

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Орлин Пламенов Станчев

Заглавие:

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПИЕЗОПОЛИМЕРИ КАТО ЕНЕРГИЙНИ
ИЗТОЧНИЦИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „доктор“**

**по докторска програма: ш. 02.20.08 „Електронизация (по отрасли и
групи научни специалности)“
към професионално направление: 5.2 „Електротехника, електроника
и автоматика“**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Емилиян Боянов Беков

Рецензенти:

1.
2.

Варна, 2016 г.

Дисертационният труд е обсъден на 05.07.2016 г. в катедра „Електронна техника и микроелектроника“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Електронна техника и микроелектроника“

Автор: инж. Орлин Пламенов Станчев

Заглавие: Изследване на пиезополимери като енергийни източници

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Орлин Пламенов Станчев

Заглавие:

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПИЕЗОПОЛИМЕРИ КАТО ЕНЕРГИЙНИ
ИЗТОЧНИЦИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „доктор“**

Варна, 2016 г.

Дисертационният труд съдържа 145 страници, включително 87 фигури, 9 таблици и 7 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 109 заглавия, от които 13 на кирилица и 96 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД “Докторанти”, стая 318 НУК

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Пиезоелектричеството е открито от братята Кюри преди повече от 100 години. През 60-те години на XX век изследователите са открили слаб пиезоелектричен ефект в китовата кост и сухожилия. Това явление поражда усилено търсене на други органични материали, които могат да проявят пиезоелектричество. През 1969 г. Хейджи Кауаи открива много висока пиезоактивност в поляризиран флуорополимер – поливинилиден флуорид (PVDF). Други материали като найлон и PVC проявяват същия ефект, но никой от тях не притежава толкова високи пиезоелектрични свойства, както PVDF материала и неговите кополимери – P(VDF-TrFE) и P(VDF-TeFE).

Изследването на нови алтернативни енергийни източници и системи за добиване и прехвърляне на енергия е от голямо значение за области като медицината, измервателните системи и др. Развитието на полупроводниковите елементи и имплементирането на нови материали предоставят възможности за усъвършенстване на електронните интерфейсни схеми и съответно за подобряване на използването на пиезополимерните материали.

Проблем

Всеизвестни са приложенията на пиезокерамичните материали за изработка на трансдюсери, актуатори, пиезотрансформатори, генератори, сензори и др. За сметка на това пиезополимерните материали имат значителни предимства, но техните приложения са все още ограничени и слабо изследвани. В представения дисертационен труд интерес представляват възможностите за добиване и прехвърляне на енергия чрез пиезополимерни материали. Създадени, анализирани и имплементирани са модели на пиезополимерни елементи и устройства, подпомагащи оценката и проектирането на възможни приложения на разглежданите материали. Предложени са конструкции на пиезополимерни трансформатори и високочестотни хранващи силови преобразуватели. Създадени са комбинирани системи за добиване на енергия и измерване на променливи механични въздействия чрез пиезополимерни активни сензори.

Цели и задачи на изследването

Основната цел на дисертационния труд е изследване и анализ на PVDF елементите като източници за получаване и преобразуване на енергия.

Задачите, които се решават в дисертационното изследване, са следните:

1. Създаване на модели на PVDF елементи като източници за получаване и преобразуване на енергия:
 - Създаване на модел на електрическите параметри на PVDF елементи;

- Създаване на модел на PVDF елемент като електромеханичен излъчвател и приемник с напречно и надлъжно разпространение на акустичната вълна;
 - Създаване на методика за съставяне на симулационен модел.
2. Изследване и анализ на приложението на PVDF елементите при трансформиране на енергия:
- Анализ на различните конструкции за прехвърляне на енергия чрез PVDF елементи;
 - Анализ и изследване на различните силови преобразуватели за хранване на пиезополимерни елементи.
3. Изследване и анализ на приложението на PVDF елементите като източник за получаване на енергия:
- Анализ и изследване на PVDF елементите като активни сензори и интерфейсни схеми към тях;
 - Анализ и изследване на PVDF елементите като източник на енергия за хранване на маломощни устройства.

Обект и предмет на изследване

Обект на изследване са пиезополимерните елементи, изработени от поливинилиден флуорид (PVDF), който е най-характерния представител на пиезополимерите, тъй като притежава най-висока пиезоактивност, близки характеристики до своите кополимери и е достъпен във вида на различни елементи, заготовки и структури.

Предмет на научно изследване са възможните конструкции за добиване и прехвърляне на енергия, които включват в структурата си пиезополимерни елементи; интерфейсните хранващи и измервателни електронни схеми, и преобразувателите за добиване на енергия. В допълнение се разработват математически и симулационни модели, описващи поведението на изследваните елементи, конструкции и електронни схеми, както и експериментални постановки.

Методи на изследване

Методите, чрез които са постигнати поставените задачи в дисертацията, включват:

- Математически методи за определяне на моделните параметри на PVDF елементите и на разпространението на ултразвуковите вълни;
- Съвременни програмни продукти за моделиране и симулиране на PVDF елементи, пиезополимерни трансформатори и на електронни преобразуватели, служещи за хранване на пиезоелементи или за добиване на енергия от тях;
- Провеждане на експериментални изследвания за верифициране на предложените модели.

Място на изследване

Изследванията, представени в дисертацията, са проведени на следните места:

- Технически Университет – Варна, България – лаборатории „Медицинска електроника“, „Силова електроника“ и „Сензорна техника“ към катедра „Електронна техника и микроелектроника“;
- Университет Гент, Белгия – лаборатория „Електрическа енергия (EELAB)“ – в рамките на проект „Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти, специализанти и млади учени“ и преподавателска мобилност по програма „ЕРАЗЪМ“.

Научна новост на изследването

Изследването, направено в дисертацията, изяснява възможностите на пиезополимерните материали за добиване на енергия и захранване на електронни устройства, както и за прехвърляне на електрическа енергия по акустичен способ.

Разработени са симулационни модели на пиезополимерни трансформатори и специализирана методика за определяне на техните параметри.

Предложени са конструкции на пиезополимерни трансформатори, за които липсват данни в специализираната литература и тяхното специфично приложение в медицината. Създадени са нови високоефективни, високочестотни резонансни драйверни схеми за силови полеви транзистори.

Създаден е специализиран модел на система за добиване на енергия от пиезополимерни материали. Предложено е решение за съвместното им използване като източник на енергия и като активни сензори.

Практическа ценност на изследването

Предложените модели, симулации, постановки и експерименти могат да се използват при решаването на конкретни инженерни задачи, свързани с добиването на енергия от пиезополимери. Реализираното изследване, моделът и разработената методика за съставяне на симулационни модели на пиезополимерни трансформатори подпомагат тяхното проектиране и по-конкретно при приложения в медицината. Резултатите от изследванията на пиезополимерни трансформатори могат да послужат за основа на по-нататъшни разработки, усъвършенстване и намиране на нови приложения. Разработеният високочестотен драйвер за силови транзистори в комбинация със силови ключове, изработени от нови полупроводникови материали, разширява възможностите за достигане на по-високи работни честоти на силовите преобразуватели. Проведените изследвания и разработеният модел на преобразувател за добиване на енергия от пиезополимерни елементи спомагат проектирането и настройването на измервателни системи с безжични комуникационни модули и

системи за събиране на данни, захранвани от механични вибрации и промени в налягане, налични в заобикалящата ги среда.

Апробация на изследването

Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са представени в общо 7 публикации, от които:

- 1 статия в списание „Акустика”, 2014 г.;
- 1 доклад в сборник „Annual Journal of Electronics“, ТУ-София, 2015;
- 1 доклад в годишник на ТУ-Варна, 2015 г.;
- 2 доклада на конференция „SIELA 2016“, 2016 г., Бургас, България;
- 1 статия в списание „TEM Journal”, 2016 г. (приета за печат);
- 1 доклад на конференция „MiPro 2014”, 2014 г., Опатия, Хърватска.

Конференциите „MiPro 2014“ и „SIELA 2016“ са индексирани в електронната база данни „SCOPUS“.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1: Обзор и анализ на резултатите от досегашни научни изследвания по проблема

В Глава 1 са изложени и анализирани характеристиките на пиезополимерните материали и в частност на PVDF материала и неговите кополимери. Разгледани са наличните пиезополимерни елементи (ПП елементи) и възможностите за добиване на енергия от тях. Представени са интерфейсни електронни схеми и специфични компоненти за тях, изработени от нови полупроводникови материали.

Описан е химичният състав на PVDF материала и етапите от неговия производствен процес. Сравнени са различните електродни покрития за ПП филм, от който се изработват ПП елементи. Разгледани са техните конструктивни особености.

Анализирани са свойствата на ПП филм на базата, на които се дефинират приложенията на материала. Изложени са пиезокоефициентите и останалите важни електромеханични характеристики на материала като диелектрична проникваемост, електромеханичен коефициент на куплиране, модул на еластичност, акустичен импеданс, скорост на разпространение на звука по различните направления и др.

PVDF материалът е сравнен с неговите кополимери и е аргументиран изборът му за обект на изследване в дисертационния труд.

Детайлно са анализирани пиезоелектрическите свойства на ПП. Дадени са уравненията, чрез които се описва правият и обратен пиезоелектрически ефект. Пиезоелементите са разгледани като източници на заряд и на напрежение.

Изложени са електромеханичните съображения при използване на ПП елементи, които се отнасят за проектирането на ПП трансформатори, системи за добиване на енергия и сензори.

Анализиран е потенциалът за добиване на енергия от ПП елементи и е изведена тяхната ефективност, както и допустимите механични натоварвания на материала. Дадени са примери за количество генерирана енергия от ПП елемент с определена дебелина и площ при дадено механично въздействие.

Направен е обзор на конструкции и принципа на действие на съществуващите пиезоелектрически трансформатори, които се изработват от пиезокерамични материали. Обяснени са предимствата на PVDF материала за изработка на ПП трансформатори и неговото приложение за медицински цели. Изяснена е нуждата от високочестотни захранващи източници на напрежение за ПП трансформатори.

Анализирани са характеристиките на различни силови ключове, които са изработени от нови полупроводникови материали и са подходящи за изграждане на високочестотни захранващи силови преобразуватели. Извършено е сравнение и е обосновано използването на полеви транзистори, изработени от галиев нитрид.

Разгледано е приложението на ПП елементи като активни сензори и техните характеристики. Направен е обзор на основните видове измервателни преобразуватели, които се разделят на напреженови и зарядо-чувствителни усилватели. Анализирани са техните обратни връзки и предавателни характеристики.

Обобщения и изводи

Като заключение върху направения обзор и анализ на досегашните научни изследвания на проблема, са направени следните обобщения и изводи, изясняващи нерешените проблеми в разглежданата тематика:

1. В специализираната научна литература са представени множество модели основно на PZT елементи и значително по-малко на PVDF елементи;
2. Съществуват основни различия между параметрите на пиезокерамичните и пиезополимерните елементи;
3. Малка част от известните модели на PVDF елементи решават основно въпросите на ултразвуковите трансдюсери, като се разглежда едновременно правото и обратното преобразуване на енергия, а не се разглеждат приоритетно модели, касаещи получаването и прехвърлянето на енергията от тези елементи;
4. Известни са основно решения на пиезокерамични трансформатори, които се използват за захранване на електронни устройства, като не се разглеждат конструкции, изградени от пиезополимерен материал;
5. Евентуалното изграждане на пиезополимерни трансформатори би решило конструктивните проблеми и добавило допълнителни предимства при прилагане на тези трансформатори в среди с нисък акустичен импеданс, като например вода и тъканни структури в човешкото тяло. Не са известни пиезополимерни трансформатори за приложения в медицинската техника;
6. Пиезополимерният филм изпада в състояние на резонанс при високи честоти от порядъка на мегагерци. Не са известни високо-честотни захранващи преобразуватели за тях, работещи при такива честоти, тъй като пиезокерамичните елементи се захранват с напрежение в килохерцовия диапазон;
7. При въпросите, свързани с генериране и получаване на енергия, се разглеждат главно приложения, без да е обърнато внимание на изграждането на системи за генериране, преобразуване и съхраняване на енергия;
8. Няма представени голямо количество схемни решения за получаване на енергия и директното им използване например в сензорни мрежи или в такива за безжично предаване на енергията.

Глава 2: Моделиране на пиезополимерни трансдюсери и трансформатори

Моделирането на ПП елементи, използвани като пиезоелектрически трансдюсери или трансформатори, се извършва, за да се симулира и предвиди тяхното поведение в различни работни условия, конфигурации и комбинации със захранващи и други интерфейсни електронни схеми. Моделите имат голямо значение за процеса на проектиране на електро-акустични елементи и по-точно подбор на формата, подредбата, размера, дебелината и останалите параметри на ПП елементите.

Моделиране на пиезополимерен елемент

Създадена е еквивалентна заместваща схема на ПП елемент, използвана като товар в електрическа верига и са дадени уравненията, по които се определят нейните параметри, част от които са честотно зависими. Еквивалентната заместваща схема е имплементирана в симулационен модел, с помощта на който се симулира честотното поведение на пиезоелемента.

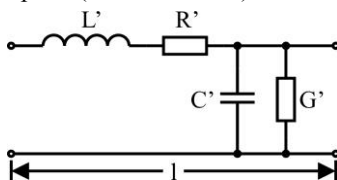
Представени са еквивалентни заместващи схеми на ПП елемент, използван като източник на напрежение или на заряд. Анализирани са изходният импеданс и неговата честотна зависимост. Създаден е симулационен модел, чрез който да се определя честотното поведение и по-конкретно изходното напрежение на пиезоелемента.

Модел на пиезополимерен трансдюсер

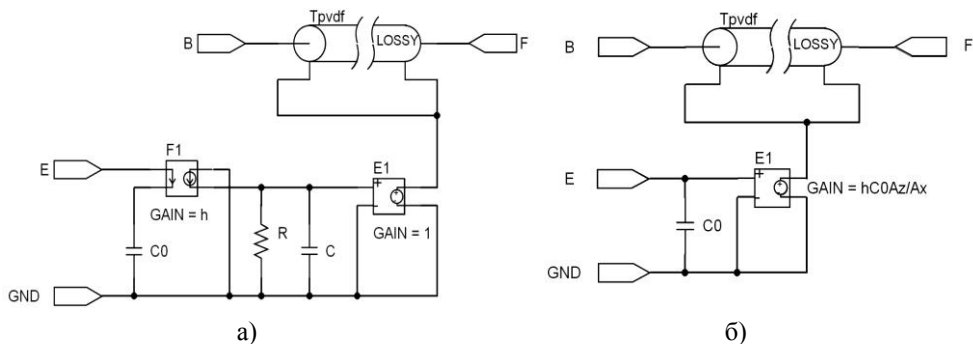
Анализирани са моделите на пиезополимерни трансдюсери с надлъжно и напречно разпространение на акустичната вълна и е аргументиран изборът на модела на Лийч като база за създаване на модел на многослоен ПП трансформатор. Изведени са уравненията, описващи разпространението на акустичната вълна в материала и е обяснена топологията и принципа на действие на анализирания модел.

Модел на многослоен пиезополимерен трансформатор

Създаден е модел на многослоен ПП трансформатор. Той е разгледан като система от взаимосвързани ултразвукови трансдюсери и допълнителни среди за разпространение на акустичните вълни, формиращи първичната и вторичната страна на ПП трансформатор, както и средата за пренос на енергия. Електромеханичният модел на всяка една от страните на трансформатора е изграден от механична (Фиг. 2.1.) и електрическа аналогична верига (Фиг. 2.2 и 2.3).



Фиг. 2.1: Сегмент от предавателна линия със загуби



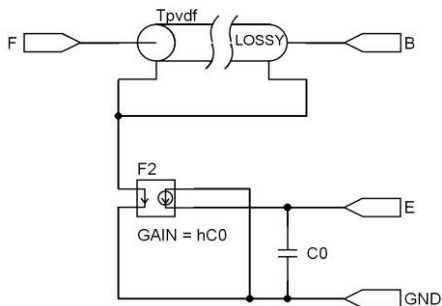
Фиг. 2.2: Модел на ПП элемент от първичната страна на ПП трансформатор с: а) – напречно; б) - надлъжно разпространение на акустичната вълна

Механичната аналогична верига представлява предавателна линия, при която се отчитат загубите и затихването на акустичната вълна и може да бъде моделирана чрез сегменти със съсредоточени параметри, като прилаганото захранващо напрежение е със синусоидална форма, за да се ограничи натоварването на електродите на елемента. Изведени са уравнения, чрез които се определят параметрите на предавателните линии в зависимост от посоката на разпространение на акустичните вълни и от работна честота. Електрическата аналогична верига се състои от зависими източници на напрежение (E1) и на ток (F1 и F2), еквивалентен кондензатор (C0), моделиращ капацитета на пиезоелемента и интегрираща RC група (R и C). Предавателната функция на зависимите източници на ток се определя на базата на предавателната константа h, която се намира от следните уравнения:

$$h = \frac{e_{3n}}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

$$e_{3n} = \sqrt{k_{3n}^2 \cdot E \cdot \varepsilon \cdot x_{3n}} \quad (2.2)$$

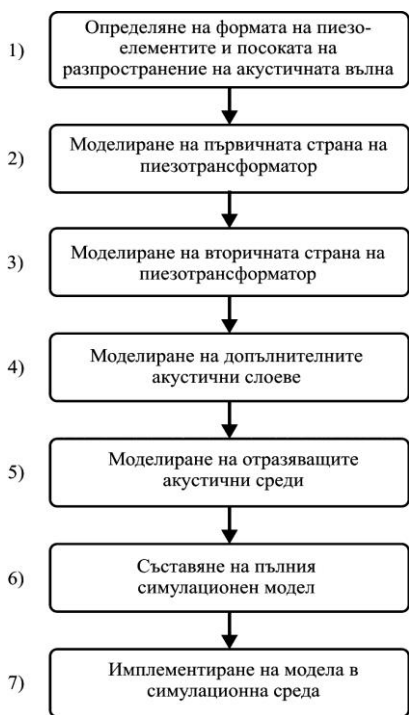
Въведен е коригиращ коефициент x, чрез който се донастройва поведението на модела.



Фиг. 2.3: Модел на ПП элемент от вторичната страна на ПП трансформатор с надлъжно или напречно разпространение на акустичната вълна

Методика за съставяне на симулационен модел на многослоен пиезополимерен трансформатор

Предложена е методика за съставяне на предложените симулационни модели на ПП трансформатори, като последователността е дадена на Фиг. 2.4. Тя се състои от



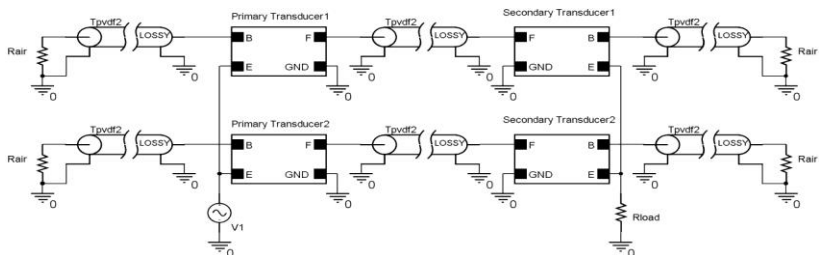
Фиг. 2.4: Последователност при съставяне на симулационен модел

отделна стъпка е подробно описана, а като приложение са дадени конкретни примери за изчисляване на параметрите на симулационните модели.

Симулационни модели

Предложените еквивалентни заместващи схеми и модели са имплементирани в симулационна среда PSpice на ORCAD. Тяхната конфигурация и параметри са определени с помощта на предложената методика. Разгледани са няколко различни варианта на еднослойни и многослойни ПП трансформатори. На Фиг. 2.5 е даден симулационен модел на многослоен ПП трансформатор, при който акустичната вълна се разпространява по направление на широчината на елементите. Извършена е експериментална верификация и резултатите са подробно представени в приложение.

седем стъпки. Необходимо е да бъде известна конструкцията и геометричните размери на ПП трансформатор, разположението на елементите, както и параметрите на всички използвани материали. Прилаганото на входа напрежение е със синусоидална форма и с амплитуда съобразена с дебелината на ПП филм. Работната честота обикновено е резонансната честота на материала по направлението, по което се разпространява акустичната вълна, когато това е практически реализуемо. Възможни са комбинации от многослойни излъчватели и приемачи акустичната вълна ПП елементи, както и различна посока на разпространение. В отделните стъпки се подбират подходящите за конкретния модел електрически аналогични вериги, дадени на Фиг. 2.2 и 2.3, и се изчисляват техните параметри (включително и на механичната аналогична верига) според уравненията изведени и описани в частта, където се анализира моделът на многослоен ПП трансформатор. В дисертационния труд всяка



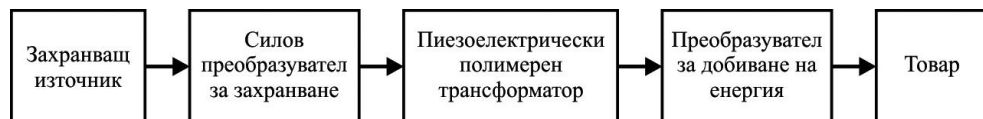
Фиг. 2.5: Симулационен модел на многослоен ПП трансформатор

Обобщения и изводи

1. Създадени и изследвани са специфични модели на ПП елементи, използвани като източници на енергия (добиване на енергия) и като товари в електрическа верига;
2. Анализирани са модели на ПП трансдюсери с надлъжно и напречно разпространение на акустичната вълна;
3. Предложен е коригиращ коефициент за получаване на пиезоелектрическата константа на материала в съответното направление, по което се прилага въздействието;
4. Създадени и изследвани са модели на различни конструкции на многослойни ПП трансформатори, изградени от PVDF елементи, които преобразуват и прехвърлят енергия;
5. Предложен е подход (методика) за изчисляване на специфичните моделни параметри на ПП елементи като източници за получаване и преобразуване на енергия;
6. Всички предложени модели са имплементирани в симулационна среда. Тяхната функционалност е изследвана и верифицирана чрез провеждане на лабораторни експериментални изследвания;
7. ПП елементите променят своите диелектрични параметри в зависимост от честотата на прилаганото въздействие. Те могат да бъдат прецизно определени с помощта на предложения симулационен модел на ПП елемент, използван като товар в електрическа верига;
8. Предложените модели на ПП елементи са мощен инструмент за прецизно симулационно изследване на добиването и преноса на енергия през различни биологични и небологични среди;
9. Предложените модели на ПП елементи могат да бъдат използвани за оценка на потенциала и за проектиране на ПП трансформатори, включително и при специфични медицински приложения;
10. Предложените модели на ПП елементи са ограничени при промени в работната честота и формата на вълната, но предоставят свобода при конструкции, съставени от множество слоеве и различни материали.

Глава 3: Пиезополимерен трансформатор

Пиезополимерният трансформатор в тази глава е разгледан като цялостна система за прехвърляне на електрическа енергия по акустичен път. За да се осъществи преносът на енергия при най-благоприятни условия освен ПП елементи, конструктивно оформени като пиезотрансформатор, са необходими и електронни силови преобразуватели, които да осигурят съгласуване със захранващия източник и с товара, и да зададат най-подходящата работна точка на системата (Фиг. 3.1).



Фиг. 3.1: Блокова схема на система за прехвърляне на електрическа енергия чрез ПП трансформатор

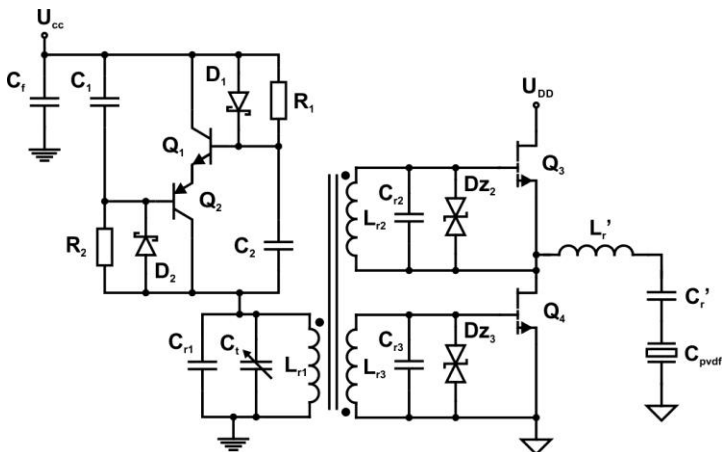
Силовите преобразуватели за захранване на първичната част на трансформатора осигуряват възбуждане на трансдюзерите с необходимата резонансна честота и повишават захранващото напрежение до номиналните работни стойности на прилаганото напрежение върху пиезоелементите, което е пропорционално на амплитудата на механичните деформации в конструкцията.

Силови преобразуватели за захранване на пиезополимерни трансформатори

Дискутирани са изискванията към силовите преобразуватели за захранване на пиезополимерни трансформатори.

Предложени за използване и анализирани са топологиите на едно-транзисторен паралелен резонансен силов преобразувател, полу-мостов резонансен инвертор и дву-транзисторен двутактен резонансен силов преобразувател. За всяка топология е изведена резонансната честота и е съставен симулационен модел в MATLAB, с помощта на който може да се определи импеданса на силовата верига при различни честоти и изменението на напрежението и тока през пиезоелемента. От разгледаните топологии на резонансни силови преобразуватели най-голямо значение за текущото дисертационно изследване има полу-мостовият резонансен инвертор без капацитивен делител на напрежение, на който е извършен подробен анализ, представен в текущата глава и в приложение.

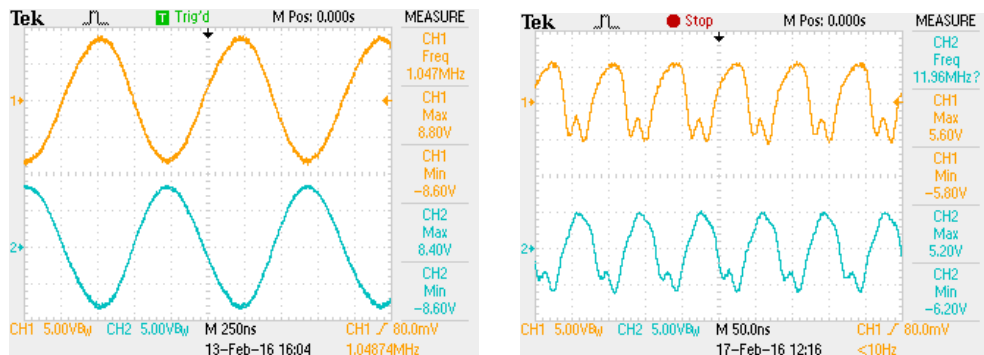
Дискутирани са изискванията към драйверните схеми, осигуряващи комутация на силовите ключове с честота над 100 kHz. Анализирани са конвенционалните драйверни схеми и тяхната приложимост при разглежданите резонансни силови преобразуватели. Предложена е високоефективна резонансна драйверна схема за управление на полеви транзистори (Фиг. 3.2). Резонансната верига е съставена от входния капацитет на полевия транзистор и от резонансен индуктор. За внасяне на енергия се използва двутранзисторен осцилатор, съставен от биполярни транзистори.



Фиг. 3.2: Принципна схема на осцилатор с галванично разделяне за управление на два GaN транзистора

Неговото предимство е, че не е необходим отделен блок за управление и той осцилира по естествен начин с резонансната честота на LC веригата, без да се добавят допълнителни елементи в нея. Налично е галванично разделяне и възможност за управление на 1, 2 или 4 силови транзистора. Принципът на действие и съображенията при проектиране са дискутирани подробно в дисертационния труд.

Създаден е симулационен модел в MATLAB за симулиране на поведението и настройка на параметрите на двутранзисторния осцилатор. Проведено е експериментално изследване и резултатите са представени в приложение. Формата на напрежението между-гейт и сорс на силовите транзистори при различни честоти е дадена на Фиг. 3.3. При честота 12 MHz предложената драйверна резонансна схема консумира мощност около 225 mW, управлявайки два силови транзистора.



а)

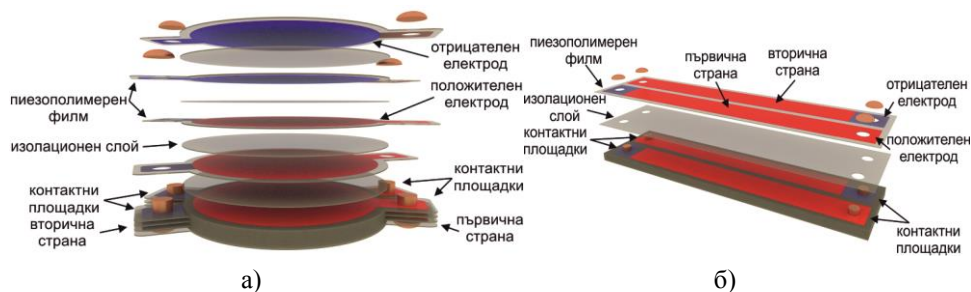
б)

Фиг. 3.3: Форма на напрежението между гейт и сорс на транзистори Q3 и Q4 при честота: а) - 1 MHz; б) - 12 MHz

Конструктивни особености на пиезополимерните трансформатори

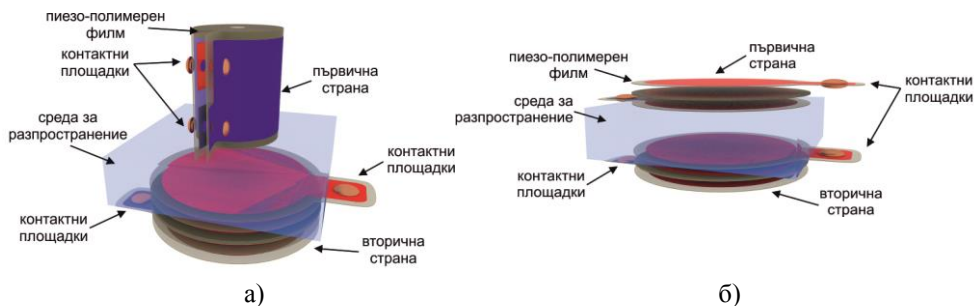
ПП трансформатори прехвърлят най-голямо количество енергия по акустичен път, когато изграждащите ги пиезоелементи са в състояние на механичен резонанс, поради което конструкцията и механичните характеристики оказват пряко влияние върху функционалността. Тъй като поляризираният PVDF материал се произвежда във вид на пиезофилм, формата на пиезоелементите, определя конструкцията, формата, дебелината и разположението на контактните площадки на пиезотрансформаторите.

Разработени, анализирани и изследвани са конструкции на едно- и многослойни ПП трансформатори, които са дадени на Фиг. 3.4 и 3.5. Разгледани са варианти за свързване на ПП елементи от първичната или вторичната страна на трансформатора.



Фиг. 3.4: Диаграма на многослоен: а) – радиален; б) - планарен ПП трансформатор

Изведени са уравнения за определяне на работните честоти, дискутирани са конструктивните съображения при проектиране и е направен сравнителен анализ на предложените конструкции. Предложено е специфично медицинско приложение на инвазивните ПП трансформатори, където е необходимо прехвърлянето на енергия през тъкан, явяваща се среда за пренос, с цел удължаване на живота на батерията на имплантируемото устройство. Проведено е експериментално изследване, в което се изследва функционалността на предложените трансформатори, резултатите са дадени в главата и подробно описани в приложение.



Фиг. 3.5: Диаграма на: а) – цилиндричен; б) - радиален инвазивен ПП трансформатор

Свързване на товар към ПП трансформатор

Дискутирано е свързването на товар към ПП трансформатори и изискванията за съгласуване и получаване на максимално количество енергия. Изведена е формула за определяне на изходния импеданс на трансформатора. Установена е нуждата от стабилизатор на напрежение, при захранване на електронни устройства.

Обобщения и изводи

1. Разработени, изследвани и сравнени са ПП електро-акустични трансформатори за преобразуване на енергия;
2. Създадени са триизмерни диаграми на предложените конструкции на ПП трансформатори;
3. Предложено е специфично приложение на инвазивния ПП трансформатор в медицинската електроника, подходящо за захранване на имплантируеми медицински устройства;
4. Предложени, анализирани и сравнени са електронни схемни решения и техните модели на първични захранващи преобразуватели за захранване на ПП елементи;
5. Предложени са симулационни модели за оразмеряване на силовите преобразуватели;
6. Разгледана е нова елементна база (транзистори) за реализиране на силовите преобразуватели;
7. Създаден, анализиран и изследван е специализиран високочестотен само-осцилиращ драйвер за управление на един или два силови транзистора с изолиран гейт, достигащ работни честоти над 10 MHz и използван в резонансни силови импулсни преобразуватели;
8. ПП трансформаторите има относително ниска ефективност в сравнение с пиезокерамичните трансформатори, която е ограничена от текущите характеристики на материала. Те са подходящи за специфични медицински приложения, където ефективността е основен фактор за сметка на приложимостта;
9. ПП трансформаторите са механично устойчиви и пластични, и могат да бъдат произвеждани в различни по форма и обем конструкции с относително малка дебелина.

Глава 4: Добиване на енергия от пиезополимерни елементи

В Глава 4 е направена оценка на възможностите за добиване на енергия от ПП елементи с цел захранване на маломощни електронни устройства. Изведена е връзката между прилаганата сила върху конкретен ПП елемент и полученото напрежение или заряд. Анализирани са електронни преобразуватели за добиване на енергия и са предложени модели за симулиране на поведението на пиезоелементите и интерфейсните схеми при различни механични въздействия и електрически товари. Предложено е използването на ПП елементи като активни сензори, които да захранват измервателната система.

Анализ на електромеханичните характеристики на пиезополимерните елементи при добиване на енергия

Изведени са уравнения за намиране на максималната сила, която може да бъде приложена върху даден ПП елемент, така че да не се получат нарушения на вътрешната структура или работната точка да бъде в линейната област на изходната характеристика на активния ПП сензор. Генерираният заряд при условие на късо съединение и генерираното напрежение при условие на отворена верига на ПП елемент и при определено въздействие на сила F по дадено направление, се намират от следните уравнения:

$$Q_{31} = d_{31} \cdot \frac{b_1}{t_{pvd f}} \cdot F_{31} \quad (4.1)$$

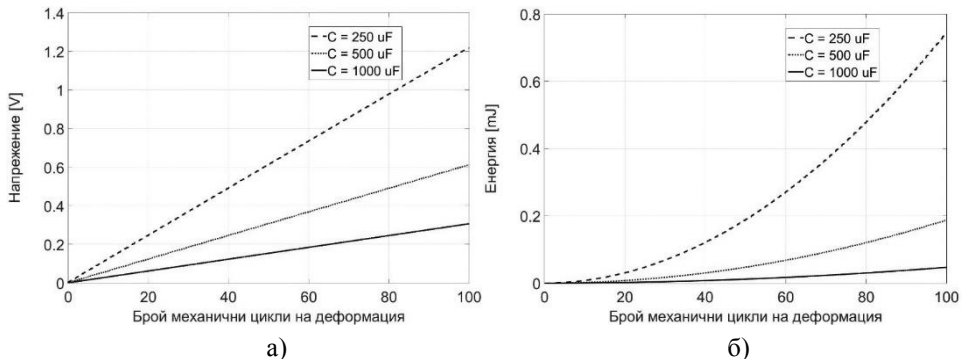
$$Q_{33} = d_{33} \cdot F_{33} \quad (4.2)$$

$$U_{31} = \frac{g_{31}}{a_1} \cdot F_{31} \quad (4.3)$$

$$U_{33} = -\frac{g_{33} \cdot t_{pvd f}}{A_{33}} \cdot F_{33} \quad (4.4)$$

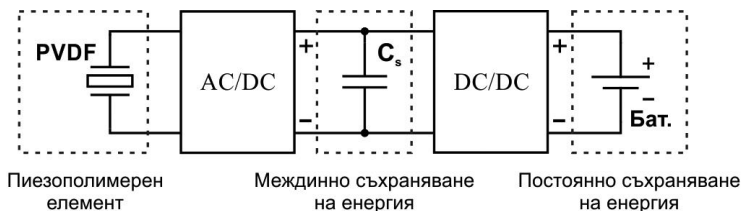
Интерфейсни схеми за добиване на енергия от ПП елементи

В следствие на променливото въздействие, прилагано върху ПП елементи, те генерират променлив ток, който трябва да бъде изправен, за да може да се зареди кондензатор или батерия и да се захранва електронна схема. Изборът на еднофазен мостов токоизправител е обоснован и са коментирани изискванията към изправителните диоди. Установена е връзката между изменението на генерирания от ПП елемента заряд и началното напрежение на товара (буферния кондензатор). Извършено е симулационно изследване и изменението на напрежението върху кондензатора и енергията натрупана в него при различни стойности на капацитета са дадени на Фиг. 4.1. Данните, налични в литературата, са анализирани и сравнени таблично. Дискутирана са възможностите за повишаване на ефективността и нуждата от умножение на заряди.

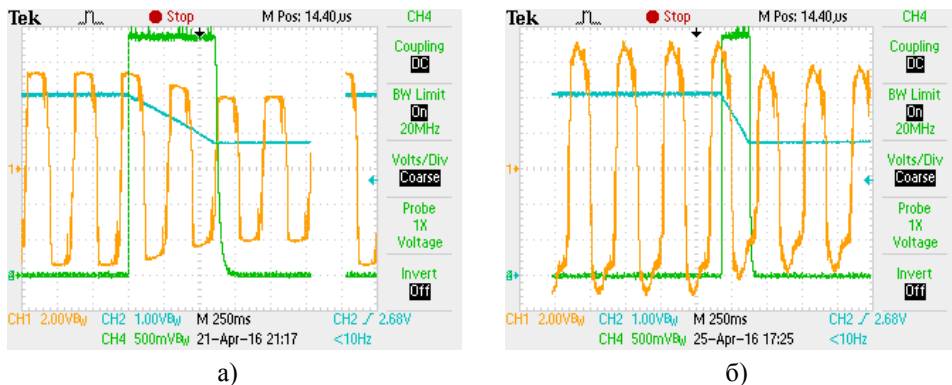


Фиг. 4.1: а) - изменение на напрежението; б) – изменение на енергията, натрупана в кондензатора за 100 механични цикъла на деформация при $\epsilon = 0,5 \%$

Дискутирани са режимите на работа на преобразувателите за добиване на енергия и е установена нуждата от междинното съхранение и натрупване. Анализиран е подход за междинно съхраняване на генерираната енергия в буферен кондензатор и зареждане на батерия или захранване на електронна схема за определен период от време (Фиг. 4.2).



Фигура 4.2: Блокова схема на преобразувател за добиване на енергия от ПЕП елементи

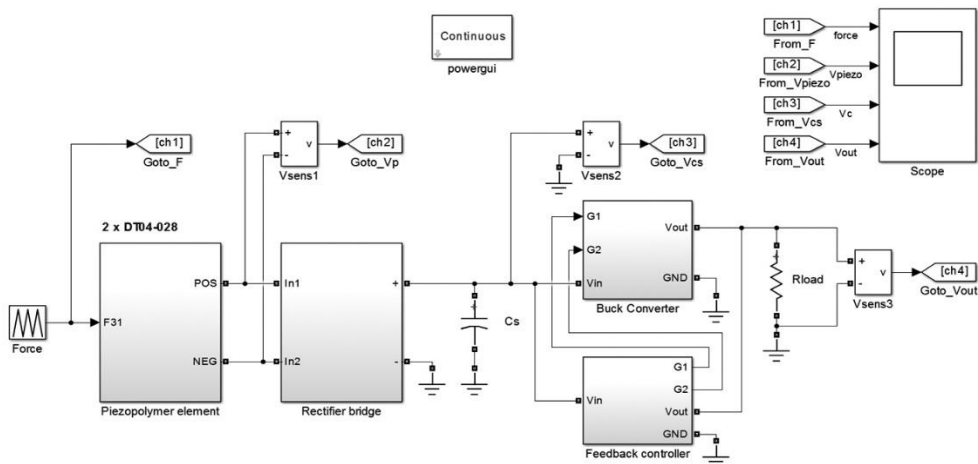


Фигура 4.3: Изменение на напреженията върху ПП елемент, буферния кондензатор и товара при $C_S = 1200 \mu F$ и $I_{\text{товар}}$: а) - 3,3 mA; б) - 10 mA

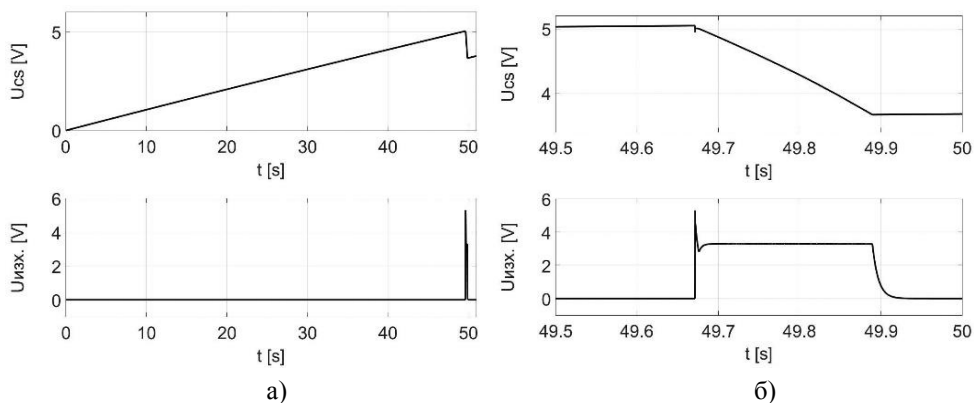
Изведени са уравнения за количеството налична енергия в кондензатора според хистерезисния цикъл на импулсния стабилизатор на напрежение и времето за захранване на товара. Извършено е експериментално изследване (Фиг. 4.3) и резултатите са представени и анализирани в приложение. Установена е възможността на ПП елементи да захранват маломощни системи с безжичен комуникационен интерфейс за достатъчно дълги интервали от време за обработка и изпращане на данни.

Модел на преобразувател за добиване на енергия от ПП елементи

Създаден е модел, който да симулира цялостното поведение на системата за добиване на енергия от ПП елементи, състояща се от източник на механично въздействие, пиезополимерен елемент, токоизправител, кондензатор, импулсен преобразувател за постоянно напрежение и товар (Фиг. 4.4). Целта е да се симулира цялостната реакция на системата при различни детерминирани периодични или случайни въздействия, както и време интервалите, в които се активира изходния преобразувател и се подава ток към товара. Моделът е разделен на четири части, съдържащи подсистеми, които описват поведението на основните елементи на системата. Първата подсистема съдържа елементи, които извършват действията от Уравнение 4.3 или 4.4 и по този начин моделират поведението на ПП елемент при приложена сила в даден момент от време. Генерираното напрежение се подава към втората подсистема, където е моделиран мостов токоизправител, зареждащ буферния кондензатор Cs. Третата подсистема представлява високоефективен синхронен прав понижаващ импулсен преобразувател на постоянно напрежение, стабилизиращ изходното напрежение на системата. Четвъртата подсистема моделира блокът за управление, който следи напрежението върху кондензатора и генерира ШИМ импулси за силовите ключове, осигурявайки ПИ регулация на изходното напрежение.



Фиг. 4.4: Модел на преобразувател за добиване на енергия от ПП елементи

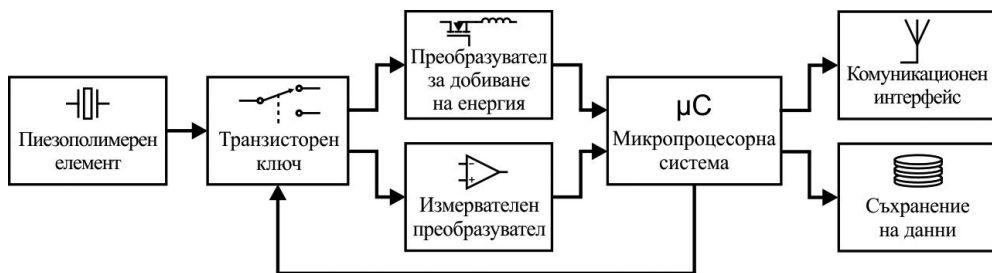


Фиг. 4.5: Изменение на напрежението върху буферния кондензатор и на изхода на преобразувателя за: а) – целия период; б) – момента на активиране на изхода

Цялостната структура, начин на функциониране и настройване са дадени в дисертационния труд. Моделът е имплементиран в симулационна среда MATLAB. Извършено е симулационно изследване и резултатите са дадени на Фиг. 4.5. Анализирано е времето за първоначално и следващо активиране на изходния преобразувател. Извършено е експериментално изследване, чрез което е верифициран предложеният модел. Резултатите са представени в текущата глава и в приложение.

Измервателни системи, използващи ПП елементи

Анализирани са измервателни системи, включващи в структурата си ПП елементи и маломощните безжични комуникационни интерфейси, подходящи за такъв тип системи. Предложено и дискутирано е решение за съвместно използване на ПП елемент като източник на енергия и активен сензор (Фиг. 4.6). Разгледани са основните типове измервателни преобразуватели за ПП елементи и са изведени предавателните им характеристики в зависимост от силата и резултантната линейна деформация на елемента. Предложена и анализирана е принципна схема на подобрен инструментален зарядо-чувствителен усилвател.



Фиг. 4.6: Блокова схема на измервателна система със споделено използване на ПП елемент като активен сензор и източник на енергия

Дискутирани са изискванията към операционните усилватели и останалите градивни елементи. Извършено е експериментално изследване на напреженови и зарядо-чувствителни усилватели за ПП елементи. Резултатите са коментирани.

Обобщения и изводи

1. Анализирани са електро-механичните характеристики на ПП елементи при приложение в добиването на енергия от различни видове механични въздействия;
2. Предложени са съвременни интелигентни решения за получаване на енергия от ПП елементи за безбатерийно хранване на маломощни консуматори и безжични сензори;
3. Създаден и верифициран е модел за изследване на поведението на преобразувател за добиване на енергия от ПП елементи при различни направления на прилагане и видове механични въздействия;
4. Представени са решения за съвместното (споделено) използване на ПП елементи като сензори и източници за получаване на енергия;
5. Анализирани са подходи за междинно съхраняване на енергията в буферен кондензатор и последващо прехвърляне в батерия;
6. Предложена е топология на зарядо-чувствителен измервателен усилвател за ПП сензорни елементи;
7. Направено е експериментално сравнение между характеристиките на напреженовите и зарядо-чувствителните измервателни преобразуватели, като вторите предлагат по-добра резолюция на детайлите във формата на изходното напрежение, когато то е с богат хармоничен състав;
8. ПП елементи генерират по-голямо количество заряд за единица време в комбинация с токоизправител при дадено механично въздействие, когато зареждания буферен кондензатор е с по-малка стойност на капацитета и с положително начално напрежение;
9. Поради ниската ефективност на ПП елементите при преобразуване на механична в електрическа енергия е удачно осигуряване на хранване на маломощни електронни устройства за краен период от време, след като предварително е натрупано определено количество енергия в буферен кондензатор;
10. Количеството енергия, налична за хранване на маломощни електронни устройства, зависи, както от капацитета на буферния кондензатор, така и от хистерезисния цикъл на блока за управление на импулсния стабилизатор на напрежение;
11. ПП елементите са подходящи за хранване на маломощни безжични системи за събиране на данни, разположени до източници на вибрации, променливи механични сили или налягане.

Основни изводи и предложения за практиката

В дисертационния труд са създадени и изследвани специфични модели на ПП елементи, използвани като източник на енергия и като товар в електрическа верига, чрез които могат да бъдат определяни честотно зависимите диелектрични параметри на материала. Предложени са модели на ПП трансформатори, които са мощен инструмент за прецизно симулационно изследване на добиването и преноса на енергия през различни биологични и небологични среди. Моделите могат да бъдат използвани за оценка на потенциала и за проектиране на едно- и многослойни ПП трансформатори, включително и при специфични медицински приложения, а параметрите им да бъдат определени чрез специализирана методика.

Разработени, изследвани и сравнени са ПП трансформатори, чиито конструкции са визуализирани чрез триизмерни диаграми. Те са механично устойчиви и пластични, и могат да бъдат произвеждани в различни по форма и обем конструкции с относително малка дебелина. ПП трансформатори имат относително ниска ефективност в сравнение с пиезокерамичните, която е ограничена от текущите характеристики на материала. Въпреки това те са подходящи за специфични медицински приложения, където ефективността не е основен фактор за сметка на приложимостта. С цел подобряване на характеристиките и използването на материала е предложен само-осцилиращ драйвер, който може да управлява силови преобразуватели и с помощта на нова елементна база да захранва пиезотрансформатори с честоти над 10 MHz.

ПП елементи като източник на енергия са подходящи за захранване на маломощни безжични системи за събиране на данни, разположени до източници на вибрации, променливи механични сили или налягане. Поради ниската ефективност на материала е удачно осигуряването на захранване за краен период от време, след като предварително е натрупано определено количество енергия в буферен кондензатор. За изследване на поведението на преобразувателя за добиване на енергия от ПП елементи е създаден прецизен модел, включващ различни направления на прилагане и видове механични въздействия.

Приноси по дисертационния труд

1. Създадени и верифицирани са специфични модели на PVDF елементи като източници за получаване и преобразуване на енергия като част от различни конструкции и системи.
2. Предложен е подход (методика) за изчисляване на специфичните моделни параметри на PVDF елементите като източници за получаване и преобразуване на енергия.
3. Предложени и анализирани са електронни схемни решения и техните модели на първични захранващи преобразуватели за захранване на пиезополимерни трансформатори. Създаден е нов специализиран високочестотен драйвер за

- управление на силови полеви транзистори, използвани в резонансни силови импулсни преобразуватели.
4. Разработени и изследвани са нови пиезополимерни електро-акустични трансформатори за преобразуване на енергия. Предложено и обосновано е ново специфично приложение в медицинската електроника.
 5. Предложени са съвременни интелигентни решения за получаване на енергия от PVDF елементи за батерийно храняване на маломощни консуматори и безжични сензори.
 6. Предложен е модел за симулиране и анализиране на поведението и взаимодействието с товара на преобразувател за добиване на енергия от пиезополимерни елементи при различни направления на прилагане на механичното въздействие.
 7. Предложени и анализирани са решения за споделено използване на PVDF елементите като сензори и източници за получаване на енергия.

Публикации по дисертационния труд

- [П.1] **Stanchev O.**, A. Marinov, E. Bekov. Comparison of piezoelectric transducers for wideband pulse-echo medical imaging, Списание Акустика, Издателство: Съюз по електроника, електротехника и съобщения, ISSN 1312-4897, стр. 106 -109, 2014 г.
- [П.2] **Stanchev O.** Simulation Model of PVDF Piezoelectric Transformer for Medical Applications, Annual Journal of Electronics, Volume 9, ISSN 1314-0078, p. 30-33, Technical University of Sofia, Sofia, 2015
- [П.3] Marinov A., **O. Stanchev**, P. Yankov. Development of a specialized power supply for a pulser/receiver block for ultrasound transducers”, Годишник на ТУ-Варна, 2015 г., ISSN: 1311-896X
- [П.4] **Stanchev O.**, A. Van den Bossche, E. Bekov. Self-oscillating gate driver used for gallium nitride transistors in high frequency applications, XIX International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, 29 May – 1 June 2016, Bourgas, Bulgaria, Proceedings of digests, ISBN 978-619-160-648-1- реферирана в б. д. „Scopus“
- [П.5] **Stanchev O.**, A. Marinov, E. Bekov. Experimental analysis of energy transfer of piezoelectric polymer transformers, XIX International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2016, 29 May – 1 June 2016, Bourgas, Bulgaria, Proceedings of digests, ISBN 978-619-160-648-1- реферирана в б. д. „Scopus“
- [П.6] **Stanchev O.**, A. Marinov, E. Bekov. Model of Piezoelectric Polymer Energy Harvesting System”, TEM Journal 2016 – приета за печат
- [П.7] Marinov A., **O. Stanchev**, E. Bekov. Application of charge amplifiers with Polyvinylidene Fluoride materials, International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics - MiPro 2014, Opatija, Croatia, MiPro Proceedings, ISBN 978-953-233-078-6 – реферирана в б. д. „Scopus“

Abstract

PhD Thesis Title: Investigation of piezo polymer materials as energy sources

Of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy

By: Orlin Plamenov Stanchev

The dissertation examines and analyzes the piezopolymer materials as sources of electrical energy. They are used for energy harvesting and energy transfer. The analysis in Chapter 1 focuses on the properties and characteristics of the piezopolymer materials and especially the PVDF material and its co-polymers. Specific interface circuits and new semiconductor materials are introduced. In Chapter 2 models of piezopolymer elements and transformers are proposed and described in details. The models are implemented in simulation environment and experimentally verified. A methodology for designing the presented models is created. In Chapter 3 an energy transfer approach is proposed using piezopolymer transformers. Different power supply converters are discussed. A high frequency resonant power transistor driver is proposed. Several piezopolymer transformer constructions are examined. Chapter 4 focuses on energy harvesting from piezopolymer elements and powering low power electronic devices. Energy harvesting system is discussed and modeled. The piezopolymer elements are used as energy sources and sensors.

Резюме по диссертации

Тема: Исследование пиезо полимерных материалов в качестве источников энергии
Для присуждения образовательной и научной степени „доктор“

Аспирант: инж. Станчев Орлин Пламенов

В диссертации рассматриваются и анализируются полимерных материалов в качестве источников электрической энергии. Они используются для сбора и передачи энергии. Анализ, проведенный в Главе 1 фокусируется на свойствах и характеристиках полимерных материалов и прежде всего материала PVDF и его кополимеров. Представлены конкретные схемы интерфейса и новые полупроводниковые материалы. В главе 2 предложены и подробно описаны модели полимерных элементов и трансформаторов. Модели реализованы в среде моделирования и проверены экспериментально. Создана методология для проектирования представленных моделей. В главе 3 предлагается подход для переноса энергии с использованием полимерных трансформаторов. Обсуждаются различные силовые преобразователи питания. Предложен драйвер резонансного силового транзистора высокой частоты. Рассматриваются несколько конструкции пиезопolyмерных трансформаторах. Глава 4 сосредоточена на извлечении энергии из полимерных элементов и питание электронных устройств с низким энергопотреблением. Обсуждены и моделированы системы для сбора энергии. Здесь элементы полимерных используются в качестве датчиков и источников энергии.