

НОВИ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА СЕНЗОРНИ ЕЛЕМЕНТИ

Венцислав Симонов^{1*}, Тания Титова-Костуркова²

Университет по хранителни технологии, бул. Марица 26, Пловдив, България

²Технически университет – София – филиал Пловдив, Цанко Дюстabanов 26, Пловдив, България

**кореспондиращ автор: v_simonov@uft-plovdiv.bg*

NEW MATERIAL AND TECHNOLOGIES IN SENSOR ELEMENTS BUILDING

Ventsislav Simonov^{1*}, Tanya Titova-Kosturkova²

¹University of Food Technologies, 26 Maritsa blvd., Plovdiv, Bulgaria

²Technical University of Sofia – Plovdiv branch, 26 Tsanko Dyustabanov, Plovdiv, Bulgaria

**Corresponding author: v_simonov@uft-plovdiv.bg*

Abstract

This publication reviews the latest development in materials and technologies used to build sensor elements. It covers some main types of sensors that are most widely used in automation and data collection for automatic and other measurement systems. The review of the publications is summarized as brief information regarding technologies, materials, methods, and achieved results and improvements from the proposed innovations. Attention is paid to some sensors with improved static and dynamic characteristics. A summary is made of the directions of development in the field.

Keywords: Sensors, Materials, Modeling, Design, Characteristics

ВЪВЕДЕНИЕ

Метрологичните показатели на всеки сензор са основен критерии при избор на даден инструмент, при изграждане на измервателна система, като част от блокове за снемане информация или системи за автоматично управление. От съществено значение са предавателните функции, обхватите на измерване, точността на измерване, хистерезисът, повторемостта на измерванията, нелинейността и др. В литературата не липсват примери за реализирани съществени подобрения на тези показатели. В проучване на характеристиките на пиезоелектрични керамични сензори за употреба в микро

електромеханични системи (MEMS), G. Chen и колектив [1] изследват влиянието върху точността на откриване на хистерезисната нелинейност на пиезоелектричните керамични сензори в микро измервателните системи. Анализира се механизма на микро поляризация на пиезоелектричната керамика и се обяснява причината за хистерезисната нелинейност на пиезоелектричните керамични сензори. Създаден е подобрен модел на Bouc-Wen [2], който може да отразява характеристиките на асиметричния хистерезис на пиезоелектричните керамични сензори, за да компенсира ефективно нелинейността на хистерезиса на пиезо-

електричните керамични сензори и да подобри точността на откриване. В изследване на G. Hussain и колектив [3] се проучват ефектите от поява на хистерезис при този вид сензорни елементи и предлагат интелигентен метод за намаляването на нежеланите ефекти от него, чрез изработка и изследване на сензори от тип с един слой до тип с 12 слоя, като входна величина е механична сила, а изходната е електрическо съпротивление. Съществуват множество примери за изследване и подобряване на линейността на различни типове сензори. При изследване на нов вид капацитивни меки еластомерни сензори за деформация Н. Saleem и колектив [4] наблюдават значително подобрене на линейността и резултантната стойност на средно квадратичната грешка, в зависимост от честотата на стимулация. При изследване динамиката на пиезоелектрични ултразвукови преобразуватели базирани на цинков оксид N. Aroga и колектив [5] откриват различни нелинейни характеристики, които са крайно нежелателни при изграждането на микро електромеханични системи. Пример за влиянието на динамичните характеристики на сензор, вграден в съставна измервателна система може да се разгледа в разработката на активна компенсация на динамичните грешки в координатна измервателна машина (СММ) предложена от A. Kesk и колектив [6], които изследват динамичните процеси и изследват техните отрицателни ефекти върху измерените стойности, след което предлагат компенсационна система за намаляване на предизвиканите грешки.

ПРЕГЛЕД

Сензори за налягане

В практиката се използват различни типове сензори за измерване на налягане, като живачни сензори, пиезорезистивни (тензосензори) и др. Пиезорезистивните сензори за налягане са широко разпространени в индустрията. Изработват се от полупроводников материал.

Електрическо му съпротивлението варира значително при компресиране или разтягане. Ефектът често се използва при тензосензорите. Използва се и в полупроводникови сензори за налягане с диафрагма и при акселерометрите. G. Langfelder [7] и колектив изследват нови материали, позволяващи значително намаляване на грешките от нелинейност в диапазон на измерване до 2.3GPa. Съвременните разработки, показват развитие по отношение намаляване на нежелани ефекти, като грешки от приплъзване и хистерезис. Пример е изследването на сензори с висока степен на огъване и свръх-нисък хистерезис, предназначени за употреба в гъвкави машини, където се постигат грешки под 1.5% представено от Z. Shen и колектив [8]. Друг пример е реализацията на сензори с нулев хистерезис чрез принтиране на въглеродни нано тръби, което се демонстрира от Michelis, F и екип [9].

В практиката се използват различни подходи за елиминиране на грешката, породена в следствие на изменение на температурата, посредством температурна компенсация. В публикация представена от Z. Jin и колектив [10] е предложен метод за получаване на температурните криви на различни материали чрез използване на термостати с двойни температури за провеждане на експерименти за температурно калибриране. Използван е метод на линейна регресия, за да се получи линейна формула за съпоставяне на съпротивлението съответстващо на всяка температура.

Чрез 3D принтиране на материал съставен от полилактична киселина (PLA) с добавени въглеродни нано-тръби, са постигнати съществени подобрения в температурните характеристики на сензорите от този тип. Това може да се види в публикация на A.M.L. Lanzolla и колектив [11]. Оценена е корелацията между приложената сила и промяната на електрическото съпротивление на триизмерен отпечатан сензор и е разработен подход за температурна компенсация. Ре-

зултатите показват, че температурата и хистерезисът влияят върху повторемостта. Въпреки това сензорът точно открива импулсни сили в диапазона от 10 g до 50 g. Демонстрира се висока линейност и чувствителност от $0,077 \Omega \text{ g}^{-1}$ и $12,54 \Omega \text{ mm}^{-1}$ в диапазона на сила и изместване съответно от 114 g и 0,7 mm.

Сензори за влажност

Сензорите за влажност, известни също като хигрометри, са основни устройства, използвани за измерване и наблюдение на съдържанието на влага във въздуха. Тук най-често са включени оптичните сензори за влажност, работещи на принципа на охладеното огледало, както и тяхната алтернатива – сензори от вибрационен тип.

Друг широко използват тип сензори са тези, базирани на LiCl и работещи на принципа на измерване на промените в характеристиките на водопоглъщане и десорбция като функция от околната влажност. Разтворът може да е включен като съдържание на порести полимерни микросфери, което повишава съществено характеристиките измерванията, което е демонстрирано от K. Jiang и колектив [12]. Възможно е, разтворът да бъде и под формата на хигроскопичен гел. L. Hengyi [13] и екип показват проучване на употребата на такова приложение. Разработен е полиакриламиден хидрогел (PAM), смесен с LiCl, за да се подобри поемането на вода и да се намали енергията, необходима за отделянето ѝ. Подчертава се взаимодействието между хидрогелната мрежа и водните молекули.

Импедансните сензори за влажност, измерват нивата във въздуха чрез оценка на промените в електрическия импеданс на чувствителен към влага материал или кондензатор. Материалът може да бъде хигроскопичен полимер, керамика или друг друг, който абсорбира водни пари от околната среда. Електродите се нанасят върху стъклен или керамичен субстрат, посредством тънкослойна технология (thin-film) технология. Съществува

и технология на нанасяне от тип дебел слой (thick-film). Двата основни типа са резистивните и капацитивните импедансни сензори. Изразен проблем при тях е относително високата степен на нелинейност. При някои особени конструкции на този тип сензори, обаче, може да се наблюдава и сравнително добра линейност, както по отношение на влажността, така и по отношение на температурата. Като пример, може да се посочи резистивен сензор с елемент предложен от N. Narun [13]. Изработен е от пластифициран полимер, положен върху стъклен субстрат. Наблюдава се висок коефициент на корелация между величините - R^2 между 0,9911 и 0,9775 в диапазона на работни честоти между 100Hz и 10 kHz.

Друг основен недостатък, особено ясно изразен при капацитивните сензори е хистерезисът. Той може да бъде причинен от деформация на полимерите от водни групи и следователно да повлияе на работата на преобразувателя. С цел намаляване на хистерезиса на полиамиден сензор за влажност, H. Lee и колектив [14] предлагат тип с модифицирана структура на чувствителния елемент и диелектричен слой, произведен от чрез обработка с кислородна плазма върху полиамидна повърхност. Сензорът показва бързодействие и чувствителност съответно от 11 s и $0,08 \text{ pF}/\% \text{RH}$. В сравнение с обикновения плосък филм, те са подобрени съответно около 2,5 пъти и 8 пъти. Освен това интегрирането на микронагревател в ефективната зона води до намаляване на хистерезиса на диелектричната мембрана. L. Gu и колектив [15] предлагат алтернатива, базирана на използването на метални оксиди. Високо чувствителни капацитивни тънкослойни сензори за влажност базирани на нанокомпозитна структура от ZnO и TiO_2 са произведени върху стъклени субстрати. В сравнение със сензори, базирани на индивидуални ZnO и TiO_2 , нанокомпозитните сензори показват значително повишена чувствителност при 95% от-

носителна влажност (31 и 1380 пъти по-високи от ZnO масиви от нано тръби и тънки филми TiO₂, съответно).

Сензори за измерване и отчитане на преместване (позиционни сензори)

От съществено значение за всяка автоматизирана система за управление е възможността, с висока точност да бъде определено положението на обектите, както и тяхното преместване в пространството. Тук най-често се реализират сензори от потенциометричен или капацитивен тип. От своя страна сензор от капацитивен тип може да бъде по един три основни начина – еднополярни, балансирани (диференциални) или мостови. Пример за реализация на еднополярен тип сензор с високи параметри може да се види в представения от T. Zeng и колектив [16], сензор за измерване. Предлага се капацитивен сензор за отчитане отклонението по вертикалното движение със структура, състояща се от дълга статична пластина от силициева нишка неподвижна плоча с цилиндрична повърхност. Резултатите показват, че разрешаващата способност на сензора е по-добра от 0,05 μm , кратковременната стабилност е около 0,1 μm . Y. Bai и колектив [17] представят реализация на прост диференциален сензор за измерване на абсолютните позиции в системи за измерване на дължина. Чрез използване на екраниращ прозорец вътре в диференциалния кондензатор обхватът на измерване и диапазонът на линейност на сензора могат да достигнат няколко милиметра. Сензорът е чувствителен само към движение на една транслационна степен на свобода, т.е. той практически не се влияе от вибрации действащи по другите направления на движение. Има чувствителност от 2×10^{-4} pF/ μm с разрешаваща способност 0,08 μm . Диапазонът на измерване е 6 mm, а грешката на линейността е по-малка от 0,01% за целия диапазон на измерване на абсолютна позиция. G. Ferri и колектив [18] показват употреба на модифицирано мостово

свързване. Мостът е изграден от два диференциални кондензаторни сензора и два резистора един от които е променлив от тип резистор управляван по напрежение, а мостът е от импедансен тип. Променливият резистор, е включен в контур на обратна връзка и осигурява непрекъснатото балансиране на моста.

Други често срещани реализации са базирани на **елементи на Хол**. За функционирането им е необходимо елементът на Хол да си взаимодейства с постоянното магнитно поле, създадено от постоянни магнити или ферромагнитни елементи. M. Raup [19][20] и екип изследват влиянието на различните геометрии на сензори върху ефекта на Хол, чрез съотношението L/W на елементите на Хол и геометричен корекционен коефициент G. Няколко показателя за ефективност по отношение на сензорите на Хол се анализират, а именно чувствителността, напрежението на Хол и мощността, разсейвана в рамките на устройство. Експерименталните стойности за параметрите са дадени за осем различни геометрии, интегрирани в CMOS технологията, използващи определени токове на отклонение. Изследвано и поведението на различни видове геометрии и са изведени данни по отношение на изходно напрежение, чувствителност, офсет и температурни отклонения. C. Wouters и колектив [21] предлагат нов тип конфигурация на сензор на Хол с три оси в малък активен обем. Предложения сензор е реализиран в обем от 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$. Благодарение на своята конфигурация, той се справя с настоящите ограничения на триосния сензор на Хол: осигурява висока пространствена разделителна способност от 30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ за всеки полеви компонент; векторни измервания на пълно поле практически в една точка в пространството и времето; и намаляване на планарния ефект на Хол с фактор 35. Ъгловите грешки между отделните сензори на Хол в прототипа са между 0,1° и 0,5°, над допустимата грешка за некоригирани измервания.

При правилно калибриране има голям потенциал за измервания с висока точност на триосно магнитно поле. С. Лозанова и колектив [22] докладват значително повишаване на ефективността на преобразувателя на елемента на Хол поради нарастването на повърхностната плътност на заряда на границите на Хол чрез намаляване на площта на ръбовете, върху които силата на Лоренц отклонява носителите. Получената чувствителност е около 18 % по-голяма от ефективността на стандартен елемент на Хол, изработен от същия материал и при същите условия.

Сензори за температура

Измерването на температура е един от основните процеси във всяка една автоматична система. По своята същност процесът на измерване се основава на предаване на топлина от обекта, подлежащ на измерване към сензорния елемент, който от своя страна, чрез подходяща електрическа схема, да преобразува топлинната енергия в електрически сигнал. Често срещана аналогия в литературата е моделирането на температурните характеристики на измервателната система, чрез аналогия с еквивалентни електрически схеми. D. Silva [23] описва такова приложение, като показва статични модели, а в последствие разработва динамични такива с цел показване на преходни температурни характеристики.

Термоелектрическите елементи, известни още като термодвойки представляват два разнородни проводника (термо електроди) заварени в обща точка. M. A. Davies [24] и колектив изследват възможностите за употреба на термодвойки в процеси на обработката на металите, като се фокусират върху измервания извършвани при непосредствената обработка и отнемане на материал. В допълнение, D. A. Stephenson [25] посочва метод за реализация на термодвойка посредством режещия инструмент и материалът подлежащ на обработка, при който термо електродвижещото напрежение

се измерва при процеса на триене на двата метала. В литературата се срещат и приложения за употреба на термодвойки в процеси на обработка на метал, където същите се вграждат непосредствено в инструментите за обработка, например – N. Hamzawy. и колектив [26]. Термодвойките могат да демонстрират висока грешка от нелинейност, особено при употреба в гранични температури. Посредством цифрова обработка в реално време, линеаризацията може да се постигне, чрез полиномна апроксимация от висок ред. За практическа реализация, размерността на полиномите често може да се редуцира, при избор на по-тесен работен диапазон. Съществуват и публикации показващи възможности за измерване с висока линейност посредством линеаризация чрез изкуствена невронна мрежа. D. Dey, и S. Munshi [27] показват такъв метод, за едновременна линеаризация и компенсация на студената точка. K. Danisman и колектив [28] реализират измервателна система с много висока прецизност, при която грешката е от едва 0,5% в работния диапазон от -200°C до 1000°C .

Металните терморезистори са друг широко разпространен елемент използван за реализиране на температурни измервания. Основават се на принципа на температурната зависимост на специфичното съпротивление на металите. Най-често използваните материали при изграждането на този тип елементи са мед, платина и никел. При използването на Pt нелинейността е значително по-малка в сравнение с други типове сензори, т.е. мерките за линеаризация не са толкова комплексни. M. Cappelli и F. Cordella [29] провеждат сравнителен анализ на температурните зависимости на метален терморезистор Pt100 и термодвойка от тип S, с което се демонстрира този факт. Терморезисторите намират широко приложение, като едно от най-важните качества на измервателните системи базирани на тези елементи е прецизността на измерването. S. Sarkar,

[30] демонстрира система за многоканално измерване на температура с много висока прецизност от $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ в работния диапазон от -100°C до $+100^{\circ}\text{C}$.

В литературата се срещат и примери за използване на термо резистори, в интелигентни сензори. Е. Santos и I. Vasconcelos [31] демонстрират употребата на терморезистор базиран на никел, с вградена калибрационна крива, което допринася за високата степен на линейност на сензора. Съвременните производствени методи, като триизмерното принтиране на различни видове материали, откриват значителни възможности пред проектирането на нови видове сензори. Изработването на термо резистори чрез добавъчни методи е показано от J. G. Jeon и колектив [32]. Използван е електропроводящ материал (PLA/CB). Елементът е линеаризиран чрез мост на Уитстън. Температурният резистивен коефициент е $6,62\ \%/^{\circ}\text{C}$, а стабилността при отделните температурни цикли се подобрява.

Термисторите представляват полупроводникови преобразуватели с голям температурен коефициент на съпротивление (ТКС) в широк температурен диапазон. Нелинейност на характеристиката се наблюдава както при термисторите с отрицателен температурен коефициент (NTC), така и при термисторите с положителен такъв (PTC). В практиката най-често се използват термистори с отрицателен температурен коефициент, когато е необходимо да се реализира измерване на температура. Употребата на термисторите е в качеството им на термометри. Р. Lugoda, и колектив [33] демонстрират употреба на миниатюризирани термистори, вградени в тъкани, като така реализират възможност за температурно измерване по повърхността на кожата, чрез умни дрехи. По отношение на методи на производство и нови материали, в литературата също могат да бъдат открити множество примери. R. Timmy, и колектив [34] демонстрират иновативен производствен метод чрез принтиране при

много висока температура от 900°C върху алуминиеви субстрати. Изследвани са няколко вида съединения. Изработен е термистор със съпротивление от $300\ \text{k}\Omega$ и $B=3300\text{K}$, имащ възможност за работа при сходни температурни диапазони. Х. Kang и колектив [35] изследват термисторни материали с отрицателен температурен коефициент на базата на керамика. Показват се типичните за термистори с отрицателен температурен коефициент, характеристики в широк температурен диапазон, високо съпротивление, термични константи, което ги прави подходящи материали за изработка на високотемпературни термистори. Т. Kikkawa [36] и колектив обсъждат разработването на нискотемпературни обработваеми отпечатани термистори с отрицателен температурен коефициент, използвайки обратен офсетов печат. Термисторите са произведени чрез отпечатване на гребеновидна шарка от сребърни наночастици и тънък филм от никелов оксид (NiO). Изследва се нискотемпературното образуване на слоя с помощта на обработка с кислородна плазма и се анализира състава на повърхността с помощта на рентгенова фотоелектронна спектроскопия. Резултатите демонстрират успешното формиране на гъвкави термистори върху филм от полиетилен терефталат, предлагайки решение за откриване на температура в различни области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата статия е базирана на преглед от над 100 литературни източника, от които са избрани 36 с цел показване на новостите в разработването на някои от най-разпространените видове сензори.

От направения литературен обзор, може да се наблюдава развитие в три основни направления:

1. Материали за изграждане на елементите – сплави, комбинации от химични елементи и пр.
2. Методи на конструиране, в т.ч. 3D принтиране, миниатюризация и пр.

3. Моделиране – подобрения в математични модели и обработка на информацията, в т.ч. и методи за линеаризация, ИНН и др.

Авторът отчита ограниченията на количеството информация, която може да бъде събрана в ограничения обем на една статия. Информацията посочена тук не претендира за изчерпателност и не демонстрира всички новости, открития или нововъведения в свята на технологията на изграждане на сензори.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Chen, Gaohua & Yan, Xianguo & Cai, Jianghui & Guo, Hong. (2018). Hysteresis nonlinear modeling and compensation of piezoelectric ceramic sensors in micro measurement systems. *Measurement Science and Technology*. 29. 10.1088/1361-6501/aacfec.
- [2]Ismail, Mohammed & Ikhoulane, Fayçal & Rodellar, José. (2009). The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 16. 161-188. 10.1007/s11831-009-9031-8.
- [3]Hussain, Gasak & Holderbaum, William & Theodoridis, Theodoros & Wei, Guowu. (2023). Modified Nonlinear Hysteresis Approach of a Tactile Sensor. 10.20944/preprints202306.2016.v1.
- [4]Saleem, Hussam & Downey, Austin & Laflamme, Simon & Kolloosche, Matthias & Ubertini, Filippo. (2015). Investigation of Dynamic Properties of a Novel Capacitive-based Sensing Skin for Nondestructive Testing. *Materials Evaluation*. 73. 1384-1391.
- [5]Arora, Nishta & Singh, Priyanka & Kumar, Randhir & Pratap, Rudra & Naik, Akshay. (2023). Mixed Nonlinear Response and Transition of Nonlinearity in a Piezoelectric Membrane.
- [6]Alexander Keck, Oliver Sawodny, Marc Gronle, Tobias Haist, Wolfgang Osten, Active Compensation of Dynamic Errors in a Coordinate-Measuring Machine**This work was supported by the DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft / German Research Foundation) under grants SA 847/16-1, OS 111/42-1. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 49, Issue 21, 2016, Pages 636-641, ISSN 2405-8963
- [6]G. Langfelder, S. Dellea, N. Aresi, A. Longoni, Linearity of Piezoresistive Nanogauges for MEMS Sensors, *Procedia Engineering*, Volume 87, 2014, Pages 1469-1472, ISSN 1877-7058,
- [7]Shen Z, Zhang Z, Zhang N, Li J, Zhou P, Hu F, Rong Y, Lu B, Gu G. High-Stretchability, Ultralow-Hysteresis Conducting Polymer Hydrogel Strain Sensors for Soft Machines. *Adv Mater*. 2022 Aug;34(32):e2203650. doi: 10.1002/adma.202203650. Epub 2022 Jul 11. PMID: 35726439..
- [8]Fulvio Michelis, Laurence Bodelot, Yvan Bonnassieux, Bérengère Lebental, Highly reproducible, hysteresis-free, flexible strain sensors by inkjet printing of carbon nanotubes, *Carbon*, Volume 95, 2015, Pages 1020-1026, ISSN 0008-6223
- [9]Jin, Z.; Li, Y.; Fan, D.; Tu, C.; Wang, X.; Dang, S. Calibration Experiment and Temperature Compensation Method for the Thermal Output of Electrical Resistance Strain Gauges in Health Monitoring of Structures. *Symmetry* 2023, 15, 1066. <https://doi.org/10.3390/sym15051066>
- [10]Lanzolla, A.M.L.; Attivissimo, F.; Percoco, G.; Ragolia, M.A.; Stano, G.; Di Nisio, A. Additive Manufacturing for Sensors: Piezoresistive Strain Gauge with Temperature Compensation. *Appl. Sci*. 2022, 12, 8607. <https://doi.org/10.3390/app12178607>
- [11]Jiang K, Zhao H, Dai J, Kuang D, Fei T, Zhang T. Excellent Humidity Sensor Based on LiCl Loaded Hierarchically Porous Polymeric Microspheres. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2016 Sep 28;8(38):25529-34. doi: 10.1021/acsami.6b08071. Epub 2016 Sep 14. PMID: 27598319.
- [12]Lu, Hengyi & Shi, Wen & Zhang, James & Chen, Amylynn & Guan, Weixin & Lei, Chuxin & Greer, Julia & Boriskina, Svetlana & Yu, Guihua. (2022). Tailoring the Desorption Behavior of Hygroscopic Gels for Atmospheric Water Harvesting in Arid Climates. *Advanced Materials*. 34. 10.1002/adma.202205344.
- [13]Harun, Noor & Ali, Roudina & Ali, Ab Malik Marwan & Yahya, Muhd Zu Azhan. (2012). Resistive-type Humidity Sensor Based on CA-NH4BF4-PEG600 Thin Films. *Physics Procedia*. 25. 221-226. 10.1016/j.phpro.2012.03.075.

- [14]Lee H., Lee S., Jung S., Lee J. Nano-Grass Polyimide-Based Humidity Sensors. *Sens. Actuators B Chem.* 2011;154:2–8.
- [15]Gu L., Zheng K., Zhou Y., Li J., Mo X., Patzke G.R., Chen G. Humidity Sensors Based on ZnO/TiO₂ Core/shell Nanorod Arrays with Enhanced Sensitivity. *Sens. Actuators B Chem.* 2011;159:1–7.
- [16]Zeng, Tao & Lu, Yunfeng & Liu, Yongmeng & Yang, Hongxing & Bai, Yang & Hu, Pengcheng & Li, Zhengkun & Zhang, Zhonghua & Tan, Jiubin. (2015). A Capacitive Sensor for the Measurement of Departure From the Vertical Movement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 65. 1–9. 10.1109/TIM.2015.2490806.
- [17]Bai Y, Lu Y, Hu P, Wang G, Xu J, Zeng T, Li Z, Zhang Z, Tan J. Absolute Position Sensing Based on a Robust Differential Capacitive Sensor with a Grounded Shield Window. *Sensors (Basel).* 2016 May 11;16(5):680. doi: 10.3390/s16050680. PMID: 27187393; PMCID: PMC4883371.
- [18]G. Ferri, F.R. Parente, V. Stornelli, G. Barile, L. Pantoli, Automatic Bridge-based Interface for Differential Capacitive Full Sensing, *Procedia Engineering*, Volume 168, 2016, Pages 1585-1588, ISSN 1877-7058
- [19]Paun, Maria-Alexandra & Sallese, Jean-Michel & Kayal, M.. (2010). Geometry influence on the Hall effect devices performance. *UPB Scientific Bulletin, Series A: Applied Mathematics and Physics.* 72.
- [20]Paun, Maria-Alexandra & Sallese, Jean-Michel & Kayal, Maher. (2013). Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis. *Journal of Sensor and Actuator Networks.* 2. 85-97. 10.3390/jsan2010085.
- [21]C. Wouters, V. Vranković, C. Rössler, S. Sidorov, K. Ensslin, W. Wegscheider, C. Hierold, Design and fabrication of an innovative three-axis Hall sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 237, 2016, Pages 62-71, ISSN 0924-4247
- [22]Siya Lozanova, Avgust Ivanov, Chavdar Roumenin, A Hall Effect Device with Enhanced Sensitivity, *Procedia Engineering*, Volume 25, 2011, Pages 543-546, ISSN 1877-7058
- [23]Silva D. Modeling the Transient Response of Thermal Circuits. *Applied Sciences.* 2022; 12(24):12555. <https://doi.org/10.3390/app122412555>
- [24]Davies, M. A., Ueda, T., M'saoubi, R., Mullany, B., & Cooke, A. L. (2007). On the measurement of temperature in material removal processes. *CIRP annals*, 56(2), 581-604
- [25]Stephenson, D. A. "Tool-work thermocouple temperature measurements—theory and implementation issues." (1993): 432-437.
- [26]Hamzawy, N., Khedr, M., Mahmoud, T. S., EI-Mahallawi, I., & Khalifa, T. A. (2020). Investigation of temperature variation during friction drilling of 6082 and 7075 Al-alloys. In *Light Metals 2020* (pp. 471-477). Springer International Publishing.
- [27]Dey D, Munshi S. A new intelligent scheme for simultaneous cold junction compensation and linearization of thermocouples. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011; 19: 13–28
- [28]Danisman K, Dalkirana I, Celebib FV. Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. *Measurement* 2006; 39(8): 695–700
- [29]Mauro Cappelli, Francesco Cordella, Chapter 3 - Fundamentals of analog I&C systems, Editor(s): Mauro Cappelli, In *Woodhead Publishing Series in Energy, Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants*, Woodhead Publishing, 2023, Pages 67-115
- [30]Sarkar, Shantanu. (2018). Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range -100°C to $+100^{\circ}\text{C}$ using single quartic function. *Cogent Engineering.* 5. 1-15. 10.1080/23311916.2018.1558687.
- [31]Santos, Edval & Vasconcelos, Isabela. (2008). RTD-based smart temperature sensor: Process development and circuit design. 333 - 336. 10.1109/ICMEL.2008.4559289.
- [32]Jeon, J.G.; Hong, G.-W.; Park, H.-G.; Lee, S.K.; Kim, J.-H.; Kang, T.J. Resistance Temperature Detectors Fabricated via Dual Fused Deposition Modeling of Polylactic Acid and Polylactic Acid/Carbon Black Composites. *Sensors* 2021, 21, 1560.
- [33]Lugoda, P., T. Dias, and R. Morris. "Electronic temperature sensing yarn." *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies* 1.1 (2015).
- [34]Timmy, Reimann., Jörg, Töpfer., Stefan, Barth., Heike, Bartsch., Jens, Muller. "Low-

- Temperature Sintered NTC Thermistor Ceramics for Thick-Film Temperature Sensors." *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 10 (2013):428-434. doi: 10.1111/IJAC.12045
- [35]Xin, Kang., Xiaohui, Li., Xiaoyi, Chen., Bo, Gao., Pengjun, Zhao., Zhaoyang, Chen., Wenwen, Kong., Aimin, Chang. (2022). Novel NTC ceramics based on pyrochlore-type $A_2Ti_2O_7$ (A = Sm, Eu, Y) titanates for high-temperature thermistors. *Ceramics International*, 48(6):8773-8778. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.01.181
- [36]Taichi, Kikkawa., Daisuke, Kumaki., Shizuo, Tokito., Nobuko, Fukuda., Yasuyuki, Kusaka. (2022). Nickel oxide-based flexible thin-film NTC thermistors by using reverse offset printing. *Flexible and printed electronics*, 7(1):015003-015003. doi: 10.1088/2058-8585/ac489f.