /3.64/ в израз /3.67/ се получава уравнението с разпределени параметри за електрическата верига [37].

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{33}^S bL}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{Lb}{\rho_p h_p} v(t) + \frac{v(t)}{R_l} = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \int_{x=0}^L \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx \quad /3.68/$$

За напречната вибрационна реакция се получава [88, 89]:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{33}^S bL}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{Lb}{\rho_p h_p} v(t) + \frac{v(t)}{R_l} = \sum_{r=1}^{\infty} k_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} \quad /3.69/$$

където k_r е коефициент на пряка взаимовръзка на правия пиезоелектричен ефект [46].

$$k_r = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \int_0^L \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} dx = -\bar{e}_{31} h_{pc} b \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad /3.70/$$

Израз /3.67/ показва, че без значение дали се възбужда сложна схема или проста (както е в случая), възбуждането е пропорционално на интеграла, показващ динамичното деформационно разпределение в областта на електрода [46, 88, 89]. Прилагането на закона на Кирхоф към показаната на фиг. 3.16 б верига води до израза [36]:

$$C_p \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_p} = i_p(t) \quad /3.71/$$

C_p е собственият капацитет на пиезоелектричният слой, а R_p е собственото му съпротивление.

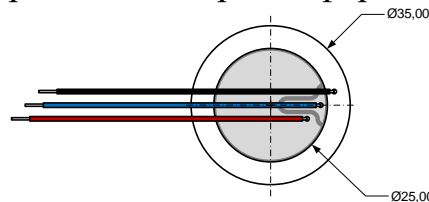
Изрази /3.67/, /3.68/ и /3.71/ имат важна роля при моделирането на пиезоелектрични харвестери с гредова конструкция. От тях може да се направи предположението, че при зададен брой пиезоелектрични слоеве, всеки един от тях ще има еднакви капацитет, съпротивление и източник на ток [36].

3.3. Моделиране на компресионен пиезоелектричен харвестер

От съществено значение при компресионните харвестери е устройството да се проектира така, че да има възможно най- широка резонансна лента, тъй като колкото по-широк е спектърът на чувствителност около резонансната стойност, толкова повече вибрационни честоти се улавят при преобразуването на механичната деформация в електрическа енергия [158].

3.3.1. Механично моделиране на компресионен пиезоелектричен харвестер

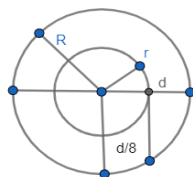
На фиг. 3.12 е представен основният елемент на компресионен пиезоелектричен харвестер, който е с кръгла форма.



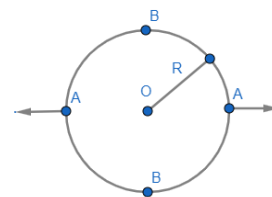
Фиг. 3.12. Изглед отгоре на пиезоелектрическия елемент [162]

За правилното моделиране на ПЕХ с кръгла форма е важно да се намери центърът на координатната система до неутралната линия. За кръгло сечение, разстоянието от центърът на тежестта до тангентата към сечението ще бъде $d/2$ [2] фиг. 3.13.

$$\frac{d}{2} = \frac{\frac{4}{\pi d^2}}{\sqrt{\left(\frac{64y_k}{\pi d^4}\right)^2}} \Rightarrow y_k = \frac{d}{8} \quad /3.72/$$



Фиг. 3.13. Ядро на сечението на компресионен ПЕХ



Фиг. 3.14. Сили на огъване в т. А и т. В на компресионен ПЕХ

Компресионният харвестер е симетричен и със симетричен товар. Във вертикалната равнина на симетрия ще действат само огъващ момент и нормална сила (x_1) и (x_2). От това следва, че усилията в горната и долната част са едни и същи. Силата x_2 се намира от уравнението за статика /3.73/. [2]

$$\sum x = 0 \Rightarrow 2x_2 - P = 0 \Rightarrow x_2 = \frac{P}{2} \quad /3.73/$$

За огъващите моменти в точки А и В са в сила следните уравнения

$$M = -\frac{P}{2}R(1 - \cos\varphi) \quad /3.74/$$

$$MA = -\frac{PR}{2} + x_1 \quad /3.75/$$

$$MB = x_1 \quad /3.76/$$

Тук М е общият огъващ момент, МА е огъващият момент в т. А, а МВ съответно в т. В. [3]

Коефициентите във уравнения /3.74/, /3.75/ и /3.76/ се определят съгласно интегралите на Максвел- Мор.

$$\delta_{11} = \int \frac{1}{YI_y} R d\varphi = \frac{R\pi}{YI_y} \quad /3.77/$$

$$\delta_{12} = -2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{PR(1 - \cos\varphi)}{2YI_y} R d\varphi = -\frac{PR^2}{YI_y} \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \quad /3.78/$$

$$\delta_{11} x_1 = -\delta_{1p} \quad /3.79/$$

$$x_1 = \frac{\delta_{1p}}{\delta_{11}} = PR \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi}\right) \quad /3.80/$$

Където Y е модулът на еластичност, I е инерционен момент, R е радиус на диска, а δ е линейното изместване, където инерционният момент [3] се намира по формула:

$$I_x = I_y = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4} \quad /3.81/$$

3.4.1. Деформация на симетричен кръгъл ПЕХ

При извода на уравнения на компресионен ПЕХ се използват следните зависимости: [58]

- Диска има постоянна дебелина- th
- Максималното преместване не превишава th/2, а $R \geq 5^{\text{th}}$
- Натоварването е ососиметрично

От фиг. 3.21 може да се изведе уравнението за деформация по радиуса ε_r на компресионен ПЕХ.

$$\varepsilon_r = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{(dr + z(\theta + d\theta) - z\theta) - dr}{dr} = z \frac{d\theta}{dr} \quad /3.82/$$

θ е ъгъл за завъртане на нормалата към средната повърхнина на пластината. Дължината на окръжността, минаваща през т. А ще претърпи промяна, което ще доведе до деформация и в направление на окръжността - ε_t . [3]

$$\varepsilon_t = \frac{LA' - LA}{LA} = \frac{2\pi(r + z\theta) - 2\pi r}{2\pi r} = z \frac{\theta}{r} \quad 3.83/$$

Деформацията по радиуса и по направление на окръжността ще породят нормални напрежения σ_r и σ_t , които според обобщения закон на Хук за равнинно напрегнато състояние ще бъдат:

$$\sigma_r = \frac{Y}{1-\mu^2}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_t) = \frac{Y_z}{1-\mu^2}\left(\frac{d\theta}{dr} + \mu\frac{\theta}{r}\right) \quad /3.84/$$

$$\sigma_t = \frac{Y}{1-\mu^2}(\varepsilon_t + \mu\varepsilon_r) = \frac{Y_z}{1-\mu^2}\left(\mu\frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r}\right) \quad /3.85/$$

От формули /3.84/ и /3.85/ може да се направи извода че напреженията се разпределят линейно по дебелината на пластината.

Неравномерното разпределение на напреженията по равнината ще породят огъващи моменти, които ще считаме че действат на единица дължина. Тези моменти ще са:

$$M_r r d\varphi = \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_r r d\varphi dz) z \quad M_t dr = \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_t dr dz) z \quad /3.86/$$

Където след заместване се получава:

$$M_r = D \left(\frac{d\theta}{dr} + \mu \frac{\theta}{r} \right) \quad M_t = D \left(\mu \frac{d\theta}{dr} + \frac{\theta}{r} \right) \quad /3.87/$$

Тук D е коравината на пластината и се намира по формула $D = \frac{Ih^3}{12(1-\mu^2)}$. Като се използват огъващите моменти M_r и M_t от формула /3.87/ за напрежение в конкретно сечение на окръжността при $z = \pm \frac{h}{2}$ ще се получи:

$$\sigma_{r_{max}} = \pm \frac{6M_r}{h^2} \quad \sigma_{t_{max}} = \pm \frac{6M_t}{h^2} \quad /3.88/$$

За формула /3.88/ е важно да се отбележи, че знак + се взема за долният слой на компресионният пиезоелектричен харвестер.

При ударно напрежение, когато външен товар с маса (m), се прилага за кратко време (t), в мястото на натиск възниква пластична деформация, което води до пораждање на вълнови процеси, като част от енергията на външния товар се разсейва. В основата на енергетичната теория стои предположението, че кинетичната енергия K_0 от натиска се превръща в потенциална деформационна енергия U без загуби на притиснатото тяло или $K_0 = U$. [3]

Ударното напрежение бива два вида:

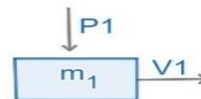
1. Хоризонтален удар- когато маса с големина (m) се движи праволинейно със скорост (V) (фиг. 3.17) и се удря в еластично тяло. Масата на удрящото тяло е значително по- голяма от удареното тяло. Кинетичната енергия ще е $K_0 = m_0 \frac{v^2}{2}$, а потенциалната енергия на деформация на натиска ще е:

$$U = \frac{1}{2} P_{max} f_{din} = \frac{1}{2} P_{max} P_{max} \delta_{11} = \frac{1}{2} P_{max}^2 \delta_{11} \quad /3.89/$$

Където максималната ударна сила $P_{max} = V \sqrt{\frac{m}{\delta_{11}}}$, а максималното динамично преместване $f_{din} = P_{max} \delta_{11} = V \sqrt{m \delta_{11}}$.



Фиг. 3.17. Компресионен харвестер подложен на хоризонтален удар



Фиг. 3.18. Компресионен харвестер подложен на вертикален удар

2. Вертикален удар- маса с големина (m_1) и скорост (V_1), пада върху еластично деформируемо тяло (фиг. 3.18). Уравнението на енергийният баланс ще е: $K_0 + U_{E_{1-2}} = U$, където $U_{E_{1-2}}$ е изменение на потенциалната енергия на удрящото тяло от момента на удара до пълната деформация на удареното тяло и се намира от: $U_{E_{1-2}} = mgf_{din}$. Така за потенциалната енергия на деформация на удареното тяло се получава: [58]

$$U = \frac{1}{2} P_{max} f_{din} = \frac{1}{2} \frac{f_{din}}{\delta_{11}} f_{din} = \frac{1}{2} \frac{f_{din}^2}{\delta_{11}} \quad /3.90/$$

3.3.2. Електрическо моделиране на компресионен ПЕХ

Както беше упоменато в Глава 2, най- ефективният начин за генериране на електрическа енергия е когато върху компресионният харвестер се указва механично натоварване на кратки, повторяеми интервали.

Тук конструктивен проблем се явява ефективното разпределение на активните елементи на избраната площ на пиезоелектричния харвестер, при който с минимален брой елементи да се генерира възможно най- голямо количество електрическа енергия.

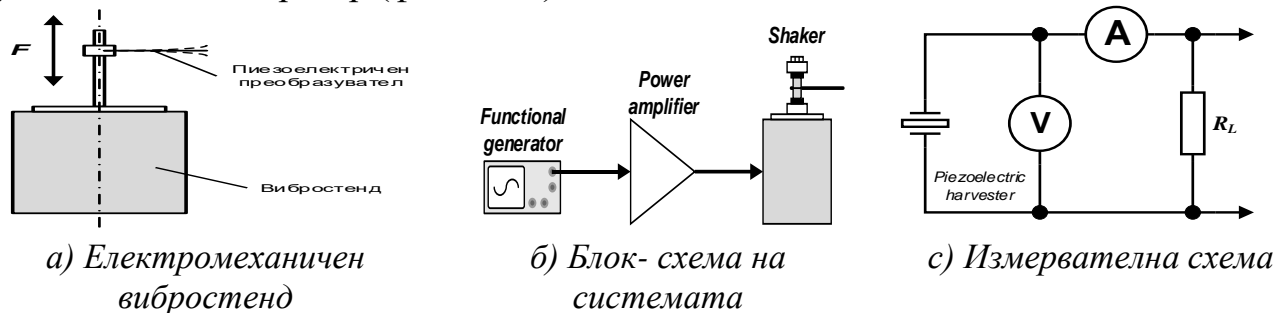
Факторите, които указват влияние и трябва да бъдат взети предвид при конструиране на компресионен пиезоелектричен харвестер са:

- Големина на стъпалото на преминаващите пешеходци
- **“начин” на стъпване**
- **теглото** на преминаващите през харвестера
- **оказваното усилие на единица площ**
- **скорост на преминаване на пешеходците**
- **биологичен пол и възраст на пешеходците**
- **очакван брой преминаващи**
- Отделен фактор, който също влияе върху оказваното усилие е факта, че човешките същества най-често носят обувки, чиито габарити се определят от размера и структурата на стъпалото.

Начинът на свързване на отделните елементи също е от ключово значение, като се предполага че последователното свързване ще доведе до повишаване на амплитудата на получавания сигнал (фиг.3.20 б), а паралелното ще доведе до увеличаване на получената токова плътност от харвестера (фиг.3.20 а). След предварително направени опити за различните начини на свързване е установено, че при последователно свързване на множество елементи, те дават сигнал тогава, когато са едновременно компресирани всички свързани в една линия елементи, а когато дори един от тях не е компресиран дадената верига се оказва отворена. Поради факта, че не е възможно осигуряването на едновременната компресия на всички активни

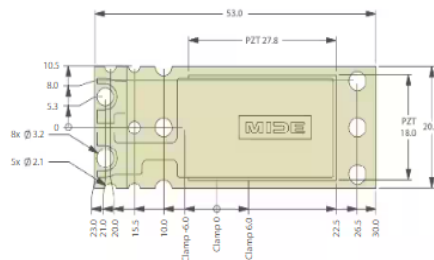
механични вибрации с различни честоти за въздействие върху ЕН.

Експерименталните изследвания се провеждат с наличен в търговската мрежа пиезоелектричен харвестер [171], което гарантира повторямост на параметрите му. Харвестерът е от типа S233-H5FR-1107XB - биморфна структура с последователно свързване на слоевете (предишното му означение е PPA-2014). За предизвикване на външното механично въздействие се използва електромеханичен вибростенд с ускорение $a = 5,21 \text{ m/s}^2$ (фиг. 4.1а), а за подаване на хармоничен сигнал чрез усилвател към него се използва функционален генератор (фиг. 4.2 б).



фиг. 4.1 Експериментална установка

Функционалният генератор се използва за промяна на работната честота, докато изходното му напрежение е постоянно и има стойност от 2V *pick-to-pick*. Измерванията се извършват с цифрови устройства, които дават съответните стойности на променливите във вид на средно квадратична стойност (RMS). Тази форма на представяне на данните е полезна, тъй като за променливите електрически токове и напрежения ефективната стойност е равна на стойността на постоянния ток или напрежение, които произвеждат същата средна разсейвана мощност върху постоянен резистивен товар. Следователно, мощността, която се измерва, трябва да бъде действителната активна мощност, която може да лесно да бъде извлечена и е основната цел на процеса на събиране на енергия.



Фиг. 4.2 Пиезоелектричен преобразувател PPA-2014 [1]

4.2. Експериментални резултати

Изследванията са проведени при $T=33,8^{\circ}\text{C}$, относителна влажност на въздуха- 35%, надморска височина- 392 m.

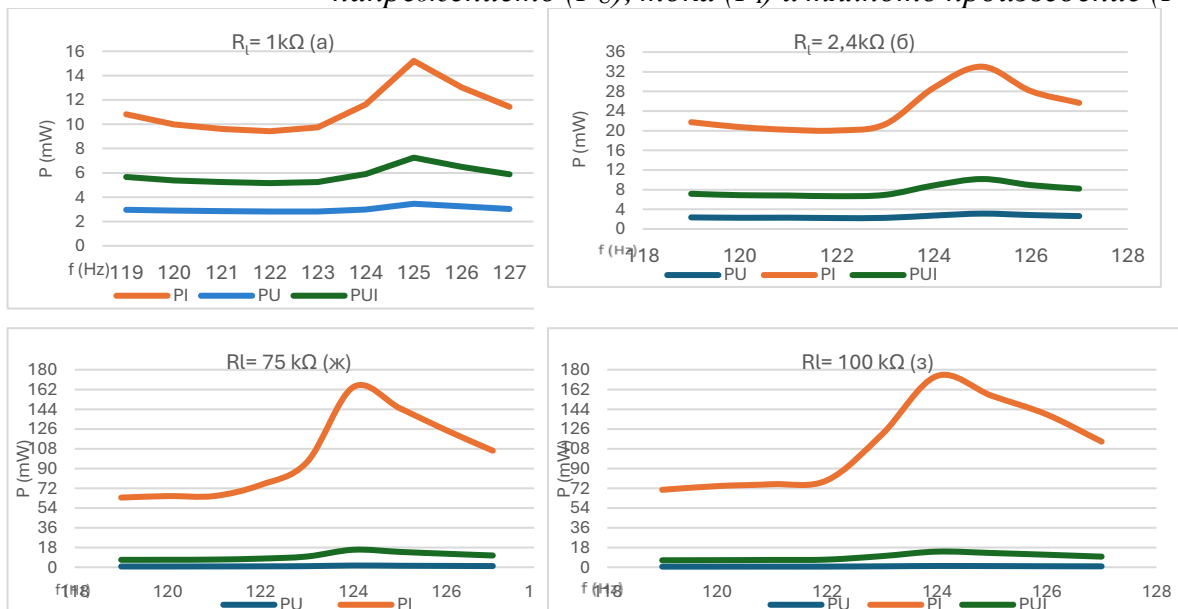
Първата група експерименти се провежда с инерционна маса $m=1.13 \text{ g}$ с различни стойности на резистивния товар (R_L) от 1 до 100 $\text{k}\Omega$ и честотен диапазон от 119 до 127 Hz. Първоначалното напрежение на функционалния генератор е 2 V *pick-to-pick*. Резултатите от напрежението са в очаквания

диапазон, но стойностите на тока се оказаха странни тъй като надхвърляха очакваните стойности (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 Изчислена стойност на мощността спрямо напрежението (P_U), тока (P_I) и тяхното произведение (P_{UI}).

R_i (k Ω)	f, Hz	119	120	121	122	123	124	125	126	127
1	P_U	2,958	2,890	2,856	2,822	2,822	2,993	3,460	3,240	3,028
	P_I	10,824	9,986	9,610	9,425	9,734	11,628	15,210	13,032	11,424
	P_{UI}	5,659	5,372	5,239	5,158	5,242	5,899	7,254	6,498	5,881
2,4	P_U	2,360	2,282	2,301	2,223	2,262	2,731	3,128	2,838	2,625
	P_I	21,744	20,745	20,184	20,045	21,313	28,732	33,034	28,071	25,663
	P_{UI}	7,164	6,880	6,815	6,676	6,943	8,858	10,165	8,926	8,208
5,1	P_U	1,958	1,812	1,836	1,824	1,921	3,013	2,713	2,443	2,240
	P_I	38,850	36,357	36,086	36,357	40,270	68,691	60,001	52,224	46,514
	P_{UI}	8,722	8,117	8,140	8,144	8,795	14,386	12,760	11,296	10,208
7,5	P_U	1,956	1,875	1,976	2,263	3,254	3,034	3,072	2,748	2,442
	P_I	50,311	47,628	52,272	62,641	97,741	87,723	87,723	77,763	68,857
	P_{UI}	9,920	9,450	10,164	11,907	17,833	16,313	16,416	14,619	12,968
10	P_U	1,756	1,747	1,789	1,875	2,352	3,272	2,916	2,601	2,343
	P_I	51,984	52,900	55,225	58,564	77,284	114,244	99,225	87,616	78,400
	P_{UI}	9,553	9,614	9,941	10,479	13,483	19,334	17,010	15,096	13,552
51	P_U	0,928	0,928	0,958	1,042	1,299	1,922	1,711	1,539	1,364
	P_I	72,221	69,814	74,669	82,258	108,712	172,666	150,878	130,560	114,750
	P_{UI}	8,187	8,050	8,458	9,258	11,884	18,216	16,065	14,176	12,510
75	P_U	0,718	0,712	0,754	0,824	1,000	1,549	1,349	1,211	1,082
	P_I	63,480	64,868	64,868	75,000	95,768	164,280	144,908	124,808	106,208
	P_{UI}	6,753	6,798	6,994	7,860	9,786	15,954	13,983	12,294	10,722
100	P_U	0,573	0,566	0,585	0,616	0,848	1,166	1,077	0,933	0,817
	P_I	70,560	73,960	75,690	79,210	121,000	174,240	156,250	139,240	114,490
	P_{UI}	6,359	6,467	6,656	6,987	10,131	14,256	12,975	11,399	9,673

Таблица 4.5 Графично представяне на мощността спрямо напрежението (P_U), тока (P_I) и тяхното произведение (P_{UI}).



Резултатите за електрическата мощност, получени по непреки методи, са с толкова големи отклонения за двете величини (ток и напрежение), че се налага предположението за дефектирала експериментална установка. Тук може да има и друго обяснение: посочените стойности са за реактивна мощност, която е налична в системата и не може да бъде използвана изобщо

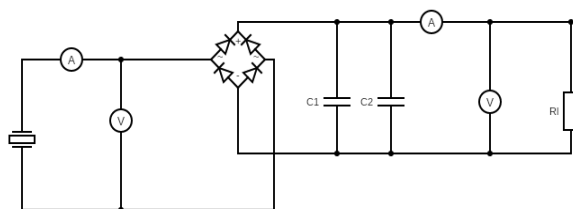
[4]. Следователно за правилната оценка на получената енергия е необходимо изправяне на електрическия сигнал на харвестера, като токоизправителят трябва да елиминира влиянието на реактивната енергия върху измерваните резултати. Затова експерименталната схема е разширена с добавянето на изправителен мост.

4.3 Експериментално изследване на схема с изправителен мост

Мостов изправител и кондензаторни елементи са добавени към експерименталната схема, както е показано на фиг. 4.5. Диодите са избрани от типа 1N4148, тъй като те ще гарантират нисък праг на сработване (ниско напрежение на отпушване) и поради факта, че те са високочестотни, кондензаторните им параметри няма да влияят в такава степен на измерваните резултати. Кондензаторните елементи са избрани със стандартна стойност: $C_1=1\ \mu\text{F}$ и $C_2=1\ \mu\text{F}$, за да могат да поддържат напрежение на ниво, което не се влияе от бързи промени в изправителя. Резонансната честота е в диапазона 119 - 127 Hz, което е съобразено с инерционното натоварване на харвестера. Експерименталната схема е разделена на постояннотокова и променливотокова част. Експерименталните вериги могат да бъдат от типа VA и AV (фиг. 4.5). Поради факта, че се очаква да има разлика в резултатите, получавани от двете измервателни схеми, са проведени експерименти за установяване на разликите и избор на по-подходяща измервателна схема.

4.3.1 Експериментално изследване на AV-AV схема с изправителен мост

За първоначалните измервания с изправителен мост е избрана измервателна конфигурация тип AV- AV (фиг. 4.5).



Фиг.4.5 Експериментална схема AV-AV с токоизправителен мост

4.3.1.1. Експериментално изследване на AV-AV схема с изправителен мост при $C_1=1\ \mu\text{F}$ и $C_2=1\ \mu\text{F}$

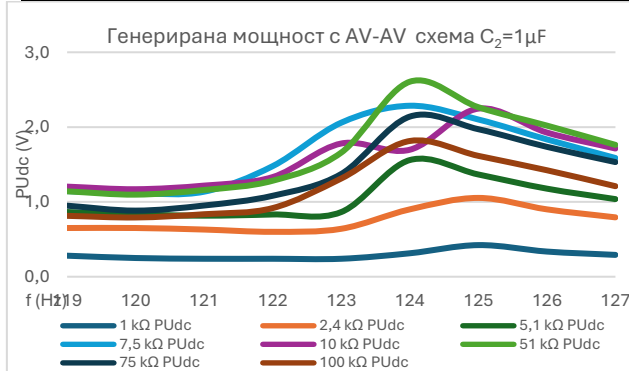
По- долу са дадени в табличен вид данните за получените резултати за мощността изчислени спрямо напрежението, тока и тяхното произведение (Таблица 4.6, 4.7 и 4.8).

Таблица 4.6 Изчислена стойност на мощността спрямо напрежението (P_U) при $C_2=1\ \mu\text{F}$

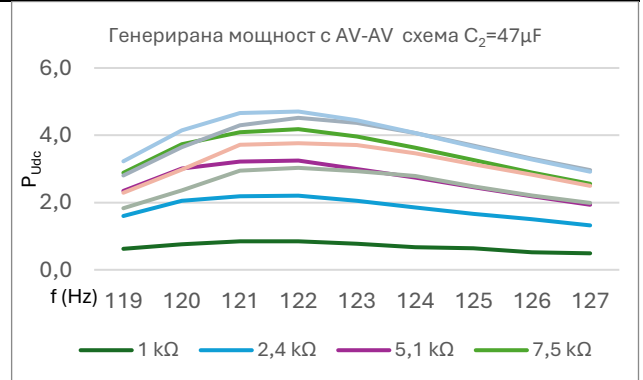
1 μF	f, Hz	119	120	121	122	123	124	125	126	127
1 k Ω	P_{Udc}	0,281	0,250	0,240	0,240	0,240	0,314	0,423	0,336	0,292
2,4 k Ω	P_{Udc}	0,651	0,651	0,630	0,600	0,641	0,900	1,053	0,900	0,794
5,1 k Ω	P_{Udc}	0,865	0,832	0,816	0,832	0,865	1,559	1,367	1,177	1,037
7,5 k Ω	P_{Udc}	1,145	1,114	1,137	1,479	2,059	2,285	2,101	1,835	1,587
10 k Ω	P_{Udc}	1,204	1,170	1,218	1,332	1,781	1,697	2,247	1,927	1,714
51 k Ω	P_{Udc}	1,142	1,097	1,160	1,283	1,660	2,607	2,266	2,020	1,762
75 k Ω	P_{Udc}	0,950	0,883	0,952	1,082	1,374	2,140	1,972	1,736	1,532
100 k Ω	P_{Udc}	0,814	0,792	0,835	0,918	1,313	1,814	1,615	1,423	1,210

Таблица 4.9 Изчислена стойност на мощността спрямо напрежението (P_U) при $C_2=47 \mu F$.

47 μF	f, Hz	119	120	121	122	123	124	125	126	127
1 k Ω	P_{Udc}	0,624	0,757	0,846	0,846	0,774	0,672	0,640	0,518	0,490
2,4 k Ω	P_{Udc}	1,601	2,054	2,185	2,204	2,054	1,855	1,667	1,504	1,320
5,1 k Ω	P_{Udc}	2,347	3,013	3,216	3,248	2,998	2,743	2,457	2,187	1,933
7,5 k Ω	P_{Udc}	2,883	3,731	4,092	4,181	3,960	3,633	3,267	2,895	2,558
10 k Ω	P_{Udc}	3,226	4,147	4,665	4,706	4,449	4,070	3,660	3,283	2,916
51 k Ω	P_{Udc}	2,805	3,643	4,295	4,518	4,365	4,066	3,696	3,309	2,962
75 k Ω	P_{Udc}	2,292	2,976	3,714	3,763	3,710	3,460	3,142	2,830	2,495
100 k Ω	P_{Udc}	1,831	2,359	2,948	3,031	2,934	2,789	2,481	2,214	1,985



Фиг.4.7 Графично представяне на данните от таблица 4.6



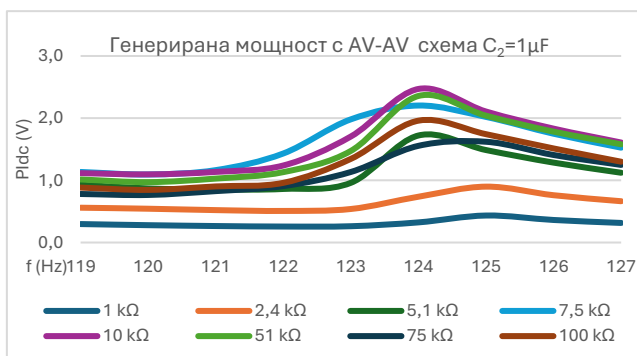
Фиг.4.13 Графично представяне на данните от таблица 4.9

Таблица 4.7 Изчислена стойност на мощността спрямо тока (P_I) при $C_2=1\mu F$.

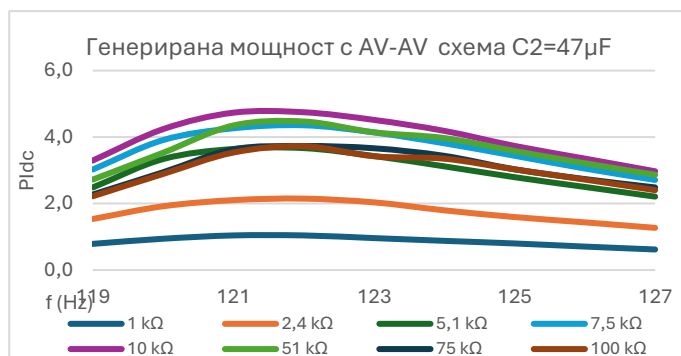
1 μF	f, Hz	119	120	121	122	123	124	125	126	127
1 k Ω	P_{Idc}	0,297	0,279	0,265	0,257	0,262	0,324	0,434	0,362	0,315
2,4 k Ω	P_{Idc}	0,560	0,544	0,521	0,508	0,539	0,737	0,899	0,761	0,664
5,1 k Ω	P_{Idc}	0,930	0,870	0,853	0,861	0,961	1,722	1,487	1,285	1,122
7,5 k Ω	P_{Idc}	1,135	1,094	1,164	1,432	1,981	2,203	2,020	1,750	1,526
10 k Ω	P_{Idc}	1,116	1,096	1,136	1,239	1,706	2,470	2,107	1,832	1,608
51 k Ω	P_{Idc}	1,014	0,971	1,028	1,132	1,474	2,357	2,040	1,783	1,580
75 k Ω	P_{Idc}	0,780	0,765	0,827	0,908	1,135	1,555	1,621	1,408	1,248
100 k Ω	P_{Idc}	0,884	0,846	0,903	0,960	1,346	1,960	1,742	1,513	1,300

Таблица 4.10 Изчислена стойност на мощността спрямо тока (P_I) при $C_2=47 \mu F$

47 μF	f, Hz	119	120	121	122	123	124	125	126	127
1 k Ω	P_{Idc}	0,787	0,941	1,040	1,040	0,960	0,878	0,799	0,706	0,618
2,4 k Ω	P_{Idc}	1,536	1,918	2,103	2,148	2,036	1,796	1,594	1,434	1,268
5,1 k Ω	P_{Idc}	2,485	3,338	3,642	3,667	3,429	3,119	2,793	2,499	2,208
7,5 k Ω	P_{Idc}	3,024	3,910	4,264	4,355	4,140	3,813	3,437	3,053	2,709
10 k Ω	P_{Idc}	3,295	4,238	4,733	4,747	4,516	4,186	3,733	3,352	2,970
51 k Ω	P_{Idc}	2,721	3,528	4,348	4,468	4,142	3,970	3,581	3,213	2,865
75 k Ω	P_{Idc}	2,271	2,940	3,630	3,730	3,663	3,435	3,030	2,736	2,484
100 k Ω	P_{Idc}	2,220	2,890	3,534	3,725	3,423	3,349	3,028	2,723	2,403



Фиг.4.9 Графично представяне на данните от таблица 4.7



Фиг.4.15 Графично представяне на данните от таблица 4.10

От получените резултати при трите метода за непряко получаване на мощността се вижда, че включването на изправителен мост е оправдано, тъй като се получава сравнително добра повторяемост на резултатите за постоянно токовата мощност.

За да се провери влиянието на капацитета върху получаваните резултати върху постоянно-токовата мощност, са направени експериментални изследвания с промяна на капацитета след изправителния мост. При провеждането на експериментите беше установено, че има промяна в резонансната честота, което говори, че включеният след изправителния мост капацитет влияе върху работните параметри на харвестера.

Направените изследвания показват, че включените в изходната верига капацитети оказват влияние върху полученото количество енергия (Табл. 4.15 и сравнение между фиг. 4.13, 4.15, 4.17 и фиг. 4.19, 4.21, 4.23). Това се дължи на промяна в резонансната честота (Табл. 4.15), която е в рамките на няколко Hz, но това е важно при системите за събиране на енергия, които трябва да работят в оптимален режим (когато средните външни механични усилия водят до получаването на максимално количество електрическа енергия). Тук се наблюдава сложна взаимовръзка между стойностите на схемните елементи и получената енергия (Табл. 4.15).

Таблица 4.15 Съпоставка на резонансната честота при промяна на капацитета

Схема на свързване AV-AV									
	1 µF	47 µF	100µF	1 µF	47 µF	100µF	1 µF	47 µF	100µF
	P _{Udc}			P _{Idc}			P _{UIdc}		
	f _{res}			f _{res}			f _{res}		
R (kΩ)	124	122	123	124	122	123	124	122	123
1	0,314	0,824	0,723	0,324	1,04	0,903	0,319	0,938	0,808
2,4	0,9	2,204	2,166	0,737	2,148	2,001	0,814	2,176	2,082
5,1	1,559	3,248	3,377	1,722	3,667	3,599	1,638	3,451	3,486
7,5	2,285	4,181	4,424	2,203	4,355	4,366	2,244	4,267	4,395
10	1,697	4,706	4,665	2,47	4,747	4,638	2,048	4,727	4,651
51	2,607	4,518	2,795	2,357	4,468	2,745	2,479	4,493	2,77
75	2,14	3,763	2,08	1,555	3,73	1,896	1,824	3,746	1,986
100	1,814	3,031	1,713	1,96	3,725	1,96	1,886	3,36	1,833

Първото, което се наблюдава е промяна в резонансната честота, като тази промяна в зависимост от схемата на свързване има сложен характер.

Второто е различното количество енергия получавано при различните схеми на свързване, като общата тенденция е да се получава по-малко енергия при по-малки външни капацитети, свързани паралелно на електрическия товар. Тъй като не е правено пълно изследване за влиянието на външния капацитет, на базата на натрупаните до момента данни не може да се направи извод за оптималният изходен капацитет на измервателните схеми.

Поведението на използваните експериментални схеми също така показва комплексна взаимна връзка, както между елементите на схемите, така и режимите на работа на изследваният вибрационен пиезоелектричен харвестер. Това би трябвало да доведе до усложняване на модела на вибрационните харвестери от този вид.

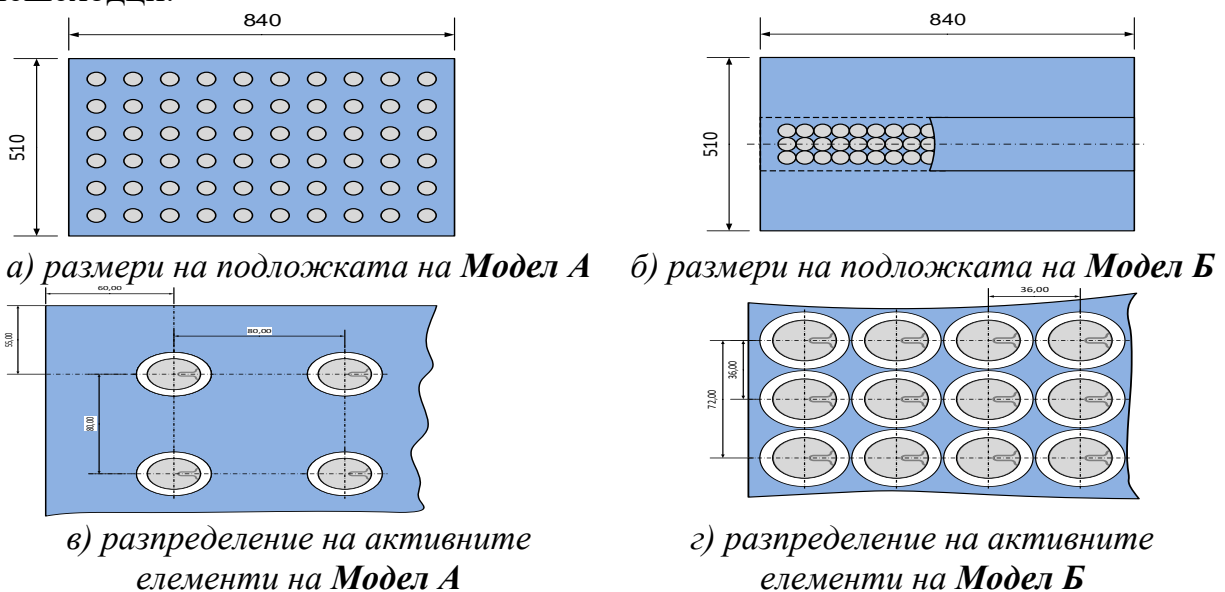
4.4. *Опитна постановка за експериментално изследване на компресионен ПЕХ*

Експерименталните изследвания са направени при $T=21^{\circ}\text{C}$, относителна влажност- 30% и надморска височина 392 m.

Като първични преобразуватели са избрани стандартни пиезоелектрични резонатори с резонансна честота 2,9 kHz (± 500 Hz), дебелина 300 μm и диаметър 25 mm, поради тяхната достъпност и сравнително ниска цена. Пиезоелектричните елементи имат метална основа с диаметър 35 mm, която играе ролята на електрод.

Пиезоелектричните харвестери се монтират върху правоъгълна еластична пътека от диелектричен материал с размери 840 x 540 mm и дебелина 7mm.

Двата предложени проекта са за генериране на електрическа енергия от пиезоелектрическа пътека, която ще се използва за събиране на енергия от пешеходци.

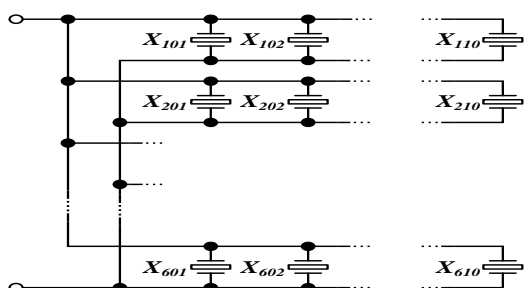


Фиг. 4.81. Разпределение на активните елементи

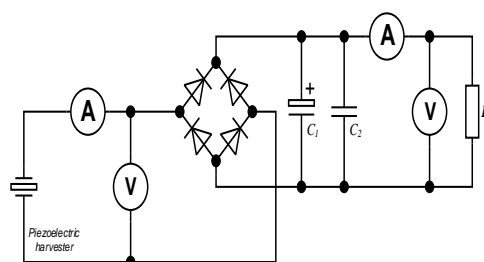
4.5.1. Експериментално изследване с прекъснато въздействие върху пиезоелектричната пътека

В дизайн А (фиг. 4.81, в), е избрано квадратично разпределение на елементите, както е показано в, като всеки елемент е на разстояние 80 mm от съседния елемент. При дизайн В (фиг. 4.81, г), местоположението на клемите трябва да бъде на разстояние 5 mm един от друг, за да може окабеляването да се извърши без притискане на проводниците, за да се запази тяхната цялост.

След като бяха проведени експерименти върху двата варианта за свързване на елементите, се стигна до заключението, че е приложима само паралелна връзка между елементите на масива, която може да гарантира самостоятелната работа на всички елементи от харвестера.

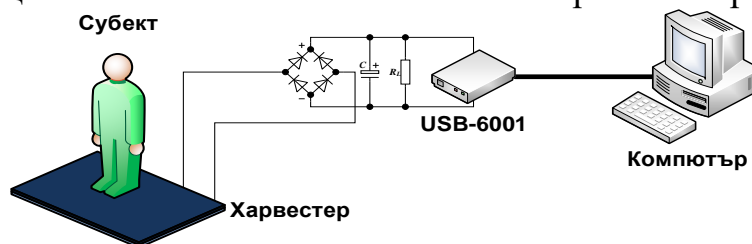


Фиг. 4.82. Електрическо свързване на пиезоелектричните елементи



Фиг. 4.83. Опростена схема за събиране на енергия

За следене на динамичната съставяща се използва DAQ измервателна платка USB-6001 на компания *National Instruments (NI)*. Общият вид на измервателната схема е даден на фиг. 4.3, като се запазва схемата за събиране на енергия и се следи полученото изправено напрежение. В случая, тъй като входното съпротивление на използваните аналогови входове на DAQ платката е по-голяма от $1\text{ T}\Omega$, за съхраняване възможността за изчисляване на получената мощност се запазва стойността на товарното съпротивление.



Фиг. 4.84. Експериментална схема с използване на DAQ платка

4.5.2 Експериментално изследване на компресионен пиезоелектричен харвестер

Измерването се извършва през програмната среда на LabView 2023, като получените данни са в RMS стойности за напрежението, а измервателния период е зададен да бъде 5 s. Предварителните експерименти, се провеждат по следната схема:

- Група от субекти са анкетирани за установяване размерите на носените от тях обувки и са претеглени чрез електронна везна на фирмата *Silver Crest*[®] тип *SWG180A1* за да бъде установена тяхната маса.

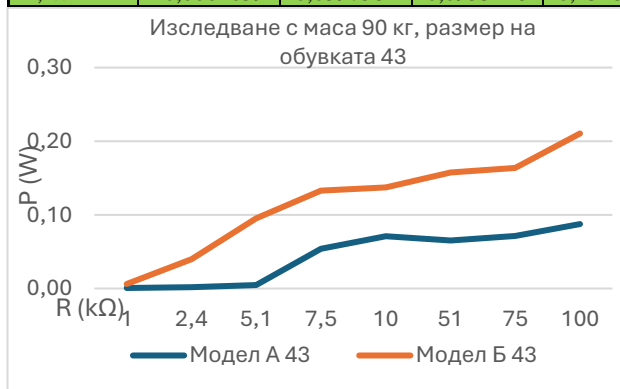
- За провеждане на изследването, субектите преминават по дължината на подложката в рамките на 5 s, като се отчита RMS напреженов сигнал в този времеви интервал (фиг. 4.85).
 - Всеки от участващите субекти е помолен да извърши десет такива преминавания, по пет път от всяка страна.
 - Данните от субектите се систематизират в таблици.
- Дадени са данните за субекта със съответната маса и размер на обувките.

Таблица 4.46. Генерирана мощност от Модел А

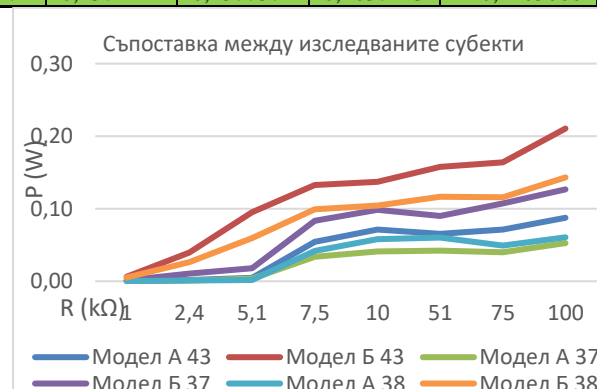
измерване	Модел А							
	Маса- 90 кг./ Размер на обувката- 43							
R, kΩ	1	2,4	5,1	7,5	10	51	75	100
1	0,009	0,035411	0,079924	0,716	0,715	1,756	1,951	2,573
2	0,011	0,04328	0,097684	0,654	0,821	1,701	2,039	2,812
3	0,106	0,041706	0,094132	0,594	0,843	1,53	2,184	2,769
4	0,0119	0,079084	0,105677	0,523	0,814	1,642	2,531	3,058
5	0,0201	0,114495	0,178496	0,617	0,901	1,817	2,714	2,811
6	0,0291	0,104265	0,25842	0,653	0,817	1,924	2,439	3,074
7	0,0265	0,076723	0,235331	0,694	0,749	2,017	2,174	3,172
8	0,0195	0,072395	0,173168	0,599	0,804	2,189	2,209	3,249
9	0,0184	0,070428	0,163399	0,638	1,057	1,864	2,473	2,946
10	0,0179	0,0179	0,158959	0,684	0,912	1,799	2,391	3,117
v, RMS	0,02694	0,0655687	0,154519	0,6372	0,8433	1,8239	2,3105	2,9581
P, W	0,0007258	0,0017914	0,0046816	0,0541365	0,0711155	0,0652277	0,0711788	0,0875036

Таблица 4.47. Генерирана мощност от Модел Б

измерване	Модел Б							
	Маса- 90 кг./ Размер на обувката- 43							
R, kΩ	1	2,4	5,1	7,5	10	51	75	100
1	0,0244241	0,585495	0,644476	0,985	1,173	2,761	3,492	4,695
2	0,051485	0,27243	0,741968	0,892	1,237	2,918	3,278	4,219
3	0,0712786	0,190364	0,828167	1,025	1,204	2,957	3,194	5,091
4	0,0327654	0,399386	0,681056	1,09	1,104	2,801	3,857	5,127
5	0,0655467	0,110025	0,580957	0,993	1,076	2,846	4,215	4,736
6	0,0649433	0,370303	0,65274	1,108	1,281	2,947	3,473	4,679
7	0,117618	0,276929	0,932234	1,031	1,204	2,861	3,284	4,291
8	0,132956	0,354262	0,705948	1,021	1,261	3,024	3,416	4,527
9	0,0998365	0,146905	0,550288	0,843	1,021	2,594	3,578	4,198
10	0,124252	0,382917	0,654218	0,993	1,154	2,654	3,257	4,318
v, RMS	0,0785106	0,3089016	0,6972052	0,9981	1,1715	2,8363	3,5044	4,5881
P, W	0,0061639	0,0397584	0,0953128	0,1328271	0,1372412	0,1577372	0,1637443	0,2105066



Фиг. 4.88. Съпоставка на Модел А и Модел Б на субект с маса 90 кг. и размер на обувката- 43

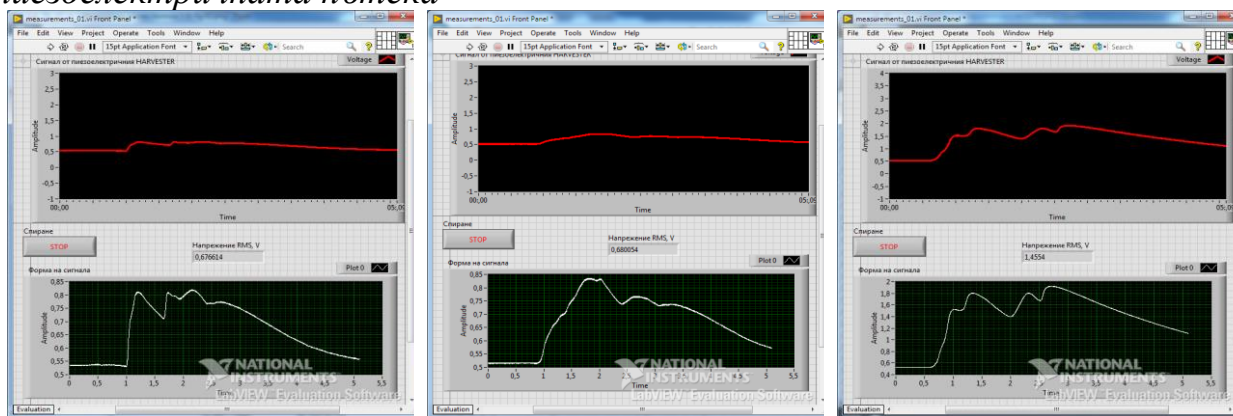


Фиг. 4.91. Генерирана мощност от Модел А и Модел Б при изследваните субекти

Данните дават много ясна представа за това колко е голямо значението за правилното разпределение на активните елементи върху пиезоелектричната

пътека, както и товарното съпротивление в използваната електрическа схема. При Модел А, изходната мощност в диапазона от 1 до 5,1 k Ω е пренебрежимо малка, докато при Модел Б пиезоелектричната пътека генерира енергия дори при малко товарно съпротивление. Това води до заключението, че увеличавайки масата, която ще приложи натиск на ограничена площ от пиезоелектричната пътека, ще доведе до повишаване на ефективността на модела (фиг. 4.91).

4.5.3. Експериментално изследване с непрекъснато въздействие върху пиезоелектричната пътека



а) субект с маса 60 кг,
размер на обувката- 37

а) субект с маса 60 кг,
размер на обувката- 38

а) субект с маса 90 кг,
размер на обувката- 45

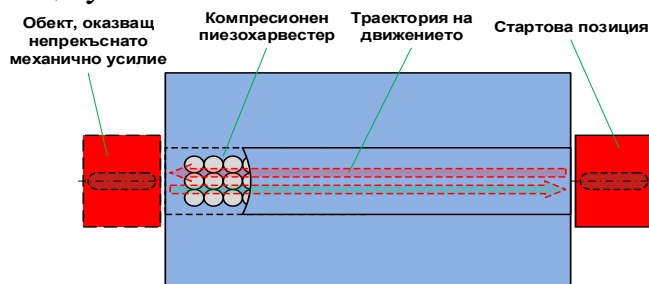
Фиг.4.93. Сравнение на енергийните сигнатури получени за субектите

На база на методиката от Глава Втора е представена генерираната мощност от Модел А и Модел Б (Таблица 4.52) . Масата $m=83.3$ kg е изведена от средното тегло на участниците в експеримента. Ясно се вижда значението на избраната конфигурация за разпределение на активните елементи. При указан едновременен натиск върху 2.4 пъти повече пиезоелемента, се генерира 2.6 пъти по- голяма изходна мощност.

Таблица 4.52. Генерирана изходна мощност на Модел А и Модел Б

Показател	Означе- ние	Мерна единица	Стойност	
			Модел А	Модел Б
Маса	m	kg	83.3	83.3
Силата с която човек въздейства върху пиезо подложката	F	N	816	816
Пиезоелектрична константа, на пиезо елемента, използван за изграждане на активната подложка	d_{33}	C/N	$250 \cdot 10^{-12}$	$250 \cdot 10^{-12}$
Капацитет на пиезоелектричен елемент	C	F	$29 \cdot 10^{-9}$	$29 \cdot 10^{-9}$
Време за въздействие върху пиезо подложката	t	s	5	5
Брой настъпвани пиезоелементи от един човек	n	Брой	2,5	6
Брой подложки в сградата	h	Брой	1	1
Брой преминавания през подложката на харвестера	m	Брой	1000	1000
Среден брой дни за месец	D	Брой	21	21
Мощност генерирана от преминаване на един човек върху един пиезоелемент	P'	W	$3,5875 \cdot 10^{-6}$	$3,5875 \cdot 10^{-6}$
Мощност, генерирана за един ден	P_D	W	0,21	0,53
Мощност, генерирана за един месец	P_M	W	4,41	11,25
Мощност, генерирана за една година	P_Y	W	52,92	135

При предходното изследване на компресионният пиезоелектричен харвестер за генерирането на събираната енергия бяха използвани пешеходци. Поради особеностите в придвижването на човешките обекти в профила на добитата енергия се наблюдават специфични особености (фиг.4.93). Предложен е експеримент при който тази особеност е изключена, като матричната структура е непрекъснато натоварена по време на изследването. Местоположението на прилаганото натоварване върху матрицата се премества в рамките на 5s. Също така в експеримента са променяни масовите показатели на устройството оказващо усилие.



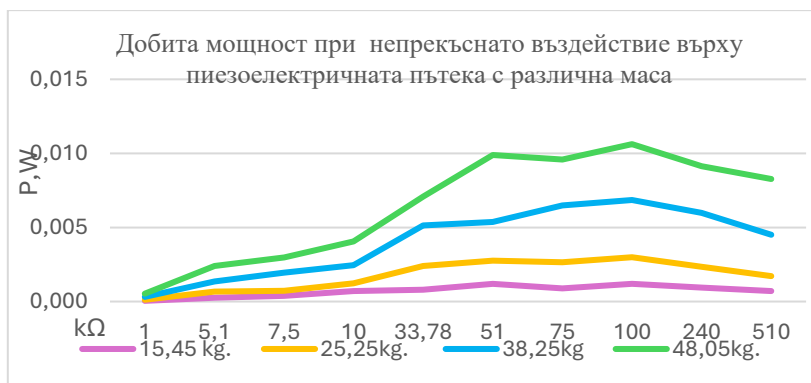
Фиг. 4.94. Методика за провеждане на експеримента

Методиката на измерване е следната:

- Обектът чрез който се прилага механичното усилие първоначално е поставен извън активната част на харвестерната матрица;
- При стартиране на експеримента в рамките на 5s подвижният обект се прекарва по дължината на активната част на матрицата (фиг. 4.79. б). Движението се извършва в двете посоки по тази дължина (фиг. 4.94).
- Всяко измерване за определена маса се прави по 10 пъти, като резултатите са осреднени. Използваните маси са четири на брой, съответно: 15,45 кг., 25,25 кг., 38,25 кг. и 48,05 кг., като първата маса е самата маса на движещият се обект.

Таблица 4.53. Генерирана мощност при непрекъснато въздействие с маса 15,45 кг.

15,45 kg.										
5sec/kΩ	1	5,1	7,5	10	33,78	51	75	100	240	510
Измерване										
1	0,0113384	0,036239	0,042761	0,095923	0,217146	0,266768	0,156662	0,355397	0,484749	0,707201
2	0,00636512	0,030072	0,047417	0,065527	0,202552	0,419415	0,265473	0,279947	0,27842	0,615941
3	0,00400	0,041048	0,051738	0,058252	0,138231	0,194217	0,355197	0,345013	0,480809	0,722052
4	0,00743571	0,028977	0,078105	0,071928	0,113483	0,193048	0,362787	0,353715	0,613327	0,472364
5	0,00975401	0,03909	0,048743	0,126527	0,124665	0,196443	0,325682	0,337191	0,388514	0,50491
6	0,00574019	0,037648	0,044535	0,089638	0,190753	0,258067	0,231384	0,353593	0,472956	0,549327
7	0,00551553	0,037758	0,057397	0,129233	0,145051	0,160679	0,272563	0,323073	0,421336	0,559918
8	0,00365352	0,037222	0,065358	0,082965	0,1957	0,217036	0,175825	0,389261	0,510563	0,569158
9	0,00673152	0,029191	0,061503	0,078361	0,204744	0,259154	0,251521	0,366366	0,533994	0,487267
10	0,00831428	0,041646	0,041775	0,042896	0,118602	0,301252	0,191139	0,355671	0,565055	0,807462
Средно	0,006884823	0,035889	0,053933	0,084125	0,165093	0,246608	0,258823	0,345923	0,474972	0,59956
P,W	0,000047	0,000253	0,000388	0,000708	0,000807	0,001192	0,000893	0,001197	0,00094	0,000705



Фиг. 4.95 Сравнителен анализ на добитата мощност при различна маса

4.6. Изводи

4.6.1. Направено е обосновано предположение, че част от получената енергия е от реактивен тип, тъй като по своя характер пиезоелектричните гредови вибрационни харвестери представляват резонансна структура. За да бъде потвърдено това предположение в изходната схема на пиезоелектричните харвестери беше включена изправителна схема, чрез която да се отчита само полезната постоянно токова мощност, която може да бъде придобита от харвестера.

4.6.2. За конкретната предложена конфигурация на компресионен пиезоелектричен харвестер са извършени експерименти с прекъснато и непрекъснато въздействие на активната част на устройството.

На базата на направените измервания могат да се направят следните изводи:

4.6.2.1. Установено е че прекъснатото въздействие е по-ефективно при получаването на енергия от предложената конструкция на компресионен харвестер.

4.6.2.2 Вертикалното усилие с прекъснат (ударен) характер постига по-добра ефективност, спрямо непрекъснатото (хоризонтално-ротационно) въздействие, което доказва адекватността на предложения в *Трета Глава* модел на компресионен харвестер (фиг. 3.17 и фиг. 3.18Ф).

4.6.2.3 По-голямата площ на указащият влияние обект води до задействане на по-голям брой активни пиезоелектрични елементи, което води до подобряване на ефективността на енергодобива.

АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

1. Направен е литературен обзор на харвестери използващи различни физични принципи на действие. От анализа на тези харвестери, може да се направи изводът, че тези, базирани на пиезоелектричен принцип, дават най-добро съотношение между приложеното механично напрежение и получените напреженови падове.

2. Разгледани са разновидности на пиезоелектрични харвестери, които работят на базата на правия и обратния пиезоефект, но различаващи се по своите конструкционни особености и принцип на работа. Единият от разглежданите харвестери представлява класическа гредова конструкция,

използваща външни механични вибрации за генериране на електрическа енергия, а вторият вид използва външни механични деформации за генериране на електрическа енергия. Теоретично вибрационният харвестер може да се разглежда, като частен случай на компресионният харвестер, тъй като деформацията там предполага наличието на непрекъснато периодично механично усилие въздействащо върху конструкцията.

3. Теоретичните модели на вибрационните пиезоелектрични харвестери са много добре развити и постоянно се усъвършенстват, като се използват за оценка на максимално възможното получено количество енергия. Това се дължи на факта, че базовата гредова конструкция се явява консервативна и не може да бъде подлагана на такива големи пермутации. Всички модели се базират на теорията на Ойлер-Бернули за гредите, като по-съвършените модели използват принципа на Тимошенко. Тези модели търпят постоянно развитие, като разликите между тях най-често се състоят в използваните електромеханични еквивалентни схеми, които отчитат влиянието на различни конструкционни особености. Най-често промяната в тези модели се състои в свързването, вида и броя на елементите, които изграждат еквивалентните схеми, отразяващи електромеханичната аналогия за пиезоелектрични среди. Всички математически модели са създадени за идеални условия, при които механичното усилие е непрекъснато във времето и тези математически модели теоретично могат да дадат максималната изходна мощност за дадена конструкция. При тези модели не се отчита факта, че при реална работа на такъв вид харвестер механичното външно усилие може да има прекъснат характер и честотата на тези усилия може да не съвпада с резонанса на първия хармоник и дори да попада в областта на антирезонанса. Това би довело в реални условия до драстично намаляване на количеството добивана енергия.

4. В настоящата работа еквивалентната схема на класическия модел на вибрационен пиезоелектричен харвестер е разширена с елементи, които описват някои от специфичните особености на вибрационните харвестери от гредови тип (фиг.3.9 б) и фиг. 3.16 в)). Елементите на предложените еквивалентни схеми отразяват някои от променливите параметри в работата на този вид харвестери (като паразитни капацитети), както и параметрите на външните за схемата елементи, които оказват въздействие върху работата на харвестера. Точността на класическите модели за описание на вибрационните харвестери е задоволително висока за идеални условия, но предложените разширени еквивалентни схеми имат за цел да отразят реалните условия, на които могат да бъдат подложени вибрационните пиезоелектрични харвестери.

5. За разлика от вибрационните пиезоелектрични харвестери, компресионните такива нямат обща конструкционна концепция. Това означава голямо разнообразие на конструктивни решения, чиито математически модели могат да се различават кардинално един от друг. При тях е прието да се създават конкретни математически модели за съответните конструктивни решения, което не позволява създаването на общ

математически модел за този вид харвестери. В случая е предложена планарна конструкция на компресионен харвестер, в която механичното усилие се прилага перпендикулярно на равнината на разположение на елементите.

6. За разработената планарна конструкция на компресионен харвестер е предложен собствен модел, базиращ се на основните принципи на съпротивлението на материалите за вертикално и хоризонтално усилие. На базата на създадения модел се правят обосновани предположения, че промените в конструкцията на компресионният харвестер ще доведат до промяна в генерираната енергия от няколко порядъка. Под промяна на харвестерната конструкция се предполага промяната на взаимното разположение между пиезоелементите, чиито параметри си остават константни. Предложено е свързване между отделните елементи на харвестера по обосновано предположение за действието на отделните пиезоелектрични елементи (фиг. 3.20 а). Последователното електрическо свързване на пиезоелектричните елементи в случая не е подходящо поради факта, че за да се генерира сигнал за цялата матрица всички елементи трябва да бъдат подложени на механичен натиск едновременно, което не е реално в предложената конфигурация. Затова в конструкцията е използвано паралелно електрическо свързване на пиезоелектричните елементи за по-нататъшното експериментално изследване.

7. За подобряване на методите за оценка беше включена изправителна схема, която да отдели само активната енергия. Експерименталните резултати показват, че този подход е правилен, тъй като получените резултати показват голяма степен на сходимост. За сравнение са използвани двете класически измервателни схеми AV и VA , както и комбинация между тях за оценка на променливотоковата и постояннотоковата енергия получавана от харвестерното устройство. За оценка се използва само постояннотоковата част от резултатите.

8. За предложената планарна конструкция на компресионен пиезоелектричен харвестер, са извършени изследвания, които имат динамичен характер. Използвани са два вида въздействия – с прекъснат и непрекъснат характер, като при прекъснатият се има предвид преминаването на субект (пешеходец), който преминава през активната част с няколко стъпки. Под непрекъснато въздействие се разбира преминаването на обект, извършващ хоризонтално-ротационно движение, който контактува почти непрекъснато с активната част на харвестера.

9. Пряко сравнение между предложените конструкции на вибрационен и компресионен пиезоелектричен харвестер е неприложимо поради факта че инерционните моменти между двете системи са коренно различни. Инерционната маса на гредовия вибрационен пиезоелектричен харвестер е от порядъка на няколко грама, докато инерционната маса на компресионния пиезоелектричен харвестер е от порядъка на десетки и стотици килограми.

10. На базата на горния извод се дефинират различните области на приложение на двата вида харвестери. Вибрационният пиезоелектричен харвестер е система с изключителна инерционна чувствителност, което позволява да бъде използван едновременно и като сензор. Едно от предимствата на компресионните пиезоелектрични харвестери е че имат голяма степен на мащабируемост, което може да бъде използвано както за събиране на енергия от тежки конструкции, така и за микромощности, генерирани от човек при неговото ежедневно движение, например чрез вграждане на такъв харвестер в частите на облеклото и обувките. Конструкциите на компресионните пиезоелектрични харвестери могат да бъдат използвани също така и като сензорни системи.

ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. На базата на разгледаните физико-математически принципи на действие на пиезоелектричните харвестери е изказано предположение, че пиезоелектричните вибрационни гредови харвестерни конструкции могат да се разглеждат като специфичен частен случай на пиезоелектричните компресионни харвестери.

2. Предложени са усъвършенствани еквивалентни схеми на вибрационен пиезоелектричен харвестер от гредови тип с цел отразяване на реалните условия, на които могат да бъдат подложени този тип конструкции. Елементите на предложените еквивалентни схеми отразяват някои от променливите параметри в работата на този вид харвестери (като паразитни капацитети), както и параметрите на външните за схемата елементи, които оказват въздействие върху работата на харвестера.

3. Създаден е модел на планарна конструкция на пиезоелектричен харвестер от компресионен тип, който отразява особеностите на елементите, изграждащи това устройство, и се базира на основните принципи на съпротивлението на материалите за вертикално и хоризонтално усилие. Предложено е паралелно електрическо свързване между отделните елементи на компресионния харвестер по обосновано предположение, поради факта че последователното електрическо свързване на елементи в случая не е подходящо, тъй като, за да се генерира сигнал за цялата матрица, всички нейни елементи трябва да бъдат подложени на механичен натиск едновременно.

4. Предложено е включване на изправителна част към измервателните схеми, оценяващи количеството на придобита енергия от харвестерите поради получаване на разходимост на получените експериментални резултати за получената променливотокова мощност. Това се дължи на наличието на реактивна съставяща на мощността, която води до неточно отчитане при непреките методи на оценка на количеството получавана енергия.

5. Предложени са два варианта на планарна конструкция на компресионен пиезоелектричен харвестер и методика за изследването им. От

направените изследвания се доказва че вертикалното усилие с прекъснат (ударен) характер постига по-добра ефективност спрямо непрекъснатото (хоризонтално- ротационно) въздействие, което се корелира с предложения в трета глава модел.

Приложни приноси

6. Във връзка с разработката на компресионни пиезоелектрични харвестери е създадена конструкция за по-ефективно събиране на енергия чрез намаляване на разстоянието между активните елементи на харвестера, доказано от направените експериментални изследвания.

7. Направена е оценка на адекватността на използваните измервателни схеми от типа AV и VA, както и комбинацията между тях. Резултатите за постояннотоковата част показват голяма степен на сходимост, което доказва правилността на използването на изправителна част в експерименталната установка.

Списък на публикациите, свързани с дисертацията

1. Kolev D., R. Stoyanova, V. Todorova. „*Evaluating the Efficiency of Piezoelectric Energy Harvester of Compression Type*“. Proceedings of X National Conference “ELECTRONICA 2019” May 16-17, 2019, Sofia, IEEE Conference Rec. # 47796, e-ISBN: 978-1-7281-3622-6.
2. Stoyanova R., D. Kolev, V. Todorova. „*Problems in Designing Piezoelectric Compression Harvesters*“. Proc. of ISC UNITECH'2019, 15-16 November 2019, Gabrovo, Vol. 1, pp. 197-201, ISSN 1313-230X.
3. Stoyanova R., “*Estimating Efficiency of Vibrational Piezoelectric Harvester for Human Accessory Integration*” Proc. 13th National Conference with International Participation “Electronica 2022”, May 19-20,2022, Sofia, Bulgaria
4. Stoyanova R., Kolev D., Todorova V., „*Determining the Suitability of Measurement Circuits for Piezoelectric Vibrational Harvesters*“, Proc. XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, 2022., ISBN 978-1-6654-9878-4
5. Stoyanova R., D. Kolev, V. Todorova, „*Clarification of Utilized Measurement Circuits for Piezoelectric Vibrational Harvesters*“, Proc of ISC UNITECH 2022, 18-19 November 2022, Gabrovo, Vol.1 110-115, ISSN 1313-230X