

## PIEZOELECTRIC TECHNOLOGIES EVOLUTION AT THE DEPARTMENT OF ELECTRONICS IN TU–GABROVO

**Stefan Milchev, Velimira Todorova\*, Nikolay Madjarov**

*Technical University of Gabrovo, 4 Hadji Dimitar Str., Gabrovo, Bulgaria;*

*\* Corresponding author: vili@tugab.bg*

### Abstract

*The article reviews the development of piezoelectric technologies within more than 50 years in the Department of Electronics from TU-Gabrovo. Results from theoretical and experimental researches that were aggregated in the field of piezoelectrics from the different scientific teams are presented.*

**Keywords:** piezoelectric, technologies; department; development.

### ВЪВЕДЕНИЕ

В средата на 50-те години на миналия век в катедра „Електроника“ на ТУ – Габрово, според учебния план, започна обучение на студентите по специализация „Микро-електроника“. Особено ползотворно, както за учебния, така и за научно-изследователския процес, беше сътрудничеството в тази област с Киевския политехнически институт. Водещи бяха катедрите по Изчислителна техника и Диелектрици и полупроводници. Приоритетна се оказа помощта на член. кор. проф. К.Г. Самофалов, ръководител катедра Изчислителна техника, който предложи сключването на научно-технически договор между катедра ИТ – КПИ - Киев и „Електроника“ на ТУ – Габрово в областта на използването на сегнетопиезо-електричните материали като среда за съхранение на информацията. Тази тематика беше нова за катедра „Електроника“ и за нашата страна и това наложи изграждането на колектив от специалисти, които за кратко време навлязоха в тази област и станаха равностойни партньори с учените от Киев. Част от новосформирания колектив от катедрата премина краткосрочни и дългосрочни специализации в катедрата по Изчислителна техника на КПИ – Киев и създадената необходима материално-техническа лабораторна база за експериментални изследвания. По същество създадената база даваше възможност за

направата на хибридни експериментални образци. Това послужи и като основа за обучението на студентите по новата специализация по Микроелектроника.

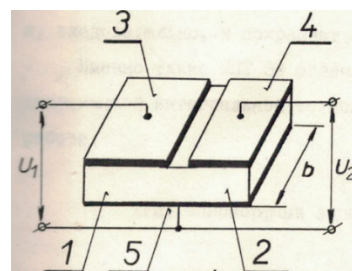
Работата със сегнетопиезоелектрични материали създаде условия за развитие на специфичната и актуална за онова време функционална микроелектроника.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Резултатите от многогодишните изследвания в областта на пиезоелектричните технологии имат най-съществен принос за теорията и практиката в следните направления.

#### А. Запомнящи устройства на сегнетопиезоелектрична основа

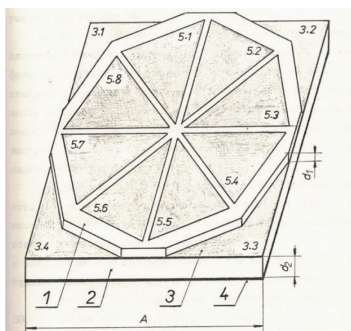
Основният функционален елемент при този тип запомнящи матрици и устройства е базиран на широколентовия пиезоелектричен трансформатор /ШПТ/ от напречно-напречен тип и е с мономорфна конструкция (фиг. 1).



**Фиг. 1.** Широколентов пиезоелектричен трансформатор /ШПТ/ от мономорфен тип

Общата секция на трансформатора служи като подложка на запомнящи елемент, респ. на цялата запомняща матрица. Като правило той е с по-голяма дебелина и е постоянно напречно поляризиран в едната или другата посока.

Една от секциите на пьезотрансформатора е входна 1 и в режим „запис“ на информацията тя се поляризира напречно в едното или другото направление, което съответства на биполярната информационна единица или нула. Изходната секция на пьезотрансформатора 2 е постоянно поляризирана в едно от двете направления и служи за четене на информацията, записана във входната секция. Принципът на четене на информацията от този тип запомняща клетка е основан на правия и обратния пьезоефекти. При подаване на входящ електрически импулс между входната и общата секции електрическата енергия се преобразува в механична, т.е. възникват механични колебания, които в изходната секция се генерира електрически сигнал, чиято амплитуда е ориентирана в положителна или отрицателна посока в зависимост от посоката на поляризация на входната секция, т.е. от записания сигнал [1].



**Фиг. 2.** Конструкция на биморфна запомняща матрица

Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал.

Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал. Технологично развитие на пьезоелектричните запомнящи елементи и матрици е създаването на биморфна запомняща матрица с цел намаляване за електрическия сигнал в режим „запис“ на информация (фиг. 2).

Хибридните технологии, които бяха разработени в лабораториите на КПИ – Киев и ТУ – Габрово, позволяваха да бъдат изпълнени условията за стандартните нива на логическите сигнали, обработвани по биполярната или MOS технологии.

Основните предимства на този тип запомнящи клетки и устройства е, че те:

- 1) съхраняват записаната информация при изключено захранване в течение на няколко години (поляризираното състояние на сегнетоелектричните материали е устойчиво);
- 2) презаписът на информацията се осъществява по чисто електрически път, което за нивото на запомнящата техника в онези години беше уникално по своя характер;
- 3) горните две предимства даваха възможност за реализацията на EEPROM запомнящи устройства;
- 4) сегнетопьезоелектричните материали и тяхното използване като запомняща среда Реализацията на този тип запомнящи клетки има своите особености, тъй като дебелината на входните и изходните секции еднозначно определя необходимата енергия за поляризация, т.е. електрическите параметри на входния и изходния информационен сигнал. гарантират изключителна надеждност на съхраняваната информация, тъй като тя не се влияе от външни електрически и магнитни полета.

Изброените предимства на този тип запомнящи клетки и матрици създадоха

възможност за реализация на устройства и системи, намиращи специализирани предназначения. Разработените сегнето-пиезоелектрични запомнящи устройства намериха приложение при реализацията на технически проект „Електронен електромер“, който също беше предмет на съвместна работа между лабораториите на катедра „Електроника на ТУ – Габрово и КПИ – Киев.

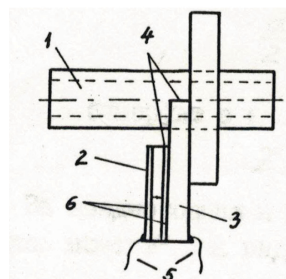
### **Б. Пиезоелектрични сензори за устройства и системи в текстилната промишленост**

Натрупаният опит в теорията и изучаването на физическите процеси в пиезоелектричните материали даде възможност на научно-изследователския колектив да разработи и други специфични приложения по създаване на специализирани сензори. Пиезоелектричните преобразуватели от генераторен тип, които се отличават с малка енергия на взаимодействие при отлично съчетания на техните експлоатационни и икономически показатели, създадоха възможност за приложение в различни области на текстилната промишленост. Принципът на преобразуване на механичната енергия в електрическа намери своята конкретна реализация със създаването на сензор, който следи непрекъснатостта на полагане на текстилни нишки в различни текстилни механизми и машини. Особено голямо приложение намери пиезоелектричният сензор от генераторен тип за следене непрекъснатото полагане на вътъчната нишка при безсовалковите тъкачни станове. В конструктивно отношение това са биморфни елементи, в които под въздействие на движещата се нишка се появяват трептения на огъване.

На фиг. 3 е показана конструкцията на такъв първичен сензор, състоящ се от нишководач 1, към който е закрепен чувствителен нееднороден биморф, съставен от пиезоелемент 2, изготвен от пиезочерамика тип ПКМ-05, и метал – месингов елемент 3. Биморфът е получен чрез залепване с диелектрично лепило 4.

От двете страни на биморфа са изведени електрически изводи 5. Тази кон-

струкция, чрез демпфер от микропореста гума, използван за намаляване влиянието на вибрациите на текстилната машина, е поместена в алуминиев корпус, който служи като електростатичен екран.



*Фиг. 3. Конструкция на пиезоелектричният сензор за следене полагане на вътъчната нишка при безсовалковите тъкачни станове*

Създаденият пиезоелектричен сензор [2] послужи при разработката на електронно устройство за управление на процесите при полагането на вътъчната нишка. Колективът от специалисти, работещ в това направление, реализира редица проекти и чрез конкретни договори бяха внедрени в редица текстилни предприятия в България и чужбина така наречените устройства „Електронни вътъкоспирачи“. Така например, чрез Центъра по електронизация към леката промишленост бяха произведени и продадени в Русия 250 електронни устройства от този тип.

На базата на различните варианти на това устройство беше предложена и разработена микропроцесорна система за управление на тъкачните станове.

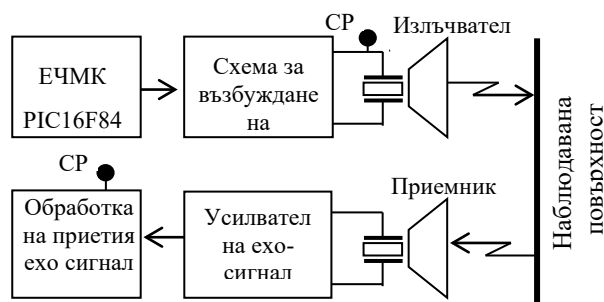
### **В. Пиезоелектрични ултразвукови сензори за интелигентни системи при реализирането на класификатори на вещества, материали и процеси**

Един от възможните методи за изследване на вещества и среди се базира на модифициране параметрите на ултразвукова вълна при преминаването ѝ през и отражението ѝ от материална среда (обекта за изследване).

При преминаването през дадена среда ултразвукът намалява своя интензитет, което води до неговото отслабване. Това се дължи на феномени като разсейване,

абсорбция, отражение, пречупване и лъчева дивергенция. Абсорбцията на ултразвуковата енергия от средата, в която ултразвукът се разпространява, зависи от характеристиките на тази среда (еластичност и плътност), както и от честотата на използвания ултразвук. Вследствие на това ултразвуковият сигнал се модифицира и носи информация за характеристиките на средата между излъчвателя и приемника.

На фиг. 4 е представено устройство за приложение на ултразвукови пиезоелектрични сензори, основаващо се на избрания ехолокационен принцип, базиран на ефекта на отражение, разработено от част от работния колектив.



Фиг. 4. Блокова схема на устройството за определяне на коефициента на

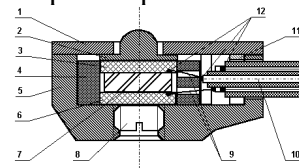
С цел избор на отличителни характеристики на различни физични среди и материали за тяхното разпознаване (идентифициране) след анализ на дискретизирания отразен ултразвуков сигнал във времевата и четотната област (СР2-контролна точка 2), също се прилага този принцип. Необходимо е определянето на отличителните характеристики на различни физични среди. Най-често те се получават след анализ във времевата или честотната област на отразения от материала ултразвуков сигнал с честота между 20 kHz и 10 MHz [3].

### Г. Тактилни пиезоелектрични сензори и матрици

Този актуален раздел на сензорната техника е в основата на средствата за очувствяване на работи, автоматиката, автомобилостроенето и медицинското оборудване. Тактилното очувствяване

като елемент на изкуствения интелект е основа на съвременните информационни технологии. Понятието „тактилно усещане“ според Harmon се дефинира като регистриране и преобразуване на сили в границите (0,5 - 5) N в мястото на контакт на сензора с очувствявания обект.

Преобразувателите на тактилна информация се използват както в системите за поточковото ѝ въвеждане, така и в тези за разпознаване на сложни дву- и тримерни образи в робототехниката.

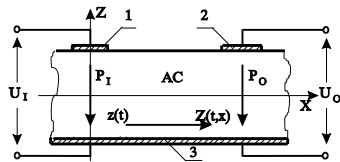


Фиг. 5. Конструкция на пиезотактилен дискретен резонансен сензор

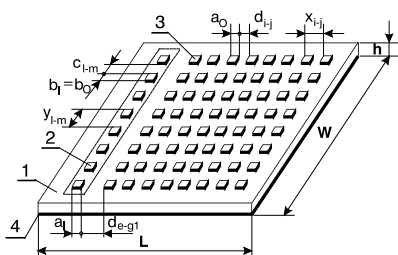
Като сензорни приложения пиезоелектричните среди могат да бъдат използвани както като дискретни (единични) елементи, така и под формата на матрични такива. Работният колектив е участвал в разработката на дискретни пиезоелектрични сензори от резонансен тип за детекция на въздействащ обект или за оценка на приложеното външно усилие [5].

В резултат на тенденциите в развитието на средствата за събиране и обработка на информация чрез тактилно очувствяване и особено за разпознаване на тактилни образи се налага използването на сензори от матричен тип. За реализация на матрична структура са използвани няколко подхода: матрица, формирана на базата на дискретни пиезоелектрични елементи и функционални матрици, елементите на които се формират от проявленията на физични процеси в пиезоелектричната среда. Вторият тип матрици могат да бъдат резонансни и нерезонансни. При нерезонансните матрици активните елементи се обособяват в обща пиезоелектрична подложка с помощта на акустични вълни – повърхностни или обемни. Прототип на такава матрица е създадена от работния колектив на базата на пиезоелектричен трансформатор с бягаща обемна акустична вълна като

информационен носител (фиг. 6), като са създадени различни конструкции на матрици в зависимост от начина на възбуждане на вълната и четенето на информацията (фиг. 7).



Фиг. 6. Процеси в ПЕТ с БОАВ като информационен носител

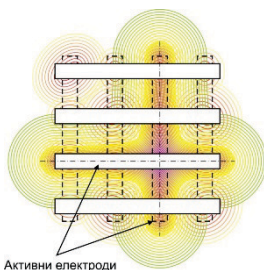


1- пиезоелектрична подложка; 2 – възбудителен електрод; 3 – генераторен електрод; 4 – общ електрод

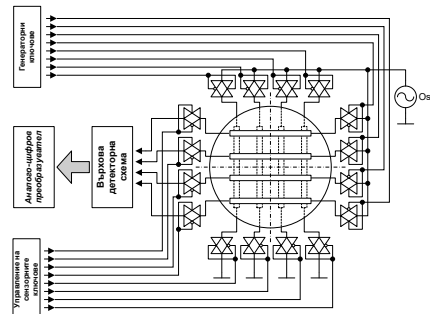
Фиг. 7. Тактилна матрица със секционирани възбудителен електрод

За увеличаване на функционалните възможности бяха създадени матрични полета и съответните интерфейси за възбуждане и четене на информацията [5].

Вторият тип разработени от колектива пиезоелектрични матрици са от резонансен тип, като при тях активните елементи се формират чрез специфична система от електроди върху обща пиезоелектрична подложка. В матриците се създава обемна стояща вълна, като външните въздействия водят до промяна на вълновия профил, което носи информация за формата, големината и усилието от страна на външен обект (Фиг. 8) [6].



Фиг. 8. Разпределение на идеална стояща вълна в пиезоелектричния материал за дадена конфигурация резонансна пиезоматрица



Фиг. 9. Интерфейсна схема на резонансна пиезоматрица с използване на амплитуден метод на сканиране

Един от разработените от работния колектив варианти на резонансна пиезоматрица и интерфейсната ѝ схема с използване на амплитуден метод на сканиране на матрицата е представена на фиг.9 [6].

Разработените и изследвани тактилни сензори и матрици се явиха обект на няколко научно-изследователски проекта, 3 дисертационни труда и много на брой дипломни работи.

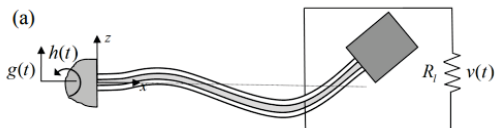
#### Д. Маломощни източници на електрическа енергия (Energy Harvesters)

Нарастващата нужда от ресурси и влошаващата се екологична обстановка определят търсенето на алтернативни технологии и възобновяеми ресурси, особено в сферата на енергодобива, където усилено се разработват методи за откриване и експлоатиране на алтернативни източници на електрическа енергия.

Във връзка с това част от работния колектив създаде прототипи на маломощни източници на електрическа енергия на основата на пиезоелектрични среди. Разработени са енергийни източници от двата типа – вибрационен и компресионен.

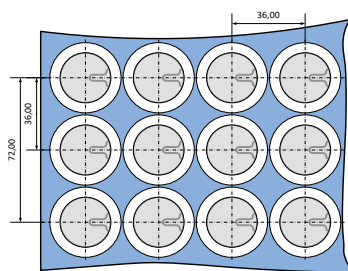
Вибрационните пиезохарвестери са комплексни гредови конструкции с различна степен на свобода в двата края, реализирани с един или няколко пиезоелектрични активни слоя [7]. Те са предназначени за използване на енергията от външни механични въздействия, които имат силно изразена повтораемост във времето, т.е. имат почти изцяло динамична природа.





Фиг. 3.10. Биморфна структура, подложена на деформация

Вибрационните ЕН (фиг. 10) се описват чрез чисто динамични модели по отношение на времевата област, за разлика от другия вид - компресионните, които се представят едновременно със статични и динамични модели. Поради това те нямат обща конструкционна концепция, което води до голямо разнообразие на конструктивни решения. Разработен е плосък матричен компресионен харвестер за събиране на енергия от пешеходци и транспортни средства на базата на дискретни пиезоелектрични елементи. (фиг.11).



Фиг. 3.11. Разпределение на активните елементи в един от вариантите на компресионния харвестер

На фиг. 3.13 е представена експерименталната установка за изследване на прототипи компресионни пиезоелектрични харвестери за събиране на енергия от пешеходци.

Работният колектив активно продължава изследванията в областта на пиезоелектричните маломощни източници на електрическа енергия (Energy Harvesters), което се потвърждава от успешната защита на две дисертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всички изследвания през близо 50-годишния период бяха докладвани и защитени успешно с 12 дисертационни работи и повече от 120 научни публикации, докладвани на конференции и публикувани в списания в страната и чуж-

бина. Огромен беше приносът и за учебния процес в катедра „Електроника“ в областта на микроелектрониката и сензориката с успешно защитени и високо оценени дипломни проекти.

Резултатите от развитието на научно-то направление, свързано с пиезоелектричните технологии, допринесе за издигането на авторитета на ТУ – Габрово като образователен и научен център.

*Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hristov S. M. *Specialized Segneto-piezoelectric Memory Devices*. PhD Thesis, Kiev, 1984
- [2] Todorov P., S. M. Hristov, V. Todorova. *Electronic Weft Stopper for Textile Looms*. Symposium "Physics and Electronization", Plovdiv, 1979.
- [3] Ivanov R. *Digital processing of one-dimensional signals*. Gabrovo, Alma Mater International, 1999, 207 p.
- [4] Skopalik E. L., P. Todorov, V. Todorova. *Constructions and research of resonant type tactile piezoelectric transducers*. SACOM, Gabrovo, 1982, p. 125 – 131
- [5] Todorova V. *Research and development of tactile ferro-piezoelectric array sensors*. Author abstract for PhD Thesis, Gabrovo, 1998, p. 34
- [6] Kolev D. *Development and research of a resonance-type array piezoelectric tactile sensor*. Author abstract for PhD Thesis, Gabrovo, 2018, p. 40.
- [7] Stoyanova R., Kolev D., Todorova V., „Determining the Suitability of Measurement Circuits for Piezoelectric Vibrational Harvesters“, XXXI International Scientific Conference ET, Sozopol, 2022., ISBN 978-1-6654-9878-4
- [8] Kolev D., S. Kamenovq, V. Todorova. *Possible usage of complex piezoelectric structures in dual purpose mode*. 12<sup>th</sup> Conference "ELECTRONICA 2021", May 27 - 28, 2021, Sofia.