

ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Корецька Олександра Олегівна**

УДК 621.311.69:681.586.7

**МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ПОБУДОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ  
ІоТ ПРИСТРОЇВ НА БАЗІ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають  
посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ О. О. Корецька

Науковий керівник:  
доктор технічних наук, професор М. П. Мусієнко

Миколаїв – 2019

## АНОТАЦІЯ

Корецька О. О. Моделі та засоби побудови енергоефективних IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – Комп'ютерні системи та компоненти. – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2019.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення енергоефективності IoT пристроїв за рахунок розробки моделей та засобів побудови енергоефективних IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

У роботі проведено обґрунтування актуальності напрямку досліджень, наведено зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, відображені наукова новизна, практична цінність роботи та особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію, публікації та використання результатів дослідження.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел, проаналізований стан предмета досліджень в області побудови енергоефективних IoT пристроїв з автономним живленням та сформульовані основні задачі досліджень.

В роботі проаналізовано фізичні явища і перетворення, які можуть слугувати в якості альтернативних джерел енергії. Показана перспективність використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел енергії для живлення IoT пристроїв. Розглянуті аналоги електронної техніки з живленням від п'єзоперетворювачів, показані їх переваги та недоліки, особливості застосування, а також визначені шляхи подальшого вдосконалення.

Проаналізовані існуючі методи та засоби підвищення вихідної напруги п'єзокерамічних перетворювачів (ПП), зокрема визначені, як перспективні, три такі методи: застосування доменно-дисипативних

п'єзоперетворювачів (ДДП), застосування асиметричних біморфних п'єзоелементів (АБПЕ) та виконання цих перетворювачів у консольному закріпленні. Доведено, що існуючі теоретичні та практичні положення не дозволяють ефективно застосовувати існуючі рішення побудови п'єзоперетворювачів в якості елементів накопичення енергії для живлення IoT пристроїв.

В роботі поставлено задачу сформулювати теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти енергоефективні IoT-пристрої на базі п'єзокерамічних перетворювачів, а саме розробити моделі та засоби побудови енергоефективних IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів

На основі проведеного аналізу побудовано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження, а також визначено ряд задач, вирішенню яких присвячено наступні три розділи.

У другому розділі наведено результати розробки моделей компонентів IoT пристроїв, а саме: асиметричних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів при їх консольному закріпленні, що використовуються в якості джерел накопичення енергії для подовження тривалості роботи IoT пристроїв при їх автономному живленні.

На першому етапі було досліджено можливість використання п'єзоперетворювачів в якості ДДП. Показано, що рівень вихідного сигналу п'єзокерамічних елементів залежить не тільки від значень скалярних величин (електричних і пружних п'єзоконстант), а й знаходиться у прямій залежності від просторового співвідношення векторних величин ( $\mathbf{P}$  – вектора поляризації,  $\mathbf{F}$  – вектора сили, що впливає на ПП, та  $\mathbf{E}$  – вектора напруженості поля між вихідними електродами). При перпендикулярному розташуванні векторів  $\mathbf{P}$  та  $\mathbf{E}$ , тобто при ДДП, можна досягти більшої чутливості п'єзоелемента ніж при їх традиційному паралельному розташуванні.

На основі проведених в роботі досліджень зроблено висновки та надано рекомендації щодо розташування електродів на п'єзокерамічному елементі, тобто щодо забезпечення необхідного кута між векторами  $P$  та  $E$  для досягнення максимального рівня вихідного сигналу.

Для врахування просторового розподілу полярних осей доменів введена система орієнтації, яка враховує кути між основними зазначеними векторами.

Для визначення рівня вихідного сигналу біморфних ПП в залежності від розміщення вихідних електродів, тобто від кута  $\delta$  між векторами  $P$  і  $E$ , визначалися основні величини, що характеризують властивості п'єзокераміки.

Отримана залежності п'єзомодулів  $d_{31}$  і  $d_{33}$  від кута  $\delta$  і механічних напруг для двох основних випадків впливу на ПП.

Показано, що основні параметри мають нелінійний характер і потребують розрахунків при проектуванні конструкцій ДДП. Отриманий аналітичний опис дозволяє визначати необхідну форму, розміри та розташування електродів для досягнення необхідних кутів між основними трьома векторами, а отже досягати максимального рівня вихідного сигналу.

Таким чином, в результаті проведеного дослідження отримано перший науковий результат, а саме: отримав подальшого розвитку аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці за рахунок врахування конструктивних та фізичних параметрів біморфних п'єзоелементів, що дозволяє проектувати п'єзоперетворювачі зі збільшеним рівнем вихідного сигналу.

Другим важливим етапом при розробці п'єзоперетворювачів для IoT пристроїв є визначення необхідних лінійних розмірів ПП та металевих біморфних та консольних пластин. В роботі показано, що математичне моделювання добре підходить для мономорфних, але неефективне для біморфних ПП. Використання схематехнічного моделювання також неефективне в випадку застосування двох пластин: біморфної та

консольної. Тому в роботі вперше були отримані функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, що дозволяє розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів і пластин.

З використанням програмного пакета САПР отримані АЧХ, ФЧХ, перехідні характеристики і відгуки на спеціальні впливи для різних типів п'єзоперетворювачів. За допомогою критерію Найквіста досліджено стійкість різних моделей перетворювачів. Аналіз отриманих годографів показав, що система залишається стійкою при різних значеннях лінійних розмірів ПП та металевих пластин.

Отже, отримано другий науковий результат роботи, а саме: вперше отримані функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, що дозволяє розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів і пластин при проектуванні п'єзоперетворювачів з максимальним рівнем вихідного сигналу.

У третьому розділі наведені результати розробки математичної моделі побудови IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення. Найбільш важливими характеристиками IoT пристроїв на базі ПП є енергоспоживання, час виконання завдань, кількість ПП, що генерують енергію, які є вхідними параметрами системи. В свою чергу, до вхідних параметрів також відносять час виконання завдань.

Розроблена математична модель роботи IoT пристрою описує ключові параметри системи: час роботи, енергоспоживання, а також враховує енергетичні обмеження системи, що дозволяє розробнику визначити, скільки часу IoT пристрій зможе працювати при наявності ПП в якості джерела додаткової енергії, а також необхідну кількість ПП та їх підключення до відповідних модулів.

Таким чином, отримано третій науковий результат роботи, а саме отримала подальший розвиток математична модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, за рахунок врахування енергії, яка генерується п'єзокерамічними

перетворювачами, що дозволяє будувати IoT пристрої з подовженим терміном роботи.

У четвертому розділі описані розроблені стенди та конструкції IoT пристроїв, в яких реалізовані усі отримані теоретичні положення, наведено результати експериментальних досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень були розроблені дві експериментальні установки: для дослідження вібраційних та акустичних впливів на п'єзоперетворювачі. В роботі були проведені дослідження з п'єзоелементами 14 типів (у вигляді кілець та дисків різної товщини та діаметрів) з керамік ЦТС-19 та ЦТС-23, а також з біморфними та консольними металевими пластинами різної товщини та з різних матеріалів.

Для накопичення енергії було спроектовано та виготовлено плату випрямляча на базі чипу LTC3330.

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили отримані теоретичні положення, що були викладені у попередніх розділах.

В роботі наведено розроблені та запатентовані конструкції IoT пристроїв на прикладі п'єзوماгнітних тахометрів, які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання високих рівнів вихідної напруги.

Розглянуто використання розроблених IoT пристроїв в якості консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів для визначення аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв. Застосування розроблених в роботі конструкцій дозволило ідентифікувати обладнання, що вийшло з ладу, та передати сигнал тривоги лише за рахунок накопиченої від п'єзоперетворювача енергії, тобто, за відсутності батарейного живлення.

Запропоновані консольні АБПЕ були використані для розробки високоточного маяка-трекера при виконанні госпдогвірної теми «Розробка високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою Міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI)». Застосування розроблених конструкцій дозволило на 15 % зменшити вартість виробу.

Розроблені конструктивні рішення було впроваджено при розробці IoT Smart Toys в стартапі Cubomania (<https://cubomania.io>). Використання консольних пластин дозволило до 10 % подовжити роботу інтелектуальної іграшки. Розроблені IoT Smart Toys були представлені на виставках електронних виробів шести міст України та на міжнародній виставці CES-2018 (Лас-Вегас, США). Зображення стендів та описи розроблених IoT Smart Toys наведено у додатку Б дисертації.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, описи та зображення розроблених IoT пристроїв, описи отриманих патентів та перелік публікацій за темою дисертації.

Ключові слова: IoT пристрої, енергоефективність, автономне живлення, консольні асиметричні біморфні доменно-дисипативні п'єзоперетворювачі.

## **ABSTRACT**

Koretska O. O. Models and tools for building energy-efficient IoT devices based on piezoceramic transducers. – As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2019.

The dissertation research is devoted to solving the actual scientific and practical problem of increasing the energy efficiency of IoT devices by developing models and tools for building energy efficient IoT devices based on piezoceramic transducers.

The paper substantiates the relevance of the research direction, provides a link with scientific programs, formulates the purpose and tasks of the research, reflects the scientific novelty, practical value of the work and personal contribution of the applicant, provides information on testing, publication and use of research results.

The first section reviews the literature sources, analyzes the state of the subject of research in the field of building energy-efficient IoT devices with autonomous power and formulates the main research objectives.

The work analyzes physical phenomena and transformations that can serve as alternative sources of energy. The prospect of using piezoceramic transducers as energy sources for powering IoT devices is shown. The analogues of electronic technology with power from piezoelectric transducers are considered, their advantages and disadvantages, features of an application are shown, as well as ways of further improvement are determined.

The existing methods and means for increasing the output voltage of piezoceramic transducers (PT), in particular, as perspective, are defined as three methods: the application of domain-dissipative piezoelectric transducers (DDP), the use of asymmetric bimorphic piezoelectric transducers (ABPT), and the implementation of these transducers in a console fixing. It is proved that the existing theoretical and practical provisions do not allow to effectively apply existing solutions for constructing piezoelectric transducers as elements of energy accumulation for powering IoT devices.

The task is to form theoretical and practical provisions that will allow the development of energy-efficient IoT devices based on piezoceramic transducers, namely to develop models and means of building energy-efficient IoT devices based on piezoceramic transducers

On the basis of the analysis, a structural and logical scheme of the dissertation research was constructed, as well as a number of tasks, the following three sections are devoted to.

The second section presents the results of the development of models of components of IoT devices, namely: asymmetric bimorphic domain-dissipative piezoelectric transducers with their console fixing, used as sources of energy accumulation for prolonging the duration of IoT devices with their autonomous power supply.



At the first stage, the possibility of using piezoelectric transducers as DDP was investigated. It is shown that the level of the output signal of the piezoceramic elements depends not only on the values of the scalar quantities (electric and elastic piezoconstant), but also is directly dependent on the spatial ratio of the vector values ( $\mathbf{P}$  – polarization vector,  $\mathbf{F}$  – vector of the influencing force on the PT and  $\mathbf{E}$  – the vector of the field strength between the output electrodes). With the perpendicular arrangement of the vectors  $\mathbf{P}$  and  $\mathbf{E}$ , that is, at the DDP, it is possible to achieve greater sensitivity of the piezoelement than with their traditional parallel arrangement.

Based on the research carried out in the work, conclusions were made and recommendations were given regarding the location of the electrodes on the piezoceramic element, that is to provide the necessary angle between the  $\mathbf{P}$  and  $\mathbf{E}$  vectors, to achieve the maximum level of the output signal.

In order to take into account, the spatial distribution of the polar axes of domains, an orientation system is introduced which takes into account the angles between the main vectors indicated.

In order to determine the level of the output signal of bimorphic PT, depending on the location of the output electrodes, that is, from the angle  $\delta$  between the vectors  $\mathbf{P}$  and  $\mathbf{E}$ , the main quantities characterizing the properties of piezoceramics were determined.

The dependences of the piezomodules  $d_{31}$  and  $d_{33}$  on the angle  $\delta$  and the mechanical stresses for the two main cases of influence on the PT were obtained.

It is shown that the main parameters are nonlinear and require calculations when designing the structures of the DDP. The obtained analytical description allows us to determine the required shape, size and location of the electrodes to achieve the necessary angles between the main three vectors, and therefore reach the maximum level of the output signal.

Thus, as a result of the research, the first scientific result was obtained, namely: the analytical description of the piezoceramic parameters, taking into

account the orientational effects of the domains in piezoceramics, was further developed, taking into account the structural and physical parameters of the bimorphic piezoelements, which allows the projection of piezoceramic transducers with increased level of output signal.

Another important step in the development of piezoelectric transducers for IoT devices is to determine the required linear dimensions of PT and metal bimorphic and console plates. It has been shown that mathematical modeling is well suited for monomorphic, but not effective for bimorphic PT. The use of schematic design is also ineffective in the case of two plates: bimorphic and console. Therefore, for the first time functional models of condominium bimorphic domain-dissipative piezoelectric transducers were obtained, which allows calculating the linear dimensions of piezoelements and plates.

With the use of the software package CAD received AFC, PFC, transient characteristics and feedback on special effects for different types of piezoelectric transducers. Using the Nyquist criterion, the stability of different transducer models is investigated. The analysis of the received hodographs showed that the system remains stable at different values of linear sizes of PT and metal plates.

Thus, the second scientific result of the work was obtained, namely: the first obtained functional models of condominium bimorphic domain-dissipative piezoelectric transducers, which allows calculating the linear dimensions of piezoelements and plates in the design of piezoelectric transducers with the maximum level of the output signal.

The third section presents the results of developing a mathematical model for constructing IoT devices under conditions of limited energy supply. The most important characteristics of IoT devices based on PT are power consumption, task execution time, and the number of PT generating energy, which are the input parameters of the system. In turn, the input parameters also include the timing of the tasks.

The developed mathematical model of the work of the IoT device describes the key parameters of the system: operating time, energy consumption, and also

takes into account the energy constraints of the system, which allows the developer to determine how much time the IoT device can operate in the presence of PT as a source of additional energy, as well as the required number of PT and their connection to the corresponding modules.

Thus, the third scientific result of work was received, namely, the mathematical model of the functioning of the computer system in the conditions of limited energy supply was further developed, taking into account the energy generated by piezoceramic transducers, which allows building IoT devices with extended working life.

The fourth section describes the developed stands and designs of IoT devices, in which all the theoretical positions obtained are realized, and the results of experimental studies are presented.

For experimental research, two experimental devices were developed: for the study of vibration and acoustic influences on piezoelectric transducers. In this work, 14 types of piezoelectric elements (in the form of rings and discs of different thickness and diameters) from ceramics PTZ-19 and PTZ-23, as well as with bimorphic and console metal plates of different thicknesses and from different materials were conducted.

For the accumulation of energy, the LTC3330-based chip rectifier was designed and manufactured.

The results of the experimental studies confirmed the obtained theoretical positions, which were set forth in the previous sections.

The work out the developed and patented designs of IoT devices on the example of piezomagnetic tachometers, which proved the possibility of applying piezoelectric transducers to obtain high levels of the output voltage.

The use of the developed IoT devices as console piezoceramic identifiers for the definition of emergencies of potentially dangerous industries is considered. The application of the designs developed in the work allowed to identify the failed equipment and transmit the alarm only at the expense of the

energy accumulated from the piezoelectric transducer, that is, in the absence of battery power.

The proposed console ABPT were used to develop a high-precision lighthouse-tracker when performing the contracting theme "Development of high-precision lighthouse-tracker for balloon competition under the auspices of the International Federation of Aeronautical Sports (FAI)". Application of the developed designs allowed to reduce the cost of the product by 15%.

Developed design solutions were introduced during the development of IoT Smart Toys at the startup Cubomania (<https://cubomania.io>). The use of cantilever plates allowed up to 10% to extend the work of an intellectual toy. Developed by IoT Smart Toys were presented at the exhibitions of electronic products of six cities of Ukraine and at the international exhibition CES-2018 (Las Vegas, USA). The image of the stands and descriptions developed by IoT Smart Toys is given in Appendix B of the dissertation.

The annexes contain acts of the introduction of the results of dissertation work, descriptions and images of the developed IoT devices, descriptions of patents received and a list of publications on the topic of the dissertation.

**Keywords:** IoT devices, energy efficiency, autonomous power, console asymmetric bimorph domain-dissipative piezotransducers.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Бурлаченко І. С., Денісов О. О., Корецька О. О., Белозьоров Ж. О. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку. *Наукові праці*: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 254. Т. 266. Миколаїв : ЧДУ ім. Петра Могили. 2015. С. 112–118.

2. Мусієнко М. П., Куценко С. В., Бакарджиєв Р. О., Корецька О. О. Метод розміщення сповіщувачів провідно-безпровідної системи пожежної сигналізації всередині будівлі. *Наукові праці*: науковий журнал. Серія

«Комп'ютерні технології». Вип. 275. Т. 287. Миколаїв : ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. С. 139–144.

3. Мусієнко М. П., Журавська І. М., Савінов В. Ю., Корецька О. О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж. *Наукові праці: науковий журнал*. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 295. Т. 307. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили. 2016. С. 42–49.

4. Мусієнко М. П., Корецька О. О. Консольні п'єзоелектричні накопичувачі вібрації для IoT пристроїв. *Наукові праці: науковий журнал*. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 296. Т. 308. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили. 2017. С. 139–145.

5. Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor. *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol. 6. No. 6 (38). P. 4–13.

6. Zhuravska I., Musiyenko M., Koretska O., Wojciech S. & others. Self-powered information measuring wireless networks using the distribution of tasks within multicore processors. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2017. Vol. 10445: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. № 1044527. P. 1–13.

7. Томенко М. Г., Корецька О. О. Підвищення надійності систем раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв за допомогою безпроводних автономних п'єзотранспондерів. *Наукові праці: науковий журнал*. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 305. Т. 317. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 122–126.

8. Томенко М. Г., Корецька О. О. Використання консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів у вібродіагностиці при визначенні аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. Черкаси : ЧДТУ. С. 68–72.

9. Корецька О. О. Математичні та функціональні моделі енергоефективних IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів. *Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології»*. Вип. 308. Т. 320. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 33–37.

10. Корецька О. О. Моделювання датчиків за допомогою open source програмних засобів. *Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Free and Open Source Software – 2015»*, 24–27 листопада 2015. Харків : Харківський національний університет будівництва та архітектури. 2015. С. 93.

11. Корецька О. О. До питання побудови поліметричних інформаційно-вимірювальних систем із живленням від енергії вимірювального сигналу. *Матеріали XVIII Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2015»*, 12–20 листопада 2015. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2015. С. 115–116.

12. Корецька О. О. Методи та засоби підвищення вихідної напруги датчиків, що працюють від енергії вимірювального сигналу. *Матеріали XIX Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2016»*, 14–18 листопада 2016. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2016. С. 91–93.

13. Журавська І. М., Корецька О. О., Мусієнко М. П. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення. *Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2016»*, 11–14 жовтня 2016. Вінниця: ВНТУ. 2016. С. 79–81.

14. Корецька О. О. Використання програмного забезпечення Мікросар для моделювання режимів роботи поліметричних датчиків. *Матеріали VIII Всеукр. науково-практична конференція «Free and Open Source Software»*, 22–24 листопада 2016. Харків : Харківський національний університет будівництва та архітектури. 2016. С. 49.

15. Корецька О. О. Вибір безпроводних технологій для інформаційно-вимірювальних систем. *Матеріали VI Міжнародна науково-практична*

конференція «Датчики, прилади та системи – 2017». Черкаси : Видавець Третяков О. 2017. С. 49–51.

16. Корецька О. О. Аналіз та вибір основних складових побудови безпроводних інформаційно-вимірювальних систем з саможивлюючими первинними перетворювачами. *Матеріали XX Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2017»*, 13–17 листопада 2017. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2017. С. 42–43.

17. Корецька О. О. Розробка енерго-ефективних IoT пристроїв з живленням від п'єзоелементів. *Матеріали Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум–2018: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі»*, 7–10 червня 2018. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 96.

18. Мусієнко М. П., Корецька О. О. Накопичувачі енергії вібрації IoT-пристроїв на основі консольних п'єзоелементів. *Матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2018»*, 22-25 травня 2018. Вінниця : ВНТУ. 2018. С. 93–94.

19. Мусієнко М. П., Корецька О. О. Підвищення чутливості датчиків п'єзомагнітних тахометрів. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Датчики, прилади та системи – 2018»*, 17-21 вересня 2018. Черкаси : видавець Гордієнко Є. І., 2018. С. 9–12.

20. Корецька О. О. Доменно-дисипативні п'єзоперетворювачі в конструкціях п'єзомагнітних тахометрів. *Матеріали XXI Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2018»*, 12–17 листопада 2018. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 100–101.

21. Пат. на корисну модель 132568 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812372; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.

22. Пат. на корисну модель 132569 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812373; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ</b>	
РОЗВ'ЯЗУВАНИХ ЗАДАЧ.....	25
1.1. Аналіз ринку IoT-пристроїв.....	25
1.2. Аналіз способів живлення мобільних IoT-пристроїв.....	26
1.3. Аналіз фізичних явищ та перетворень для відновлювальних джерел енергії. ....	28
1.4. Аналіз існуючих конструкції пристроїв з живленням від енергії п'єзоперетворювачів .....	30
1.5. Аналіз можливостей використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел енергії для IoT-пристроїв.....	34
1.5.1. Вибір типу п'єзоперетворювачів.....	34
1.5.2. Способи дослідження п'єзоперетворювачів.....	38
1.5.3. Типи п'єзоперетворювачів.....	40
1.5.4. Методи збільшення рівня вихідного сигналу п'єзокерамічних перетворювачів.....	41
1.6. Формулювання завдань дослідження.....	42
1.7. Висновки до розділу 1.....	45
<b>РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ПОБУДОВИ КОНСОЛЬНОГО АСИМЕТРИЧНОГО БІМОРФНОГО ДОМЕННО-ДИСИПАТИВНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....</b>	
2.1. Аналіз орієнтаційних ефектів доменів в п'єзокераміці на основні параметри п'єзоелемента .....	47
2.1.1. Вплив механічної напруги на значення п'єзомодуля.....	48
2.1.2. Дослідження впливу напрямку трьох основних векторів на значення п'єзомодуля .....	51
2.1.3. Визначення п'єзомодулів при додатковій механічній дії....	58
2.2. Розробка функціональних моделей консольних асиметричних	



біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів .....	61
2.2.1. Визначення необхідності застосування функціональних моделей .....	61
2.2.2. Функціональне моделювання доменно-дисипативного ПП	64
2.2.3. Функціональне моделювання асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП.....	69
2.2.4. Функціональне моделювання консольного асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП.....	70
2.3. Висновки до розділу 2.....	76
<b>РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ІОТ ПРИСТРОЇВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....</b>	<b>77</b>
3.1. Загальні питання розробки IoT-пристроїв, узгодження генерації і споживання енергії в IoT-пристрої .....	77
3.2. Розробка моделі функціонування IoT-пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення .....	80
3.2.1. Визначення вимог до моделі.....	80
3.2.2. Розробка математичної моделі .....	82
3.3. Розробка програмного забезпечення реалізації розробленої математичної моделі .....	86
3.3.1. Вибір технологій для реалізації програмного модуля .....	87
3.3.2. Основні особливості структури програмного додатка.....	87
3.4. Загальна схема побудови IoT-пристрою .....	95
3.5 Висновки до розділу 3.....	97
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ТА ПРОВЕДЕНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>98</b>
4.1. Дослідження експериментального стенду.....	98
4.1.1. Вибір п'єзоелементів та пластин.....	98
4.1.2. Розробка накопичувача енергії .....	100
4.1.3. Експериментальний стенд для дослідження вібраційних впливів .....	103

4.1.4. Експериментальний стенд для дослідження акустичних впливів.....	107
4.2. Зразки розроблених IoT-пристроїв на базі запропонованих теоретичних рішень .....	109
4.2.1. Розробка IoT Smart Toys .....	109
4.2.2. Розробка п'єзомагнітних тахометрів .....	110
4.3. Приклади областей застосування розроблених IoT-пристроїв...	115
4.3.1. Визначення аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв за допомогою консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів.....	115
4.3.2. Розробка високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI).....	122
4.4. Порівняння запропонованих рішень з відомими .....	124
4.5. Висновки до розділу 4.....	126
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТКИ.....	146
Додаток А. Акти впровадження.....	146
Додаток Б. Участь здобувача в діяльності проекту Subomania .....	149
Додаток В. Описи отриманих патентів.....	151
Додаток Г. Перелік публікацій за темою дисертації.....	153

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Робота присвячена актуальним питанням розробки теоретичних основ створення і вдосконалення високоефективних технічних і програмних компонентів комп'ютерних систем, зокрема, розробці моделей і засобів побудови IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення.

Стрімке впровадження 4-ї промислової революції характеризується поширенням багатьох нових технологій, в тому числі IoT (англ. Internet of Things) – взаємопов'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані датчики, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку.

Однією з характеристик IoT пристроїв є живлення від автономних джерел енергії, таких як батарейне / акумуляторне живлення або відновлювальних джерел енергії. Отже розробка IoT пристроїв вимагає великої уваги до енергоефективності, оскільки від цього залежить тривалість їхньої роботи. Останнім часом стрімко розвиваються нові джерела живлення, такі як живлення від енергії вимірюваного сигналу, хвилі радіоефіру (наприклад, бездротова зарядка). З іншого боку, з'являються мікроелектронні елементи техніки з низьким енергоспоживанням, які можуть працювати від живлення зазначених малих джерел енергії. У зв'язку з цим пошук рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання, займає одне з найголовніших місць у сучасних наукових дослідженнях, пов'язаних зі створенням IoT пристроїв.

Розробкою подібних систем займалися такі вчені, як: Алгулієв Р. М., Алекперов Р. К., Гергель В. П., Гиббонс Р., Гуменюк В. А., Доуней А., Жуков І. А., Кессельман К., Коваленко В. М., Корягіна Д. А.,

Петренко А. В., Кременецький Г. М., Любимський Е. З., Савінов В. Ю., Ситніков В. С., Топорков В. В., Тягунова М. Ю. тощо.

Перспективним джерелом енергії є п'єзокерамічні перетворювачі. Вони мають високу чутливість і жорсткість (дуже мала деформація при навантаженні), малі габарити і масу, високу завадостійкість, малий рівень власних шумів, підвищену радіаційну стійкість, технологічність виготовлення тощо, що є безумовною перевагою для їх використання в якості джерел енергії в IoT пристроях.

Розвитком теорії та практики п'єзоелектричних пристроїв займалися Бондаренко Ю. Ю., Владішаускас А., Джагупов Р.Г., Домаркас В.Й., Кажіс Р.-Й.Ю., Єрмолов І.Н., Жуков В.Б., Карпельсон А.Е., Колесников О.Є., Корольов М.В., Кудряшов Е.О., Куценко А.М., Малов В.В., Мінаєв І.Г., Мусієнко М. П., Трофімов А.І., Улітко А.Ф., Шарапов В.М., Шульга М.О., Якименко Ю.І., а також Бергман Л., Катц Р., Кеді У., Мезон У., Оноє М., Тірстен Р., Терстон Р. та багато інших.

Проте мале значення енергії, що генерується п'єзоелементом, стримувало використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел напруги. До недавнього часу науково-технічна база проектування і вдосконалення п'єзокерамічних перетворювачів обмежувалася, в основному, лише зміною форми, розмірів і матеріалу п'єзоелемента, а також виду збуджуючих коливань.

Таким чином, розробка нових моделей та засобів підвищення енергоефективності IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів, що сприятиме подовженню часу роботи IoT пристроїв з автономним живленням, є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота проводилася у відповідності до завдань трьох науково-дослідних робіт: «Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу» (№ ДР 0115U000316); «Розроблення

бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення» (№ ДР 0117U000447); «Розробка нових комбінованих композитних пористих матеріалів з об'ємозмінними теплофізичними властивостями військово-цивільного застосування» (№ ДР 0119U100353); та однієї госпдоговірної науково-дослідної роботи на тему «Розробка технічного рішення виготовлення високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI)» (договір № 154 від 13.06.2017), в яких автор був виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення енергоефективності IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

У роботі поставлені та вирішені такі задачі:

- провести аналіз існуючих засобів і моделей живлення IoT-пристроїв на базі п'єзоперетворювачів з метою визначення шляхів їх покращення;
- отримати аналітичні вирази розрахунку параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміки для проектування п'єзоперетворювачів зі збільшеним рівнем вихідного сигналу;
- розробити функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів для розрахунку лінійних розмірів п'єзоелементів та біморфних і консольних металевих пластин;
- розробити математичну модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення із врахуванням енергії, що генерується п'єзокерамічними перетворювачами, для побудови IoT-пристроїв з подовженим терміном роботи;
- розробити та дослідити зразки IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

**Об'єкт дослідження** – процес підвищення енергоефективності IoT-пристроїв.

**Предмет дослідження** – моделі та засоби побудови енергоефективних IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

**Методи дослідження.** У дисертації для вирішення наукових задач використані наступні методи досліджень: теорії автоматичного керування, теорії коливальних систем із зосередженими параметрами та теорії електричних ланцюгів – для досліджень функціональних моделей п'єзоперетворювачів; методи аналізу анізотропії поляризованої п'єзокераміки – для отримання аналітичних розрахунків параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці; методи математичного моделювання – для розробки математичної моделі функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення; фізичні експерименти на макетах і дослідних зразках, методи теорії ймовірності і математичної статистики – для проведення експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– набув подальшого розвитку аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці за рахунок врахування конструктивних і фізичних параметрів біморфних п'єзоелементів, що дозволяє проектувати п'єзоперетворювачі зі збільшеним рівнем вихідного сигналу;

– вперше отримані функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, що дозволяє розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів і пластин під час проектування п'єзоперетворювачів з максимальним рівнем вихідного сигналу;

– набула подальшого розвитку математична модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, за рахунок врахування енергії, яка генерується п'єзокерамічними перетворювачами, що дозволяє будувати IoT-пристрої з подовженим терміном роботи.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Практична цінність роботи полягає в розширенні науково-технічної бази проектування IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

2. Отриманий аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміки дозволяє визначати форми біморфних п'єзоелементів, їх електродів, а також необхідного механічного напруження для збільшення потужності вихідного сигналу.

3. Розроблені функціональні моделі дозволяють розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів, а також біморфних та консольних пластин при проектуванні IoT-пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів з максимальною тривалістю живлення від енергії п'єзоперетворювача.

4. Розроблена математична модель функціонування IoT-пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення дозволяє визначати можливість та час автономної роботи таких пристроїв.

5. Отримані результати дозволяють подовжити до 10 % час роботи IoT-пристроїв при їх батарейному живленні, проектувати системи аварійної сигналізації з можливістю роботи від енергії, що генерується п'єзоперетворювачем, а також зменшити на 15 % вартість IoT-пристроїв.

6. Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальному процесі Чорноморського національного університету імені Петра Могили та Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, а також при розробці IoT Smart Toys стартапу Cubomania.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто. За результатами наукових досліджень опубліковано 9 індивідуальних робіт [9-12, 14-17, 20]. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: отримання висновків за результатами досліджень [1, 2]; участь в розробці концепції, експериментальне дослідження моделей [3, 5, 6, 13]; пропозиція основної ідеї, розробка теоретичних положень, експериментальні

дослідження, формулювання висновків [4, 7, 8, 18, 19]; пропозиція ідеї та конструкції, формулювання формули корисної моделі [21, 22].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 11 конференціях: VII-VIII всеукраїнських науково-практичних конференціях «Free and Open Source Software – 2015, 2016» (Харків, 2015-2016); XVIII-XXI всеукраїнських науково-методичних конференціях «Могилянські читання – 2015-2018» (Миколаїв, 2015–2018); X-XI міжнародних науково-практичних конференціях «Інтернет-Освіта-Наука – 2016–2018» (Вінниця, 2016–2018); VI-VII міжнародних науково-практичних конференціях «Датчики, прилади та системи – 2017–2018» (Черкаси, 2017–2018); міжнародній науковій конференції «Ольвійський форум-2018» (Миколаїв, 2018).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 22 наукові роботи, в тому числі 8 статей в наукових журналах (з яких сім статей проіндексовані у наукометричній базі Index Copernicus), 12 тез доповідей на наукових конференціях (одна робота проіндексована у наукометричній базі Scopus), 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки. Дисертація містить 56 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 152 найменувань.



## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕННЯ І ФОРМУЛЮВАННЯ РОЗВ'ЯЗУВАНИХ ЗАДАЧ

#### 1.1 Аналіз ринку IoT пристроїв

Впровадження 4-ї промислової революції характеризується поширенням багатьох нових технологій, в тому числі IoT (англ. Internet of Things) – взаємопов'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані датчики, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку [40].

Областей застосування IoT технології дуже багато – у будь-якій галузі, де щось можна автоматизувати. Особливо активно IoT розвивається в аграрному секторі, логістиці, Smart City, тощо, – тобто там, де є потреба в такого віддаленого моніторингу стану об'єктів або зборі великих даних з метою подальшого аналізу [120, 121]. Найчастіше IoT-пристроїв використовують в таких напрямках: виробництво, транспорт, оборона, сільське господарство, інфраструктура, роздрібні продажі, логістика, банки, нафта, газ, видобуток корисних копалин, страхова справа, розумні будинки, виробництво продуктів харчування, обслуговування, охорона здоров'я, IoT-компанії [120, 121].

За даними Gartner, до кінця 2017 р. по всьому світу налічувалося 8,4 млрд IoT пристроїв, тобто більше ніж жителів планети. У порівнянні з попереднім роком їх кількість зросла на 31 %. Передбачається, що до 2020 р. число IoT-пристроїв досягне 20,4 млрд штук. За підсумками 2017 р. обсяг ринку Інтернету речей в грошовому вираженні становив 1,7 трлн дол. США проти 1,4 трлн дол. США в 2016-му р. [41].

При цьому кількість «мобільних розумних речей», за оцінкою MIT Technology Review Business Report, до 2020 р. перевищить кількість смартфонів і персональних комп'ютерів (рис. 1.1) [41].

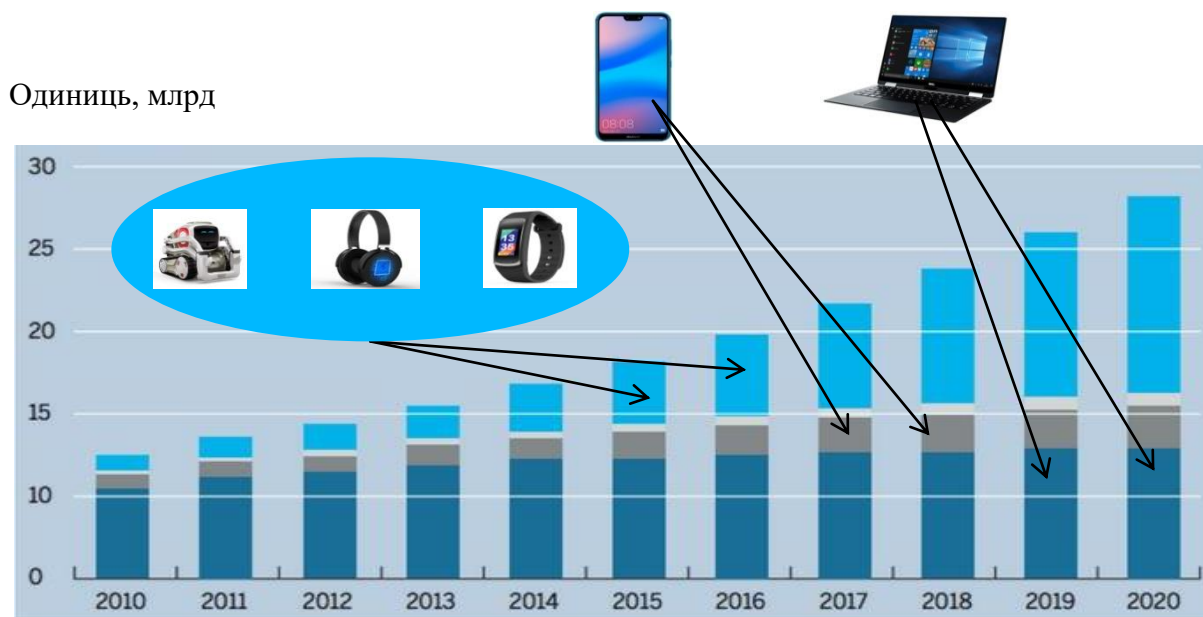


Рис. 1.1. Динаміка змін часткою типів IoT пристроїв з часом

Як випливає з рис. 1.1, останнім часом відбувається збільшення долі «мобільних» IoT пристроїв. Однією з важливих характеристик IoT пристроїв є живлення від автономних джерел енергії, таких як батарейне / акумуляторне живлення або відновлювальних джерел енергії (сонячна енергія, енергія вітру, вібрації тощо).

І якщо питання з живленням комп'ютерів, планшетів, смартфонів вже не виникає, то подовження живлення мобільних IoT пристроїв вельми актуальне.

## 1.2 Аналіз способів живлення мобільних IoT пристроїв

Зростання обсягу типів мобільних IoT пристроїв в різних прикладних системах гостро поставило завдання економії електроенергії, тобто підвищення їх енергоефективності. Мініатюризація привела до розширення номенклатури автономних пристроїв на батарейках, до більш

щільного їх компонуванні, зменшення фізичних розмірів корпусів і покращення теплових режимів.

Окремим випадком IoT є комплекси моніторингу, які вимагають великої кількості точок вимірювання, які розділені відстанями, а це означає, що виникає питання вибору джерела живлення окремих віддалених датчиків, які будуть вимірювати необхідні величини.

Рішень щодо типів живлення IoT пристроїв може бути декілька:

- застосування батарей одноразових хімічних джерел живлення з можливою заміною в процесі експлуатації;
- застосування відновлювальних джерел енергії (сонце, вітер, тепло, індустриальні випромінювання тощо);
- сумісне використання перших двох рішень;
- використання енергії вимірюваного сигналу в якості живлення датчика вимірювання (для випадку систем моніторингу) [38, 45, 49, 51, 53].

В дослідженні було проаналізовано кожен з видів живлення і були виявлені їх особливості, що представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння типів живлення IoT пристроїв

Тип живлення	Переваги	Недоліки
Батарейне живлення	<ul style="list-style-type: none"> <li>– простота в реалізації;</li> <li>– низька собівартість</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– середня ціна експл.;</li> <li>– необхідність постійної заміни батарей</li> </ul>
Живлення від регенеруємих джерел	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низька ціна експл.;</li> <li>– відсутня необхідність постійної заміни батарей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– висока собівартість;</li> <li>– відносно складна реалізація</li> </ul>
Комплексне рішення двох типів	<ul style="list-style-type: none"> <li>– простота в реалізації;</li> <li>– відносно низька собівартість;</li> <li>– відносно низька ціна експл.;</li> <li>– практично відсутня необхідність заміни батарей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– відносно складна реалізація</li> </ul>
Живлення від енергії вхідного сигналу	<ul style="list-style-type: none"> <li>– відносно невисока собівартість;</li> <li>– відсутня необхідність постійної заміни батарей.</li> <li>– низька ціна експл.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– відносно складна реалізація</li> </ul>

З табл. 1.1 видно, що використання третього типу живлення (комплексне рішення) є більш перспективними напрямком, так як воно може забезпечити фактично безперервну роботу IoT пристрою.

Отже, розробка IoT пристроїв (в першу чергу мобільних IoT пристроїв) вимагає великої уваги до енергоефективності, оскільки від цього залежить тривалість їхньої роботи.

Останнім часом стрімко розвиваються як нові джерела живлення, такі як живлення від енергії вимірюваного сигналу, хвилі радіоефіру (наприклад, бездротова зарядка), так і мікроелектронні елементи техніки з низьким енергоспоживанням, що можуть працювати від живлення зазначених малих джерел енергії. У зв'язку з цим пошук рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання, займає одне з найголовніших місць у сучасних наукових дослідженнях, пов'язаних зі створенням IoT пристроїв.

### **1.3 Аналіз фізичних явищ та перетворень для відновлювальних джерел енергії**

Як було показано вище, одним з вузлів IoT пристрою є датчик, який здійснює вимірювання деякої фізичної величини. Проте, деякі вимірювані сили несуть достатню кількість енергії для живлення самого IoT пристрою або окремих його вузлів. Тобто, для отримання енергії живлення можна використовувати або окремі генеруючі пристрої, або самі первинні перетворювачі в якості генераторів електричної енергії [86].

У роботі був проведений аналіз вимірюваних фізичних величин на можливість використання в якості джерел енергії. Результати наведені в табл. 1.2 [94].

З табл. 1.2 видно, що деякі фізичні явища, які використовуються у вимірюваннях, можуть виступати джерелом енергії без використання додаткових джерел напруги і струму (№№ 3, 4, 7, 8, 10).

Для вибору найкращого типу перетворення необхідно врахувати умови використання мобільних IoT пристроїв. Такі пристрої не завжди можуть використовуватися на відкритому просторі, тобто бути під впливом сонячного світла, а отже використання світла в якості відновлювальних джерел енергії неефективне. Теж саме стосується й впливу вітру й багатьох інших впливів, що вказані в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Фізичні явища і перетворення енергії на їх основі

№	Назва ефекту	Перетворення	Характеристика
1	Теплопровідність	теплова енергія → зміна фізичних властивостей	Перехід теплоти всередині фізичного об'єкта з області з більш високою в область з більш низькою температурою
2	Теплове випромінювання	теплова енергія → інфрачервоні промені	Оптичне випромінювання при підвищенні температури фізичного об'єкта
3	Ефект Зеебека	температура → електрика	Виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в ланцюзі з металевими з'єднаннями при різній температурі спаїв
4	Піроелектричний ефект	температура → електрика	Виникнення електричних зарядів на гранях деяких кристалів при підвищенні температури
5	Термоелектронний ефект	теплова енергія → електрони	Випускання електронів при нагріванні металу у вакуумі
6	Електротермічний ефект Томсона	температура і електрика → теплова енергія	Генерація або поглинання теплової енергії в електричному ланцюзі з однорідного матеріалу при різних температурах ділянок ланцюга
7	Фотогальванічний ефект	світло → електрика	Поява вільних електронів і позитивних дірок (виникнення ЕРС) в опромінованому світлом <i>p-n</i> -переході
8	Ефект Холла	магнетизм і електрика → електрика	Виникнення різниці потенціалів на гранях твердого тіла при пропущенні через нього електричного струму і додатку магнітного поля перпендикулярно напрямку електричного струму
9	Магніострикція	магнетизм → деформація	Деформація феромагнітного тіла, яке розміщене в магнітному полі
10	П'єзоелектричний ефект	тиск → електрика	Виникнення різниці потенціалів на гранях сегнето-електрика, що знаходиться під тиском

Постійним впливом, що характерний для мобільних IoT пристроїв, є вібрація та механічний вплив, що супроводжують IoT пристрій при його

переміщенні в просторі. Ці впливи можна використовувати в електромагнітних перетворювачах, проте, такі перетворювачі можуть піддаватися впливу сторонніх джерел електромагнітного випромінення та потребують наявності моточних елементів, що суттєво збільшує розміри IoT пристрою. Проте всі ці недоліки відсутні в п'єзоелектричному перетворювачі, що безумовно може бути використаний в якості джерела напруги мобільних IoT пристроїв.

Таким чином, аналіз різних типів перетворення енергії показав, що найперспективнішим джерелом енергії є п'єзокерамічні перетворювачі. Вони мають високу чутливість і жорсткість (дуже мала деформація при навантаженні), малі габарити і масу, високу завадостійкість, малий рівень власних шумів, підвищену радіаційну стійкість, технологічність виготовлення тощо [122], що є безумовною перевагою для їх використання в якості джерел енергії в IoT пристроях.

Отже, через велику кількість переваг п'єзоперетворювачів та особливостей використання мобільних IoT пристроїв, п'єзоперетворювачі мають безумовну перевагу перед іншими джерелами відновлювальної енергії для їх використання в якості джерел енергії в IoT пристроях.

#### **1.4 Аналіз існуючих конструкції пристроїв з живленням від енергії п'єзоперетворювачів**

Властивості п'єзоперетворювачів (ПП) вже давно відомі, і на сьогодні існує декілька рішень використання ПП в якості джерел напруги. Розглянемо декілька з них.

Одним таким рішенням є нічний малогабаритний візир «Зеніт НВ-п'єзо» (рис. 1.2) [94]. Особливістю даного нічного візира є використання в якості джерела живлення вбудованого п'єзоелектричного перетворювача, що дозволяє експлуатувати візир без звичайних гальванічних елементів.

Система для здійснення тиску (на п'єзоелемент)



Рис 1.2. Візир "Зеніт НВ-п'єзо"

Конструктивно візир складається з об'єктива, окуляра, двох кожухів, а також підсилювача яскравості, яка включає електронно-оптичний перетворювач (ЕОП) і п'єзоелектричний перетворювач, який є джерелом живлення.

Принцип живлення ЕОП від п'єзоелектричного перетворювача заснований на прямому п'єзоелектричному ефекті, при якому відбувається заряд ЕОП до робочої напруги живлення за рахунок механічної дії на п'єзокерамічні елементи шляхом натискання і відпускання важеля. Одне натискання до упору і відпускання важеля забезпечує спостереження за об'єктом не менше 1 хв.

Проте такі системи мають недоліки, що унеможлиблює їх застосування для живлення IoT пристроїв:

- необхідність фізичного впливу людиною, що не завжди є можливим, при цьому є необхідність постійного контролю стану заряду для своєчасного впливу на ПП;
- відносно великі розміри ПП, що унеможлиблює їх застосування у порівняно малогабаритних IoT пристроях.

Ще одним рішенням використання енергії вібрації є «вічний» генератор струму, розроблений британськими фахівцями з університету Саутгемптона (рис 1.3) [94].

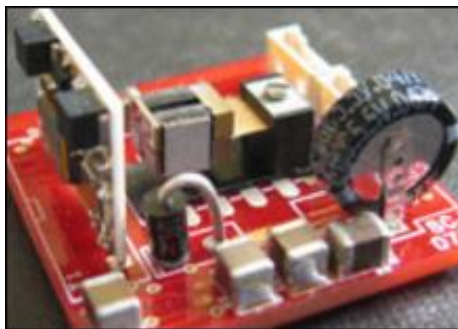


Рис 1.3. Генератор струму від впливу вібрації

Безпосередньо генеруючий пристрій має об'єм набагато менше одного кубічного сантиметра і виробляє до 46 мкВт електричної потужності за рахунок збору вібрацій низького рівня, присутніх в його навколишньому середовищу. Як приклад, це можуть бути вібрації, які виробляються устаткуванням на підприємстві, рухомим по дорозі транспортом тощо. Розробники приладу стверджують, що він працює в 10 разів ефективніше за своїх попередників такого ж розміру.

Проте, енергія, що виробляється даним пристроєм, є занадто малою, що слугувати живленням для IoT пристроїв.

Цікавим рішенням є використання енергії вимірювального сигналу, що описано в дослідженнях д.т.н., професора Мусієнка М. П. та Петльованого П. В.[94]. Деякі з розроблених конструкцій показані на рис. 1.4.

Проте енергії, що при цьому утворюється, вистачало лише на декілька секунд, щоб передати вимірювальну інформацію. Тобто, використовувати ці рішення для живлення IoT пристрою неможливо.

Ще одним цікавим рішенням використання енергії впливу на ПП для живлення вузлів обробки інформації є використання п'єзомагнітного тахометра (рис. 1.5) [70, 71, 133-137, 148].

На валу досліджуваного механізму закріплений постійний магніт М1. На статорі закріплений п'єзоелемент (ПЕ) з двома електродами, до якого прикріплений другий постійний магніт М2. При обертанні вала постійний магніт М1 при кожному оберті проходить поблизу нерухомо встановленого магніту М2.



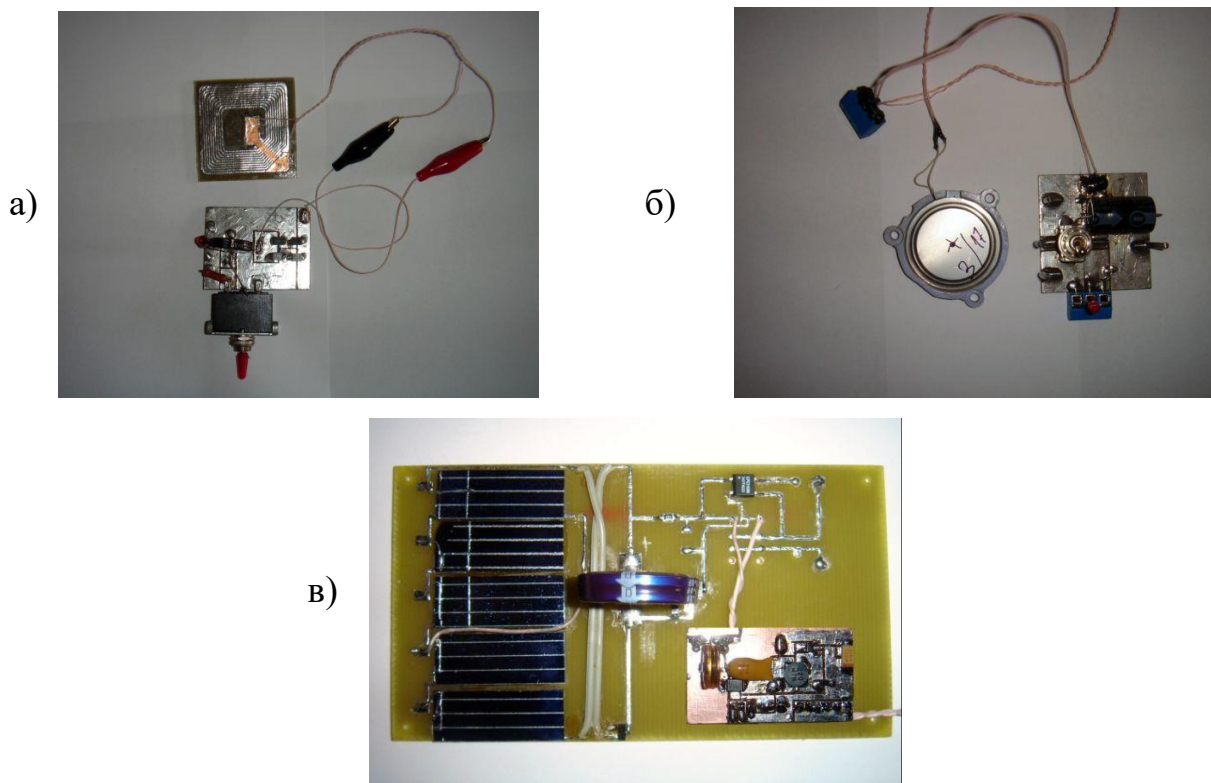


Рис 1.4. Накопичувачі енергії, що отримується з енергії вимірювального сигналу: а – з механічного впливу на ПП; б – з магнітного поля; в – зі світла

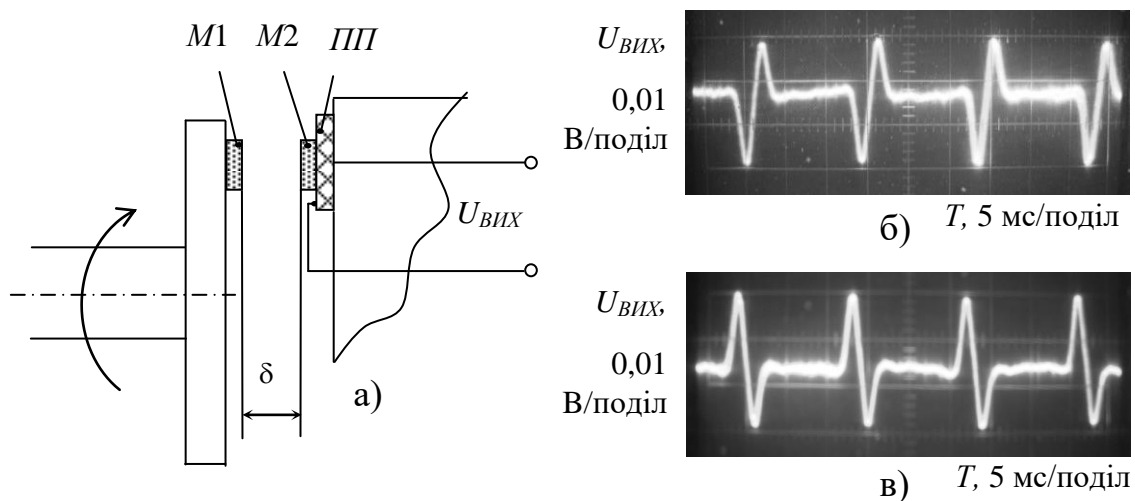


Рис. 1.5. П'єземагнітний датчик тахометра:  
а – схема; б, в – вихідний сигнал датчика

При цьому магнітні сили взаємодії притягають або відштовхують (в залежності від полярності) магніти. Ці сили, впливаючи на п'єзоелемент ПЕ, викликають його деформацію, яка призводить до появи напруги  $U_{вих}$  на електродах п'єзоелемента [122].

Вихідні електричні сигнали п'єзомагнітного датчика показані на рис. 1.5, б та в. При проходженні магнітів один проти одного виникають, в залежності від полярності магнітів, сили тяжіння або відштовхування. Причому, при наближенні магнітів на п'єзоелементі генерується сигнал одного знака, при видаленні – іншого (рис. 1.5, б). Зміна полярності одного з магнітів призводить до зміни полярності імпульсів вихідного сигналу (рис. 1.5, в).

В цьому випадку генерується достатня енергія для живлення IoT пристрою, проте, випадок постійного періодичного впливу, на зразок обертання валу, неможливий для випадку мобільних IoT пристроїв.

Є ще декілька пристроїв живлення на базі ПП, наприклад, мініатюрний пристрій Мартина Нунупарова та ін., які використовують в якості джерела енергії ПП, що піддаються впливу механічного тиску, який виробляється під час руху. Проте, абсолютно всі ці пристрої генерують занадто мало енергії, щоб виступати в якості елементів живлення IoT пристроїв [94].

Отже, для застосування п'єзоперетворювачів в якості елементів живлення для IoT пристроїв, необхідно збільшити рівень вихідного сигналу існуючих ПП. Розглянемо далі більш детально властивості ПП та шляхи можливого збільшення рівня вихідного сигналу.

## **1.5 Аналіз можливостей використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел енергії для IoT пристроїв**

### **1.5.1 Вибір типу п'єзоперетворювачів**

П'єзоелектричні перетворювачі дозволяють вирішувати різноманітні завдання: для вимірювання механічних параметрів (зусиллі, тисків, прискорень, маси, кутових швидкостей, деформацій і т. п.), теплових приладів (термодатчиків, датчиків витрати, вакууму, вимірювачів

електричних параметрів, датчиків теплових потоків), пристроїв для контролю складів, концентрацій газів, вологості, мікродмас. За роздільною здатністю і точністю ці пристрої в багатьох випадках перевершують перетворювачі, виконані на інших фізичних принципах [122].

Розвиток теорії і практики п'єзоелектричних пристроїв пов'язано також з іменами У. Мезона, Л. Бергмана, У. Кеді, Р. Терстона, Г.В. Катца [62] та ін., а також вітчизняних вчених В.М. Шарапова [123-148], Н.Н. Андреєва [11,12], А.А. Харкевича [117], И.П. Голяміної [26], В. Домаркаса і Р. Кажиса [32,33], В.В. Малова [63], А.Н. Куценко [56], Л.Я. Гутіна [28], Н.А. Шульги і А.М. Болкісева [95,149], В.В. Лавриненко [57], И.А. Глозмана [25], С.И. Пугачова [92], О.П. Крамарова [34], А.Ф. Улитко [114], И.Г. Минаєва [127], А.И. Трофимова [112], А.Е. Колеснікова [44], М.В. Королева [54], И.Н. Єрмолова [115], Р.Г. Джагупова [30], В.М. Плужнікова [87], П.О. Грибовського [27], П.Г. Позднякова [43,88], Ю.Ю.Бондаренко [1,15,91] та багатьох інших.

П'єзоперетворювачі містять кристали або текстури, що електризуються під дією механічної напруги – прямий п'єзоефект, або деформуються в електричному полі – зворотний п'єзоефект. Особливістю цих матеріалів є знаочутливість, тобто, зміна знака заряду при заміні напрямку прикладення сили [72, 122].

Залежно від фізичних ефектів, що лежать в їх основі перетворення, п'єзоперетворювачі можна розділити на два великих класи.

До першого класу відносяться перетворювачі на прямому п'єзоефекті. Вони використовуються для вимірювання лінійних і вібраційних прискорень, динамічних і квазістатичних тисків і зусиль, параметрів звукових і ультразвукових полів тощо [122].

До другого класу відносяться резонансні п'єзоперетворювачі. В їх основі може лежати як зворотний п'єзоефект, так і зворотний з прямим п'єзоефектом. Крім того, в їх основі лежать інші фізичні ефекти (тензочутливість, акусточутливість, термочутливість та ін.), що дозволяє

використовувати їх для вимірювання статичних та динамічних тисків і зусиль, лінійних і вібраційних прискорень, концентрацій речовин в газах, в'язкості тощо [122].

П'єзоелектричними властивостями володіють багато кристалічних речовин: кварц, ніобат літію, сегнетова сіль та багато інших матеріалів. Також до них відносять штучно створювані і спеціально поляризовані в електричному полі полікристалічні матеріали (п'єзокераміки): титанат барію, цирконат титанат свинцю тощо.

Основними перевагами кварцу є висока твердість, нерозчинність у воді, стійкість до дії ряду кислот, мале теплове розширення, надзвичайно висока механічна добротність і стабільність частоти [122].

Проте кварц має і суттєві недоліки. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку кварцу приблизно на порядок, а п'єзомодуль – на два порядки менше ніж відповідні параметри у п'єзокераміки. Крім того, недоліками кварцу є мала діелектрична проникність і власна ємність кварцових елементів. Важливим фактором, що стримує широке поширення кварцових перетворювачів тиску, є висока вартість і складна технологія виготовлення [122].

Тому в роботі перевага надана найбільш перспективному п'єзоелектричному матеріалу – п'єзокераміці. Можливість використання п'єзокераміки в приладобудуванні і автоматичі з'явилася лише на початку 60-х років ХХ століття, коли було освоєно промисловий синтез п'єзокерамічних матеріалів, що мають у порівнянні з природними п'єзоелектриками високу чутливість, механічну міцність, підвищену температурну стабільність. З цього часу у вітчизняній і зарубіжній літературі з'являється велика кількість публікацій щодо застосування п'єзокерамічних елементів [122].

Окрім зазначеного вище, п'єзокераміка має багато переваг. Так, технологія виробництва п'єзокераміки проста, а це означає, що й низька вартість виробів на їх основі. Висока стійкість до радіації п'єзокерамічних

матеріалів ставить поза конкуренцією ті пристрої на їх базі, які розраховані на роботу в умовах підвищеної радіації, що також має велике значення в деяких технологічних процесах [122].

П'єзокераміка стійка до дії різних агресивних середовищ. З відомих в даний час хімічних з'єднань тільки плавикова кислота здатна нашкодити п'єзокераміці. Це дозволяє використовувати п'єзокерамічні пристрої в багатьох складних хімічних виробництвах, де присутні агресивні середовища [122].

Недоліком п'єзокераміки, в порівнянні з кварцом, є низьке значення точки Кюрі. Проте вже розроблені високотемпературні п'єзокерамічні матеріали, які мають значення точки Кюрі в межах кварцу. Так, елементи, виготовлені з деяких марок п'єзокераміки ЦТС, ПКР, не втрачають своїх властивостей при температурах до 300–400°C, а на основі кобальту – здатні витримувати температуру, рівну 700°C і більше, що вже ставить в цьому питанні кераміку на рівень з кварцем [122].

Стійкість кераміки в широкому діапазоні температур дозволяє використовувати п'єзокерамічні перетворювачі від +400 до мінус 270°C. Кераміка може використовуватися, наприклад, для вимірювання тиску в циліндрах двигунів внутрішнього згорання, де температура досягає значень до +1600°C [122].

Не меншою перевагою кераміки є те, що вони охоплюють широкий діапазон виміру – кілька десяткових порядків.

П'єзоперетворювачі мають високу роздільну здатність і витримують високий тиск. П'єзоперетворювачі дозволяють вимірювати тиск до 10000 бар. Вони мають велику жорсткість, що особливо важливо при виготовленні динамометрів для вимірювання в широкому діапазоні частот [122].

Є цікавим і інше застосування п'єзоперетворювачів. Діелектрична природа п'єзоелемента, функціонування за рахунок дії електричного поля (зворотній п'єзоефект), практична відсутність струму і пов'язаних з цим

тепловиділень в діапазоні інфранизьких частот забезпечує йому якість вибухобезпечного елемента, ККД якого близько до 100 %. Цю важливу властивість можна використовувати на вибухонебезпечних підприємствах, до числа яких відносяться практично всі нафтохімічні виробництва та деякі інші [122].

Таким чином, аналіз показує, що в якості джерела живлення IoT пристрою на базі ПП найкраще підходять п'єзокерамічні перетворювачі.

### 1.5.2 Способи дослідження п'єзоперетворювачів

Збудження п'єзокерамічних резонаторів залежить від напрямку поляризації. У прямокутних п'єзоелементах, електроди яких розташовані на гранях, перпендикулярних напрямку поляризації, можна викликати поздовжні і поперечні коливання за відповідними геометричними розмірами. Якщо вектор поляризації спрямований паралельно площині електрода, то при збудженні п'єзоелемента на певній частоті виникають зсувні коливання. Тип порушуваних коливань резонатора залежить також від розташування і розмірів електродів. Якщо електроди нанесені вздовж всієї поверхні по довжині п'єзоелемента, електричне поле створює механічні напруги одного знака уздовж всієї довжини п'єзоелемента. Це сприяє порушенню основних коливань на першій гармоніці і слабших коливань на третій, п'ятій та вищих гармоніках. Якщо ж електроди нанесені на половину поверхні по довжині п'єзоелемента, створюються більш сприятливі умови для збудження коливань на другій гармоніці, так як в цьому випадку механічні напруги на половинах довжини п'єзоелемента можуть мати різні знаки. У п'єзокерамічному резонаторі можна порушити коливання на другій гармоніці і при суцільних електродах, якщо поляризувати окремі ділянки п'єзоелемента в протилежних напрямках [122].

При порушенні п'єзоелемента на резонансній частоті на його електродах з'являються змінні заряди, величина і фаза яких визначаються амплітудою і фазою механічних коливань п'єзоелемента і відповідно зовнішніх збуджуючих напруги і струму через нього. Виникає резонансна залежність опору п'єзоелемента від частоти збуджуючої напруги. Це дозволяє розглядати п'єзоелемент в резонансній області як електричний ланцюг (рис. 1.6, а), що складається з статичної ємності  $C_{III}$ , динамічної індуктивності  $L$  та ємності  $C$ , активного опору втрат  $R$  [122].

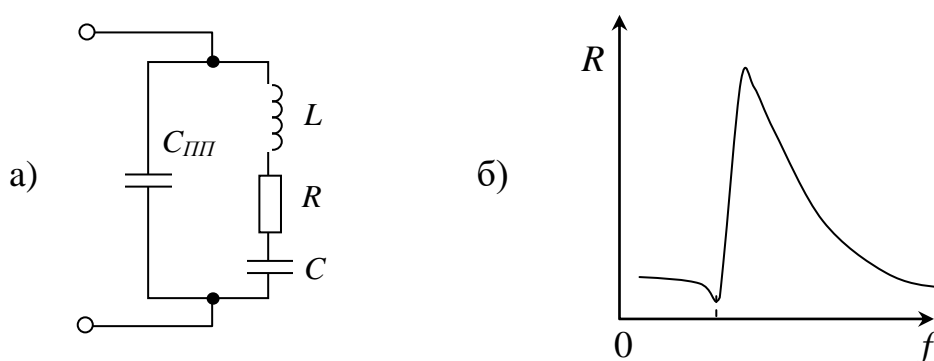


Рис. 1.6. Еквівалентна електрична схема резонатора (а)  
і його типова частотна характеристика (б)

Як послідовно-паралельний, цей контур має дві резонансні частоти: послідовного резонансу і паралельного резонансу (антирезонансу). Опір п'єзорезонатора на резонансній частоті мінімальний, а на антирезонансній частоті максимальний (рис. 1.6, б) [121].

Така еквівалентна схема (рис. 1.8, а) є найбільш типовою для вивчення ПП і використовується більшістю дослідників. Таким чином, у подальшому в роботі буде використана та ж сама еквівалентна схема.

### 1.5.3 Типи п'єзоперетворювачів

Властивості ПП напряму залежать від трьох основних векторів: вектора поляризації  $P$ , вектора діючої на п'єзоелемент сили  $F$ , а також вектора напруженості електричного поля вихідного сигналу  $E$  [72, 122]. Слід зазначити, що зміна напрямку одного з векторів на  $180^\circ$  призводить лише до зміни фази сигналу.

Найбільш поширений випадок використання ПП, у якого всі 3 вектора паралельні ( $F \downarrow P \downarrow E$ ) [122]. У тому випадку, коли вимірюване зусилля прикладається до п'єзоелемента таким чином, що кут між напрямком дії зусилля  $F$  і вектором поляризації  $P$  складає  $90^\circ$ , перетворювач був названий поперечним [122]. В поперечному п'єзоелементі чутливість в  $h/a$  разів більше ніж чутливість традиційного п'єзоелемента. Збільшення чутливості обмежується лише питаннями міцності та стійкості конструкції п'єзодатчиків.

В роботах [72, 122] представлені п'єзоперетворювачі, в яких кут між вектором напруженості електричного поля вихідного сигналу  $E$  і вектором поляризації  $P$  становить  $90^\circ$ . Таким перетворювачам було дано назву доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів (ДДП).

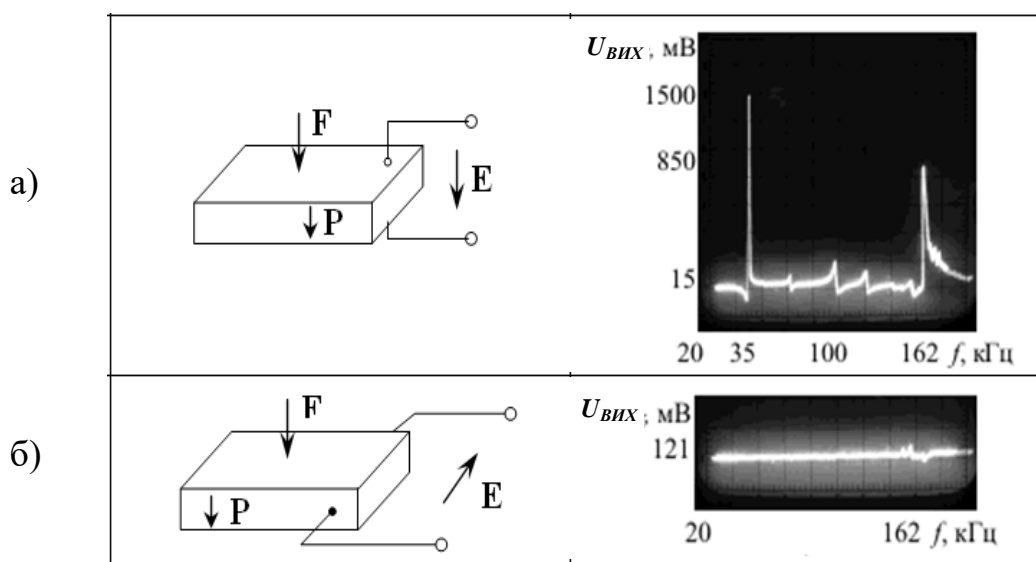


Рис. 1.7. Типи перетворювачів та їх АЧХ:

1 – традиційний; 2 – доменно-дисипативний



Як видно з рис. 1.7, рівень вихідного сигналу ДДП на порядок вище ніж у традиційного ПП (121 мВ проти 15 мВ). Цей результат в багатьох дослідженнях широко висвітлений [72, 122]. Пояснення цьому процесу досить складне і наведено в [122]. На простішому рівні це можна пояснити перетіканням енергії від резонансу, який є у традиційному ПП, на підвищену загальну чутливість ДДП (резонанс відсутній, проте, вище вихідний рівень сигналу). Тобто, закон зберігання енергії не порушується. Отже, для використання в якості джерел напруги для IoT пристроїв найкраще підходять ДДП.

Розглянемо далі можливі змін характеристик п'єзоперетворювачів.

#### 1.5.4 Методи збільшення рівня вихідного сигналу п'єзокерамічних перетворювачів

Окрім виконання ПП в якості ДДП є ще кілька методів підвищення рівня вихідної напруги перетворювача.

Як відомо, найбільшу чутливість мають п'єзоперетворювачі в біморфному чи триморфному виконанні, коли поєднується використання п'єзоелемента з металевою пластиною. В разі використання асиметричних біморфних ПП чутливість збільшується у 10–20 разів у порівнянні з використанням мономорфних елементів. При тому асиметричні біморфні ПП відрізняються більш простою технологією виготовлення [122].

Ще одним способом збільшення вихідної напруги є збільшення деформації за рахунок збільшення згінних коливань ПП, що можуть бути досягнуті за допомогою консольного закріплення ПП (рис. 1.8).

Таким чином, аналіз прикладів використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел енергії показав, що підвищення вихідної напруги п'єзокерамічних перетворювачів можливе за рахунок застосування трьох методів:

- застосування доменно-дисипативних п'єзоелементів;
- застосування асиметричних біморфних п'єзоелементів;
- виконання цих перетворювачів у консольному закріпленні.

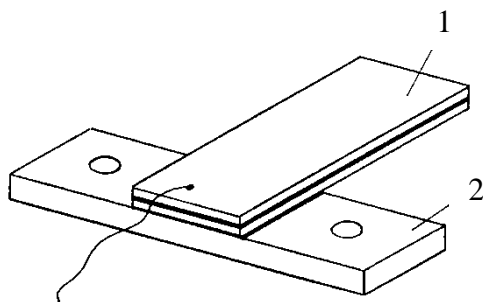


Рис. 1.8. Консольне закріпленні перетворювача:

1 – консоль, 2 – основа

В теорії більше розглянуті випадки товщинних коливань, коли вплив відбувається на всю поверхню п'єзоелемента, а той, в свою чергу закріплений по твірній або закріплений протилежною гранню від впливу на основі. Є дослідження ДДП в мономорфному та біморфному виконанні. Також є дослідження асиметричних біморфних ПП й консольних ПП, коли ПП прикріплюється до металевої пластини, що й слугує консоллю. Досліджень консольних асиметричних доменно-дисипативних перетворювачів при їх консольному закріпленні до сьогодні не досліджувалося. А отже, для побудови енергоефективних IoT пристроїв з подовженим терміном роботи від джерела живлення на основі ПП необхідно розробити відповідні моделі ПП.

### 1.6 Формулювання завдань дослідження

Проведений аналіз предметної області дослідження показав, що:

- важливою вимогою до IoT пристрою є можливість його довготривалої роботи від автономного джерела напруги, що висуває високі вимоги до енергоефективності IoT пристрою;

- в якості відновлювальних джерел енергії для IoT пристроїв перспективним є п'єзокерамічні перетворювачі;

- існуючі рішення в області використання енергії, що генерується п'єзокерамічним перетворювачем, для живлення IoT пристрою не дозволяють ефективно використовувати ці перетворювачі для живлення IoT пристроїв через низьку енергію п'єзоперетворювача;

- для збільшення напруги вихідного сигналу п'єзоперетворювачів перспективним є застосування доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, асиметричних біморфних п'єзоелементів та виконання цих перетворювачів у консольному закріпленні;

- існуючі теоретичні та практичні положення не дозволяють ефективно застосовувати існуючі рішення побудови п'єзоперетворювачів в якості елементів накопичення енергії для живлення IoT пристроїв.

Отже, в роботі поставлено задачу сформулювати теоретичні та практичні положення, які дозволять розробляти енергоефективні IoT пристрої на базі п'єзокерамічних перетворювачів, а саме розробити моделі та засоби побудови енергоефективних IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів

Таким чином, в роботі, на основі проведеного аналізу, побудовано структурно-логічну схему дисертаційного дослідження, що показана на рис. 1.9.

Крім того, для досягнення поставленої мети визначені та розв'язані такі задачі:

- провести аналіз існуючих засобів і моделей живлення IoT пристроїв на базі п'єзоперетворювачів з метою визначення шляхів їх покращення;

- отримати аналітичні вирази розрахунку параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміки для проектування п'єзоперетворювачів зі збільшеним рівнем вихідного сигналу;



Рис. 1.9. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

- розробити функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів для розрахунку лінійних розмірів п'єзоелементів та біморфних і консольних металевих пластин;
- розробити математичну модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення із врахуванням енергії, що генерується п'єзокерамічними перетворювачами, для побудови IoT пристроїв з подовженим терміном роботи;
- розробити та дослідити зразки IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів;
- впровадити результати дослідження.

### **1.7 Висновки до розділу 1**

Проведений в роботі аналіз виявив існуючі недоліки у відомих рішеннях побудови енергоефективних IoT пристроїв, а також дозволив визначити необхідні шляхи їх удосконалення.

1. Аналіз ринку IoT пристроїв показав постійне збільшення кількості IoT пристроїв, причому збільшення долі мобільних IoT пристроїв, для яких однією з важливих характеристик є живлення від автономних джерел енергії, таких як батарейне / акумуляторне живлення або відновлювальних джерел енергії (сонячна енергія, енергія вітру, вібрації тощо).

2. Аналіз способів живлення IoT пристроїв показав, що перевагу мають IoT пристрої з комплексним живленням: суміщення батарейного (акумуляторного) живлення та живлення від джерел відновлювальної енергії.

3. Аналіз різних типів перетворення енергії показав, що найперспективнішим джерелом енергії є п'єзокерамічні перетворювачі. Через велику кількість своїх переваг та особливостей використання мобільних IoT пристроїв вони мають безумовну перевагу перед іншими

джерелами відновлювальної енергії для їх використання в якості джерел енергії в IoT пристроях.

4. Аналіз існуючих конструкції пристроїв з живленням від енергії п'єзоперетворювачів показав, що існуючі рішення мають ряд недоліків: великі розміри ПП, необхідність великого механічного впливу на ПП, мале значення енергії, що генерується ПП. Ці недоліки не дозволяють використовувати сучасні конструктивні рішення побудови ПП для живлення IoT пристроїв.

6. Аналіз прикладів використання п'єзокерамічних перетворювачів в якості джерел енергії показав, що підвищення вихідної напруги п'єзокерамічних перетворювачів можливе за рахунок застосування трьох методів:

- застосування доменно-дисипативних п'єзоелементів;
- застосування асиметричних біморфних п'єзоелементів;
- виконання цих перетворювачів у консольному закріпленні.

Досліджень консольних асиметричних доменно-дисипативних перетворювачів при їх консольному закріпленні до сьогодні не відбувалося. А отже, для побудови енергоефективних IoT пристроїв з подовженим терміном роботи від джерела живлення на основі ПП необхідно розробити відповідні моделі ПП.

7. Розроблено структурно-логічну схему дисертаційного дослідження, визначено основні задачі та етапи роботи, а також послідовність їх виконання.

## РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛІ ПОБУДОВИ КОНСОЛЬНОГО АСИМЕТРИЧНОГО БІМОРФНОГО ДОМЕННО-ДИСИПАТИВНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

В першому розділі було показано, що застосування доменно-дисипативних властивостей ПП дозволяє підвищити рівень вихідного сигналу, що є вельми важливим і актуальним для ПП при проектуванні IoT на їх базі, оскільки це подовжує термін їх роботи від джерела енергії на основі ПП. Цього ефекту можна досягти за рахунок правильного вибору форми п'єзоелементу, а також форми та розмірів електродів, що дозволяє відповідно забезпечувати просторове співвідношення основних векторних величин:  $P$  – вектора поляризації,  $F$  – вектора сили, що впливає на ПП та  $E$  – вектора напруженості поля між вихідними електродами. Як відомо, при перпендикулярному розташуванні векторів  $P$  та  $E$ , тобто при ДДП, можна досягти більшої чутливості п'єзоелемента ніж при їх традиційному паралельному розташуванні [69, 72, 73, 122, 126, 129, 130, 138-141, 143-145].

Для правильного вибору форм та розмірів ПП та електродів на ньому, що є необхідним при проектуванні енергоефективних IoT пристроїв, необхідно більш детально розглянути доменну структуру п'єзоелемента, яка безпосередньо впливає на основні параметри і характеристики п'єзоелемента.

#### **2.1 Аналіз орієнтаційних ефектів доменів в п'єзокераміці на основні параметри п'єзоелемента**

Одним з головних параметрів, який використовують розробники при проектуванні виробів на базі ПП, є значення п'єзомодуля, який по значенню сили, що діє на п'єзоелемент, дає значення заряду, що утворюється на електродах ПП. Механічна сила, що діє на п'єзоелемент, перетворюється у

механічну напругу, що впливає на структуру п'єзоелемента і приводить до утворення зарядів на гранях елемента [122].

При розміщенні п'єзоелемента на консольній пластині відбувається його неоднорідна механічна деформація: вільний кінець (той, що ближче до вільного кінця консольної пластини) піддається більшій деформації ніж кінець п'єзоелемента, що знаходиться ближче до основи. В роботах [16, 36] було показано, що коректність визначення п'єзомодулів у п'єзокераміці в значній мірі залежать від однорідності напруженого стану в п'єзоелементі. В [9] на прикладі п'єзокерамік ЦТС-19 та ЦТС-23 (ті самі типи керамік, які й були розглянуті в експериментальних дослідженнях, що описані в розділі 4 дисертаційної роботи) було показано, що залежності значень п'єзомодуля мають максимуми в залежності від різних значень механічної напруги. Ефект пояснювався пружними стисками гребінців мікронерівностей, які існують на контактних поверхнях. В результаті такого стискання збільшується площа контакту, а отже, пропорційно росте величина заряду. При деяких значеннях відбувається втрата стійкості доменної структури, переорієнтація доменів тощо. Це означає, що для визначення значення п'єзомодуля, а отже, втрати енергії, яку генерує п'єзокерамічний перетворювач, необхідно розглянути доменну структуру п'єзоелемента.

### 2.1.1 Вплив механічної напруги на значення п'єзомодуля

Як відомо, властивості п'єзокераміки в тому чи іншому напрямку залежать від орієнтації доменів по відношенню до обраного напрямку. Спочатку розглянемо, як п'єзополаризація залежить від величини механічної напруги.

Поларизація кераміки  $P$  складається з суми кількох елементів [35, 72]:

– залишкової п'єзополаризації  $P_3$ , існуючої в кераміці до моменту впливу сили;



– орієнтаційної п'єзополаризації  $P_O$ , що враховує доменні процеси в кераміці;

– індукованої п'єзополаризації  $P_I$ , пов'язаної зі зміною спонтанної поларизації  $P_C$  окремих доменів в результаті впливу.

Відповідно до цього, п'єзоефект в п'єзокераміці описується трьома значеннями п'єзомодулів: диференціальним  $d_d$ , індукованим  $d_I$  та орієнтаційним  $d_O$ .

Значення перших двох широко розглянуті в [35]. В даному дослідженні більший інтерес представляє орієнтаційний п'єзомодуль, який дорівнює відношенню зміни п'єзополаризації, викликаного доменними переорієнтаціями під дією збільшення  $d\sigma$ , до величини цього приросту [72]:

$$d_O = \left( \frac{dP_O}{d\sigma} \right)_{t,E}. \quad (2.1)$$

Значення орієнтаційної п'єзополаризації визначається виразом [35, 72]:

$$P_O(\sigma) = 0,43P_C \int_0^{\sigma} \left( 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma} \right) \frac{\sigma_c}{\sigma^2} e^{-\frac{\sigma_c}{\sigma}} d\sigma_c. \quad (2.2)$$

Після перетворень з урахуванням (2.1) отримаємо:

$$d_O(\sigma) = 0,43P_C \frac{d}{d\sigma} \left( 1 + e^{-\frac{\sigma_c}{\sigma}} \left( 1 + 2 \frac{\sigma_c}{\sigma} \right) - 2 \frac{\sigma_c}{\sigma} \right). \quad (2.3)$$

Залежність значення орієнтаційного п'єзомодуля від величини стиснення для розглядаемого випадку (при відповідних трьох основних векторах) наведена на рис. 2.1.

Повна п'єзополаризація, що визначає повний заряд, який виділився при заданому  $\sigma$ , є сумою залишкової, орієнтованої та індукованої п'єзополаризації і має вигляд [35, 72]:

$$P_{\Sigma} = P_3 - P_O + P_I. \quad (2.3)$$

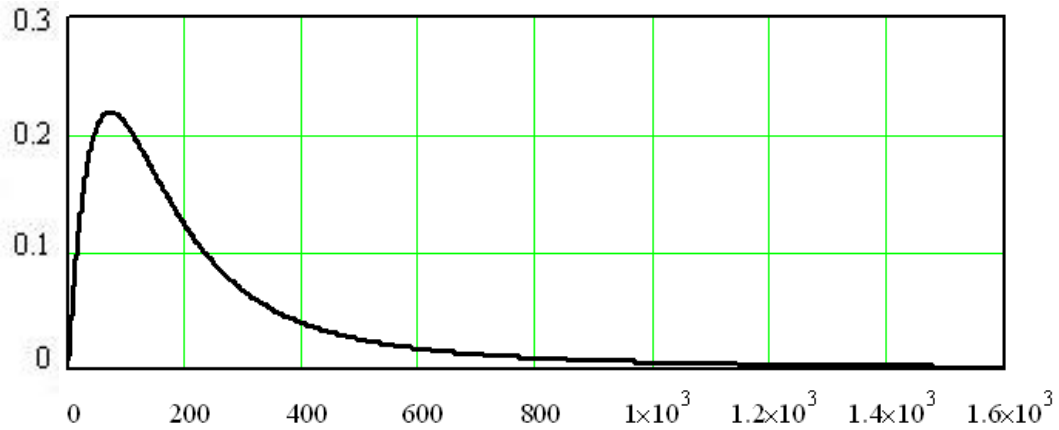


Рис. 2.1. Залежність орієнтаційної п'єзополаризації від значень механічного стиснення

Тоді значення повного п'єзомодуля від механічного виразу при постійному полі  $E$  і температурі  $t$  визначається виразом:

$$d_{ij} = \left( \frac{dP_{\Sigma}}{d\sigma} \right)_{t,E} - \left( \frac{dP_O}{d\sigma} \right)_{t,E} + \left( \frac{dP_I}{d\sigma} \right)_{t,E,P_O}. \quad (2.4)$$

У цьому випадку, з урахуванням виразів (2.1), (2.3), а також беручи значення інших елементів з [72], отримаємо залежність повного п'єзомодуля від механічної напруги, яка показана на рис. 2.2.

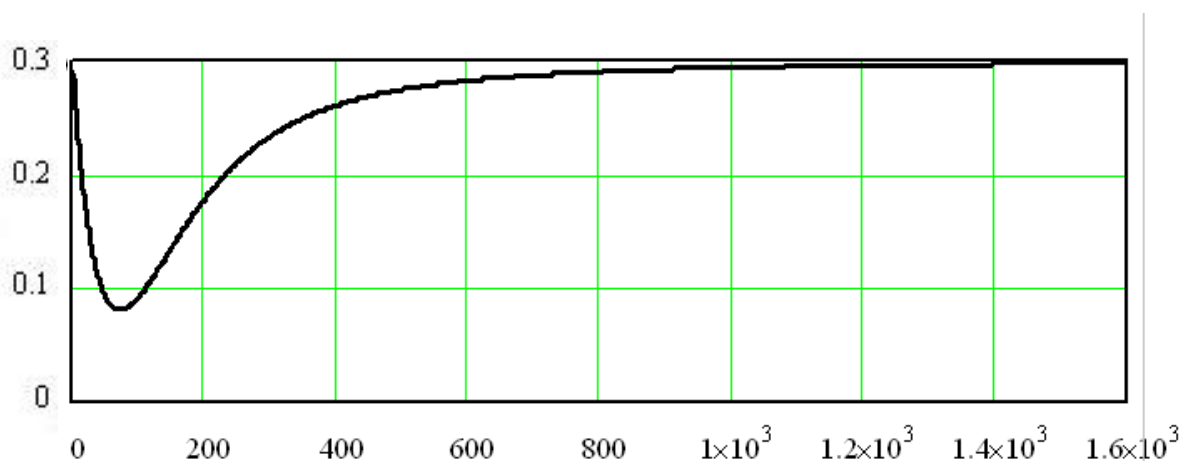


Рис. 2.2. Залежність значення повного п'єзомодуля від значень механічного стиснення

Як видно з рис. 2.1 та 2.2, залежність п'єзомодуля від механічної напруги не має пропорційний характер і має свої максимуми при певних значеннях механічної напруги. Це повністю підтверджує експериментальні результати, отримані в [9]. Для наведеного дослідження це означає, що при розробці ПП для IoT пристрою не можна керуватися простою формулою: більшість енергії, при дотриманні граничних значень механічної напруги, отримується при більших деформаціях ПП. А отже, для максимальної передачі енергії від ПП до накопичувача в IoT необхідно проводити відповідні розрахунки для визначення необхідних механічних напруг, що утворюються в ПП.

Крім того, з рис. 2.2 виходить ще два важливих висновки:

- малим значенням п'єзомодуля відповідає деяка механічна напруга (за рис.2.1 приблизно  $100 \text{ Н/м}^2$ ), що відповідає випадку знаходження ПП не на краю консольної пластини, а ближче до основи;

- зі збільшенням різниці механічних напруг суттєво змінюється значення п'єзомодуля, що означає, що для більш точних розрахунків необхідно дотримуватися незначної різниці між значеннями механічних напруг в різних частинах п'єзоелемента.

Таким чином, найкращим рішенням є розміщення малих за діаметром п'єзоелементів ближче до краю консольної пластини, при умові якомога довшої довжини консольної пластини (для рівномірності механічної деформації, яка тим менше, чим довше пластини).

### 2.1.2 Дослідження впливу напрямку трьох основних векторів на значення п'єзомодуля

Розглянемо, як впливає просторове розташування трьох зазначених вище основних векторів на значення п'єзополаризації.

П'єзокераміка є складним матеріалом, який охоплює в себе як електричні так і механічні властивості [122], а отже її опис є дуже непростим завданням. Для подальших досліджень введемо деякі допустимі спрощення [16, 72]:

- проігноруємо взаємодію між доменами в кераміці;
- не братимо до уваги також перехідний процес переполаризації, тобто будемо вважатися цей процес миттєвим;
- не буде враховуватися вплив пористості та інших дефектів;
- не будемо розглядати тангенціальні компоненти тензора напружень, а тільки нормальні складові.

Крім того, на відміну від випадків, що розглядалися для мономорфних зразків [16, 72] необхідно додати відмінності:

- необхідно розглядати процеси при більших механічних напругах, що відбуваються при згінних коливаннях в консольних асиметричних біморфних п'єзопластинах;

- товщини асиметричних біморфних п'єзопластин значно менше за розглянуті раніше товщини п'єзоелементів; це означає, що конструктивно для отримання доменно-дисипативних властивостей при поляризації зразка по товщині, а розміщення електродів на поперечних гранях можна розглядати лише невеликий діапазон кутів біля 90 градусів.

П'єзокерамічний елемент можна представити як систему довільним чином орієнтованих доменів, де для врахування процесів, що пов'язані з ними, необхідно ввести систему координат [36, 72]. В цій системі зв'яжемо з керамікою вісі  $X, Y, Z$ , а з доменом – вісі  $X', Y', Z'$  (рис. 2.3). Відповідно напрям вектора спонтанної поляризації домена збігається з віссю  $OZ'$ .

Припустимо, що вектор поляризації керамічного елемента паралелей вісі  $Z$ . Крім того, дії вектора прикладеної сили також направлена вздовж осі  $Z$ , тобто, в тензорі механічних напружень  $\sigma_{33}$  якесь чисельне (не нульове) значення має лише одна складова.

Відповідно до введеної системи координат напрям вісі домену можна охарактеризувати кутами  $\delta, \beta, \gamma$ .

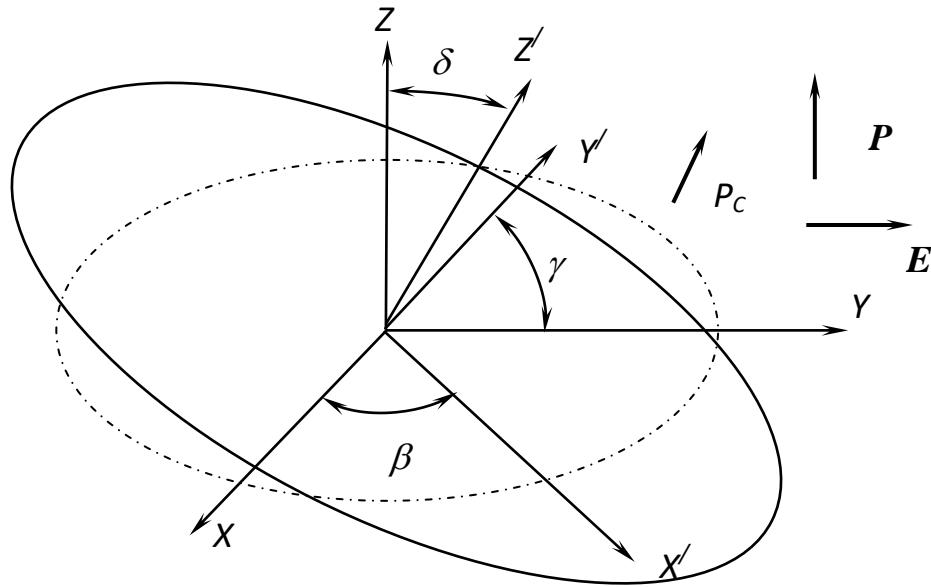


Рис.2.3. Введена система координат

При використанні відомих перетворень [36, 72] тензора напружень від однієї до іншої системи координат, отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma'_{11} = \sigma_{33} \sin^2(\beta) \sin^2(\delta), \\ \sigma'_{22} = \sigma_{33} \cos^2(\beta) \sin^2(\delta), \\ \sigma'_{33} = \sigma_{33} \cos^2(\delta). \end{cases} \quad (2.5)$$

При досягненні деякого критичного значення стиснення, домен втрачає стійкість і відбувається переорієнтація вектора спонтанної поляризації до іншої вісі – відповідно або  $X'$ , або  $Y'$ . Умову втрати стійкості та переорієнтації вектора спонтанної поляризації можна записати у формі [36]:

$$\begin{cases} \cos^2(\delta) - \sin^2(\delta) \sin^2(\beta) \geq \frac{\sigma_c}{\sigma}, \\ \sin^2(\beta) < \cos^2(\beta). \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} \cos^2(\delta) - \sin^2(\delta) \cos^2(\beta) \geq \frac{\sigma_c}{\sigma}, \\ \cos^2(\beta) < \sin^2(\beta). \end{cases} \quad (2.9)$$

В роботах [16, 36] розглянуті умови переорієнтації всіх доменів та навпаки – умови відсутності такої переорієнтації. Для стабільної роботи ПП більший інтерес представляють умови відсутності їх переорієнтації. Це виконується при дотриманні умов:

$$\cos^2(\delta) < \frac{\sigma_c}{\sigma}, \quad (2.10)$$

або

$$\delta > \arccos \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma}}. \quad (2.11)$$

Візуалізацію виразу (2.11) представлено на рис. 2.4. Розрахунки проведені для трьох значень критичної механічної напруги домену:

- $\sigma_c = 100 \text{ Н/м}^2$ , при якій відбувається мінімальне значення п'єзомодуля (згідно з рис. 2.2);
- $\sigma_c = 500 \text{ Н/м}^2$ , при яких починається квазілінійна залежність п'єзомодуля від механічної напруги у зразку;
- $\sigma_c = 1000 \text{ Н/м}^2$ , при яких залежність п'єзомодуля від механічної напруги у зразку можна вважати лінійною.

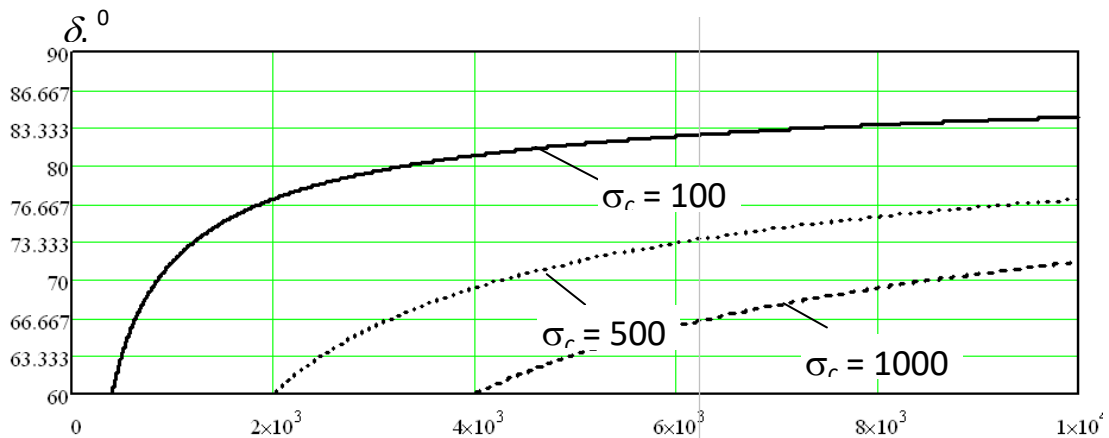


Рис.2.4. Залежність кута відсутності переорієнтації всіх доменів від критичної механічної напруги

З рис. 2.4. видно, що відсутність переорієнтації доменів від значень критичного механічного напруги домену у досліджуваному діапазоні близько 90 градусів, що характерно для тонких біморфних п'єзоелементів, відбувається при якомога менших значеннях критичної механічної напруги.

Звідси випливає висновок, що для стабільного значення п'єзомодуля потрібно з одного боку якомога більше значення механічної напруги (за результатами рис. 2.2), а з іншого боку якомога менше (за результатами рис. 2.4). Таким чином, існує певний діапазон значень механічної напруги, в межах якої значення п'єзомодуля максимально стабільні.

Визначимо тепер значення п'єзополаризації в залежності від кута  $\delta$ , коли вектор прикладеної сили паралелює основній осі.

Коли вектор прикладеної сили паралельний осі  $Z$ , поляризація буде зменшуватися на величину  $P_0$  за рахунок переорієнтації доменів при виконанні умов (2.8) та (2.9).

Значення орієнтаційної п'єзополаризації дорівнює [16, 72]:

$$P_0 = \frac{P_c}{4\pi\rho_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(\delta) \sin(\delta) \rho(\delta, \beta, \gamma) d\delta d\beta, \quad (2.12)$$

де  $\rho(\delta, \beta, \gamma)$  – щільність розподілу вісей домену.

Після відповідних перетворень з врахуванням виразу повної поляризації отримаємо значення для повного п'єзомодуля:

$$d_{ij} = \frac{d}{d\sigma} \left\{ \frac{4P_C}{\pi} \left[ \frac{\pi}{12} \left( 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma} \right) + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma} \right) \left( \frac{\arcsin x}{1+x^2} - \frac{\arctg \sqrt{2} \cdot x}{\sqrt{2(1-x^2)}} \right) \right] \right\}_{0}^{x_1} \quad (2.13)$$

$$\text{де } x_1 = \sqrt{\frac{\cos^2(\delta) - \frac{\sigma_c}{\sigma}}{\sin^2(\delta)}}.$$

Залежності п'єзополаризації від кута  $\delta$  при трьох досліджуваних значеннях критичної механічної напруги показані на рис. 2.5.

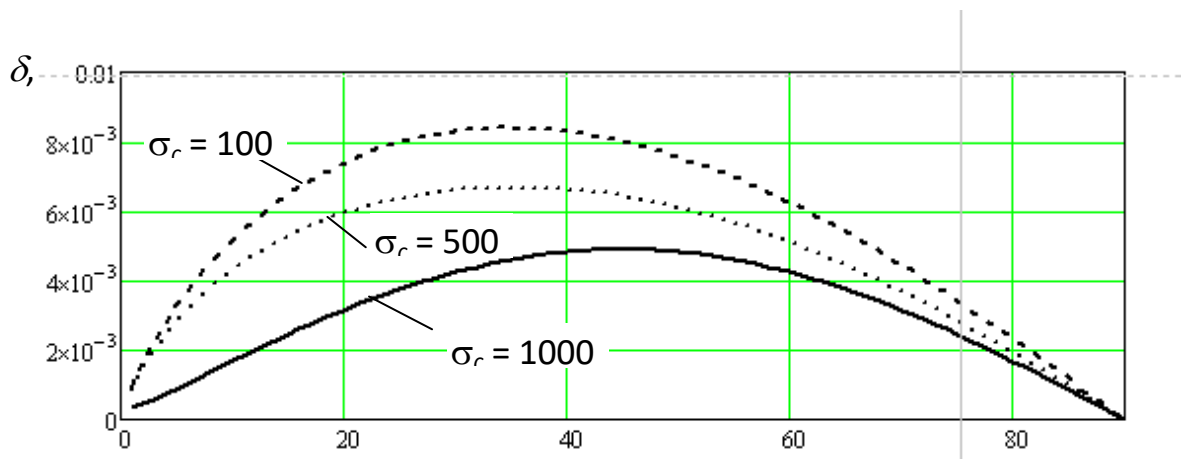


Рис. 2.5. Залежність повного п'єзомодуля від кута  $\delta$

Як видно з рис. 2.5, значення п'єзомодуля має характерний максимум, який зміщується вліво (к меншим значенням кута) при зменшенні механічної напруги. При чому, більші значення не в області 90 градусів, що відповідають властивостям ДДП, а ближче до 30–50 градусів. Це означає, що в певній області механічних напруг перевагу мають не перпендикулярні значення кутів між векторами поляризації  $\mathbf{P}$  та напруженості поля між вихідними електродами  $\mathbf{E}$ , а якомога конструктивно менший можливий кут. Емпірично цей кут обраний в межах 80-85 градусів.

Розглянемо далі значення орієнтаційного та повного п'єзомодуля для випадку дії поперечного впливу вектора сили.

Для цього випадку вісь поляризації направлена паралельно вісі  $X$ .

Аналітичні дослідження показали, що за умови відсутності переорієнтації всіх доменів вираз (2.11) не зміниться.

Визначимо тепер значення п'єзомодуля в залежності від кута  $\delta$  при поперечному стиску.

З урахуванням виразів з [16, 72] та перетворень, включаючи вирази (2.1), (2.3) та (2.4), отримаємо:



$$d_{ij} = \frac{d}{d\sigma} \left\{ \frac{8P_c}{\pi^2} \int_{\frac{\pi}{2}-\delta}^{\frac{\pi}{2}} \sin(\delta) d\delta \int_0^{\beta_1} d\beta \cdot \arcsin \sqrt{\frac{\cos^2(\delta) - \frac{\sigma_c}{\sigma}}{\sin^2(\delta)}} \cdot \sin(\delta) \cos(\beta) \right\} \quad (2.14)$$

де  $\beta_1 = \arccos \frac{\cos(\delta_0)}{\sin(\delta)}$ .

Залежність повного п'єзомодуля від кута  $\delta$  для різних значень механічної напруги наведена на рис. 2.6.

Висновок, який отримано з аналізу рис. 2.6 приблизно відповідає висновку з попереднього рисунку. Проте, на відміну від залежностей на рис. 2.5, в даному випадку немає вираженого максимуму.

Причому так само, як і в висновку за результатами досліджень, що представлені на рис. 2.2, перевагу мають конструкції з більшим механічним напруженням, що відповідає випадку розміщення п'єзоелемента ближче до вільного краю консольної пластини та виготовлення якомога довшої консольної пластини.

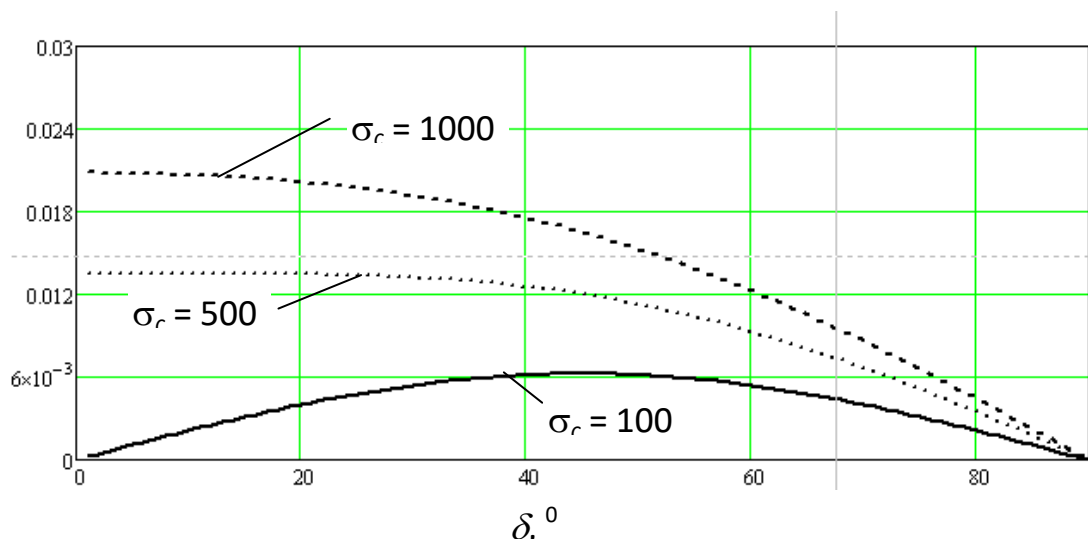


Рис. 2.6. Залежності повної п'єзополаризації від кута  $\delta$

На рис. 2.7 показана залежність повної п'єзополаризації від значень кута та механічної напруги в тривимірному зображенні.

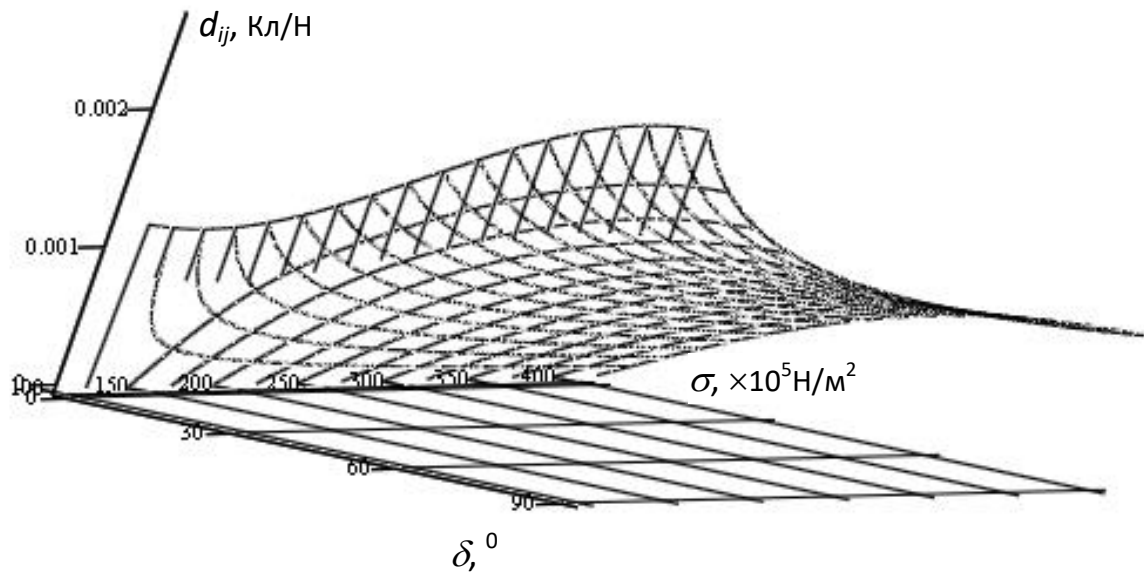


Рис. 2.7. Значення залежності повного п'єзомодуля від кута та механічної напруги

### 2.1.3 Визначення п'єзомодулів при додатковій механічній дії

В попередніх підрозділах розглядалися випадки, коли п'єзоелемент знаходиться при постійному (квазіпостійному) впливі механічної напруги. Носимий IoT пристрій характеризується випадками спонтанних коливань, що не можна передбачити. Це характеризується випадковим додатковим впливом на п'єзоелемент. Це означає, що до п'єзокерамічного зразку поряд з постійним поперечним стисненням докладена вздовж будь-якої осі зразка ще змінна напруга  $\Delta\sigma$ , амплітуда якої мала в порівнянні з критичною механічною напругою, так що можна вважати, що напруга  $\Delta\sigma$  не викликає доменних переорієнтацій [16].

Якщо змінна напруга  $\Delta\sigma$  прикладена уздовж осей  $X$ ,  $Y$ , або  $Z$ , то зміна індукованої поляризації визначається п'єзомодулями  $d_{33}$ ,  $d_{32}$  та  $d_{31}$  відповідно виразами [72]:

$$\Delta P_I = d_{33}\Delta\sigma, \quad \Delta P_I = d_{32}\Delta\sigma, \quad \Delta P_I = d_{31}\Delta\sigma. \quad (2.15)$$

Частинка впливу кожного домена в значення п'єзомодуля визначається формулою:

$$d_{3i}^{(1)} = \sin(\delta) \cos(\beta) (C_i \cos^2(\delta) + D_i), \quad (2.16)$$

де  $C_1 = -d_{31} - d_{15}$ ;  $C_2 = -\frac{1}{3}C_1$ ;  $C_3 = -\frac{2}{3}C_1$ ;

$$D_1 = -d_{33}; \quad D_2 = \frac{\sin^2(\delta)}{3} C_1 + d_{33}; \quad D_3 = -\frac{\sin^2(\delta)}{3} C_1 + d_{31};$$

Здійснивши відповідні перетворення, отримаємо залежність значень п'єзомодуля від кута та механічної напруги [50]:

$$d_{3i} = d_{3i}^0 - \frac{2}{\pi^2} \int_0^{\frac{1}{4} \sin(\delta)} d\delta \cdot (C_i \cos^2(\delta) + D_i) \sqrt{\sin^2(\delta) - \cos^2(\delta)} \times \\ \times \arcsin \sqrt{\frac{\cos^2(\delta) - \frac{\sigma_c}{\sigma}}{1 - \cos^2(\delta)}}. \quad (2.17)$$

На рис. 2.8 та 2.9 наведено залежності основних п'єзомодулів  $d_{31}$  та  $d_{32}$  в тривимірному зображенні від кута при досліджуваних значеннях механічних напруг.

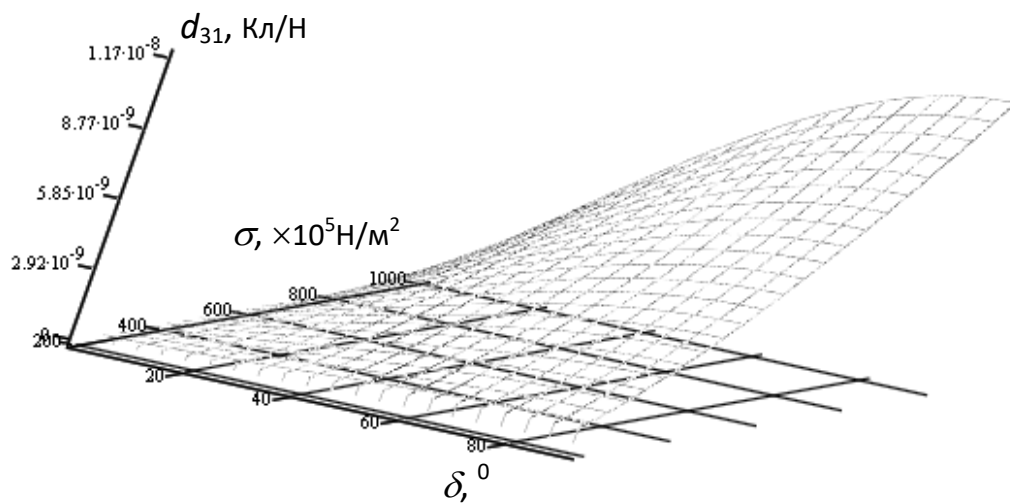


Рис. 2.8. Залежності значень п'єзомодуля  $d_{31}$  від кута  $\delta$  і механічної напруги

Як видно з рис. 2.8 та 2.9, основні параметри мають нелінійний характер і потребують розрахунків при проектуванні конструкцій ДДП.

Таким чином, отриманий аналітичний опис параметрів п'єзокерамічних елементів дозволяє визначати необхідну форму, розміри та розташування електродів для досягнення необхідних кутів між основними трьома векторами та значеннями механічних напружень, а отже, досягати максимального рівня вихідного сигналу.

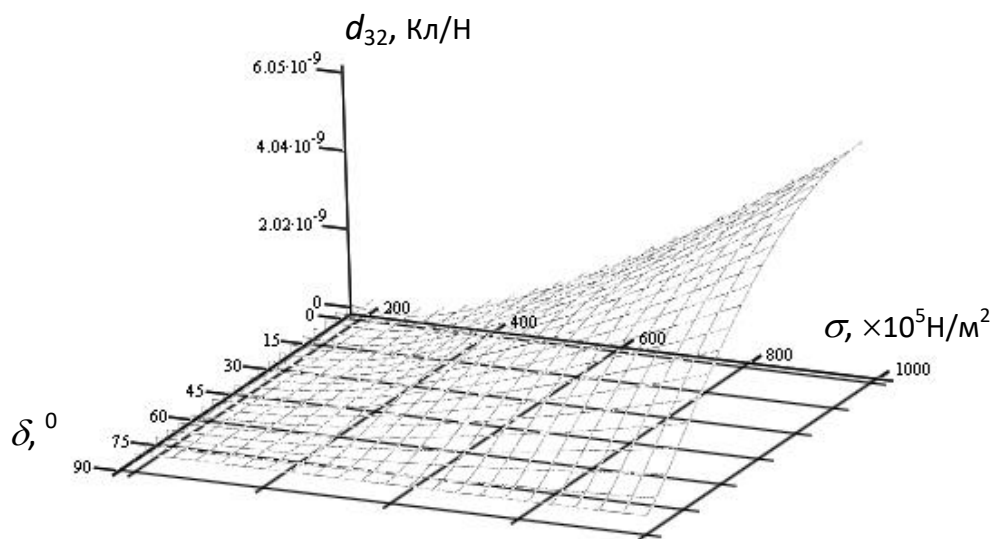


Рис. 2.9. Залежності значень п'єзомодуля  $d_{32}$  від кута  $\delta$  і механічної напруги

Таким чином, в результаті проведеного дослідження отримано перший науковий результат, а саме: отримав подальшого розвитку аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці за рахунок врахування конструктивних та фізичних параметрів біморфних п'єзоелементів, що дозволяє проектувати п'єзоперетворювачі зі збільшеним рівнем вихідного сигналу.

## 2.2 Розробка функціональних моделей консольних асиметричних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів

### 2.2.1 Визначення необхідності застосування функціональних моделей

Окрім розглянутого в попередньому пункті вибору форм та розмірів ПП та електродів, важливим питанням при проектуванні п'єзоперетворювачів для IoT пристроїв є визначення необхідних лінійних розмірів п'єзоелементів та металевих біморфних та консольних пластин. Визначимо методи досліджень, які найкраще підходять для виконання цієї задачі.

В першому розділі зазначалося, що найбільшу чутливість мають п'єзоперетворювачі в біморфному чи триморфному виконанні, коли поєднується використання п'єзоелемента з металевою пластиною. В разі використання асиметричних біморфних п'єзоперетворювачів чутливість збільшується у 10–20 разів у порівнянні з використанням мономорфних елементів. Асиметричні біморфні перетворювачі відрізняються більш простою технологією виготовлення, більшою механічною міцністю і складаються з металевої пластини з приклеєним до неї поляризованим по товщині плоским п'єзоелементом [122].

Такий перетворювач складається зі склеєних між собою круглих металевих і поляризованою по товщині п'єзокерамічної пластин радіусом  $R$  і  $r$  відповідно (рис. 2.10) [122]. Їх товщини позначені  $h_m$  і  $h_p$  відповідно. Для досліджень використовується циліндрична система координат  $r, \theta, z$ , вісь  $OZ$  якої збігається з віссю двохарового диска. Щодо поверхні  $z = 0$  координати поверхні розділу, нижньої поверхні п'єзоелемента і верхньої поверхні металевої пластини позначені відповідно  $z_0; z_1 = z_0 - h_p; z_2 = z_0 + h_m$  [122].

Під дією гармонійного навантаження, викликаного деформацією консольної пластини, яка через металеву пластину асиметричного перетворювача передається на п'єзоелемент, на розімкнутих електродах

п'єзоелемента генерується різниця потенціалів  $U_x e^{j\omega t}$ . Товщиною електродів, що покривають плоскі поверхні п'єзокерамічного диска і клейового з'єднання між пластинами, можна знехтувати.

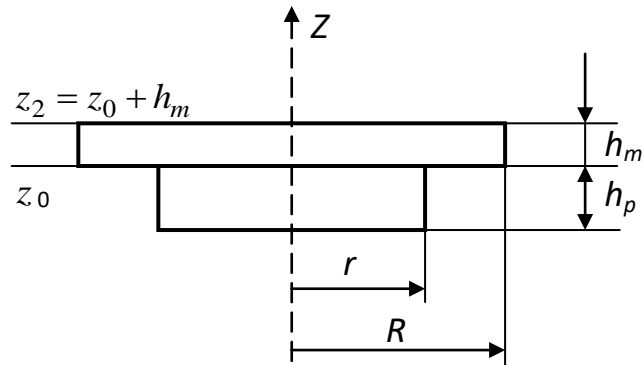


Рис. 2.10. Асиметричний біморфний п'єзоелемент [150]

Математична модель такого перетворювача побудована О. М. Шульгою та ін. [150]. Розроблене ними математичне моделювання добре підходить для мономорфних, але не ефективно для біморфних п'єзоелементів.

Для дослідження біморфних ПП найчастіше використовують схемотехнічне моделювання, де в якості моделі ПП використовується модель, наведена на рис. 1.6 [47, 52, 122].

Проте проблеми виникають при дослідженні кількох ПП, або при взаємозв'язку АБПП з консольною пластиною. Для зв'язку двох ПП використовують різні схемні рішення, які наведено на рис. 2.11 [72].

Проте такий опис доречний при поєднанні однакових за природою елементів, тобто п'єзокерамічних елементів. В розглядаємому в роботі випадку відбувається взаємопоєднання та взаємовплив один на іншого трьох елементів:

- п'єзокерамічного елемента;
- біморфної металевої пластини;
- консольної металевої пластини.

Проведені дослідження показали, що схемотехнічно неможливо побудувати достовірні та коректні моделі, що відповідають консольним асиметричним біморфним доменно-дисипативним ПП [50].

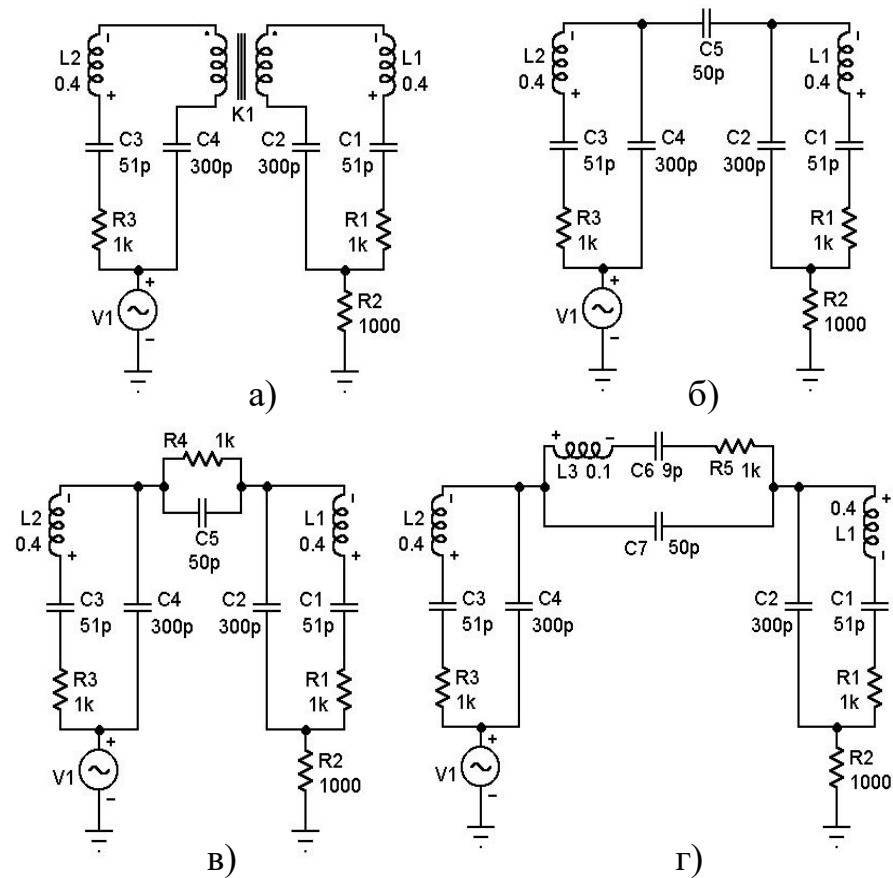


Рис. 2.11. Пов'язані п'єзокерамічні елементи [72]:

- а – з трансформаторної зв'язком; б – з зовнішньоємнісним зв'язком;  
в – зі зв'язком через RC-контур; г – зі зв'язком через RLC-контур

Тому в роботі було запропоновано функціональне моделювання п'єзоперетворювачів для визначення необхідних лінійних розмірів п'єзоелементів та пластин [50]. Таке моделювання враховує основні фізичні властивості компонента без врахування його схемотехнічного еквівалента. Як показано [72], результати, що отримані при дослідженні функціональних моделей повністю корелюються з результатами досліджень математичного та схемотехнічного моделювання.

Розглянемо покроково функціональні моделі:

- окремо доменно-дисипативного ПП;

- асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП;
- і, нарешті, консольного біморфного доменно-дисипативного ПП.

### 2.2.2 Функціональне моделювання доменно-дисипативного ПП

В роботах [72, 122] показано, що безумовні переваги мають підсилювачі заряду, які на сьогодні найбільш поширені у використанні з ПП. Вони абсолютно виключають вплив довжини сполучних кабелів на загальну чутливість відповідних комплектів і систем і, відповідно, допускають застосування з'єднувальних кабелів практично будь-якої довжини [122].

Схема традиційного п'єзоперетворювача з підсилювачем заряду показана на рис. 2.12 [50].

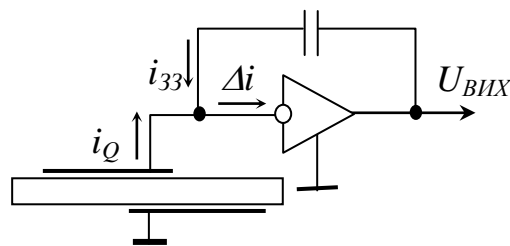


Рис. 2.12. П'єзоперетворювач з підсилювачем заряду

Схема перетворень зображена на рис. 2.13.

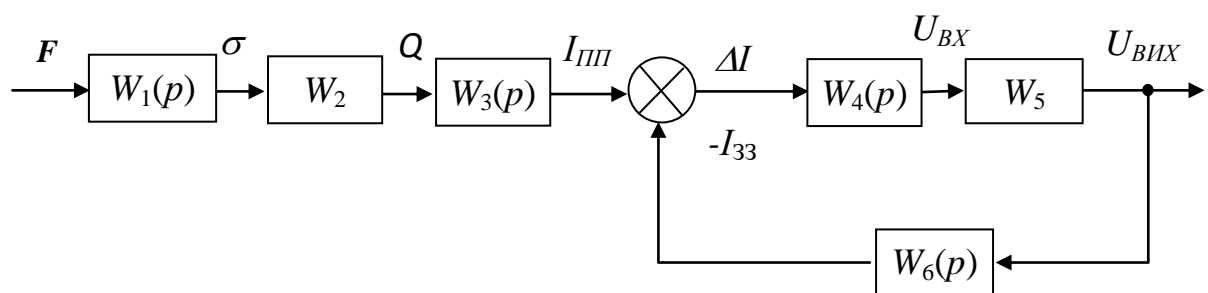


Рис. 2.13. Схема перетворень у п'єзоперетворювачі за рис. 2.12

Передаточні функції ланок описують наступні процеси:

$W_1(p)$  – перетворення сили  $F$ , діючої на п'єзоелемент, в механічне напруження  $\sigma$ ;



$W_2$  – перетворення механічної напруги в заряди на електродах п'єзоелемента;

$W_3(p)$  – перетворення зарядів у струм;

$W_4(p)$  и  $W_{11}(p)$  – перетворення струму в напругу, що подається на вхід підсилювача;

$W_5$  – підсилення підсилювача напруги;

$W_6(p)$  – перетворення вихідної напруги підсилювача у струм зворотного зв'язку підсилювача заряду.

Функціональна модель ДДП з підсилювачем заряду за 2.13, була промодельована в програмі з середовищем SxSAPR. Отримана в програмі модель зображена на рис. 2.14.

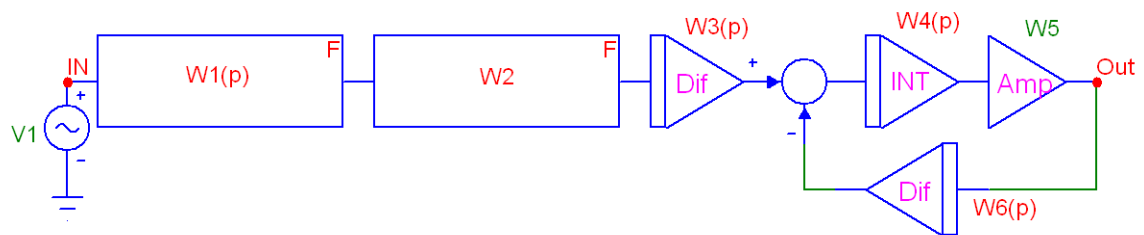


Рис. 2.14. Функціональна модель ДДП з підсилювачем заряду

Перша ланка  $W_1(p)$ , що відповідає перетворенню сили  $F$ , що діє на ПП, в механічну напругу  $\sigma$ , визначається виразом [72]:

$$W_1(p) = \frac{F_{\text{ПП}}}{\sqrt{m_{\text{ПП}}^2 \cdot (F_{\text{ПП}} p^2 - f)^2 + (2m_{\text{ПП}}\psi)^2 \cdot f^2}}, \quad (2.18)$$

де  $m_{\text{ПП}}$  – маса п'єзоелемента;

$\psi$  – коефіцієнт затухання системи;

$F_{\text{ПП}}$  – резонансна частота п'єзоелемента;

$f$  – частота, на якій проводиться дослідження.

Для опису ланки на операційному вигляді скористаємося методом електромеханічних аналогій, де еквівалентом сили є електрична напруга, а еквівалентом зміщення – електричний заряд [72] (Тут враховано, що механічне напруження пов'язане зі зміщенням через модуль Юнга). З огляду на еквівалентну схему п'єзоелемента по рис. 2.14 після перетворень отримаємо [72]:

$$W_1(p) = \frac{p[C_1 + C_2 + pC_1C_2(R + pL)]}{1 + pC_1(R + pL)}. \quad (2.19)$$

Тут ємність  $C_1$  відповідає ємності  $C$  з рис. 1.6,  $C_2$  – відповідає ємності  $C_{III}$ ,  $L$  – індуктивності  $L$ .

Друга ланка  $W_2(p)$ , що відповідає процесу перетворення механічної напруги в заряд  $Q$  на електродах п'єзоелемента, має значення [72]:

$$W_2(p) = \frac{Q}{\Delta\sigma} = d_{31}S, \quad (2.20)$$

де  $d_{31}$  – п'єзомодуль.

Для визначення третьої ланки (перетворення заряду  $Q$  в струм  $i_Q$ , який генерує п'єзоелемент), необхідно провести операцію диференціювання [72]:

$$W_3(p) = \frac{i_Q}{Q} = p, \quad (2.21)$$

де  $p$  – оператор Лапласа.

Така операція позначається на моделі відповідним значком «*Dif*» (див. рис. 2.14).

Ланка  $W_4(p)$  відповідає перетворенню сумарного струму зворотного зв'язку у напругу на вході підсилювача [72]:

$$U_{BX} = \frac{I}{C_{\Sigma}} \int i_Q dt, \quad (2.22)$$

де  $C_{\Sigma}$  – сумарна ємність, яка складається з ємності п'єзоелемента, ємності з'єднувального кабелю та ємності вхідного ланцюга підсилювача заряду. Також сюди слід віднести усі допоміжні ємності з'єднувачів.

Таким чином, ланка  $W_4(p)$  є інтегратором з коефіцієнтом  $1/C_{\text{ПП}}$ . В даному випадку ми нехтуємо усіма іншими ємностями окрім ємності п'єзоелемента:

$$W_4(p) = \frac{U_{BX}}{i_Q} = \frac{1}{pC_{\text{ПП}}}. \quad (2.23)$$

Ланка  $W_5$  відповідає процесу посилення підсилювача заряду. Для розрахунків, з емпіричного досвіду, це значення взято рівне 1000.

Ланка  $W_6(p)$  відповідає перетворенню вихідної напруги підсилювача  $U_{\text{ВИХ}}$  в струм зворотного зв'язку  $I_{33}$ , що протікає через конденсатор зворотного зв'язку операційного підсилювача.

$$U_{\text{ВИХ}} = \frac{I}{C_{2\Sigma}} \int i_{33} dt, \quad (2.24)$$

де  $C_{2\Sigma}$  – ємність, що складається з двох ємностей: конденсатора в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача та ємності вхідного ланцюга підсилювача.

Тоді, після перетворень, отримаємо [72]:

$$W_6(p) = \frac{i_{33}}{U_{\text{ВИХ}}} = C_{2\Sigma} p. \quad (2.25)$$

Отже  $W_6(p)$  – диференціатор з коефіцієнтом  $C_4$ .

Загальна передавальна функція такої системи набуде вигляду:

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{W_1(p)W_2W_3(\delta)W_4(p)W_5}{1 + W_4(p)W_5W_6(p)}. \quad (2.26)$$

Отримані залежності АЧХ і ФЧХ моделі представлені на рис. 2.15. Дослідження проведені для чотирьох значень опорів: 31 кОм, 21 кОм, 10 кОм і 1 кОм, що відповідає випадкам кутів  $\delta$  між векторами поляризації п'єзоелемента  $P$  та напруженості поля між вихідними електродами  $E$  рівними  $90^0$ ,  $85^0$ ,  $80^0$  та  $15^0$ .

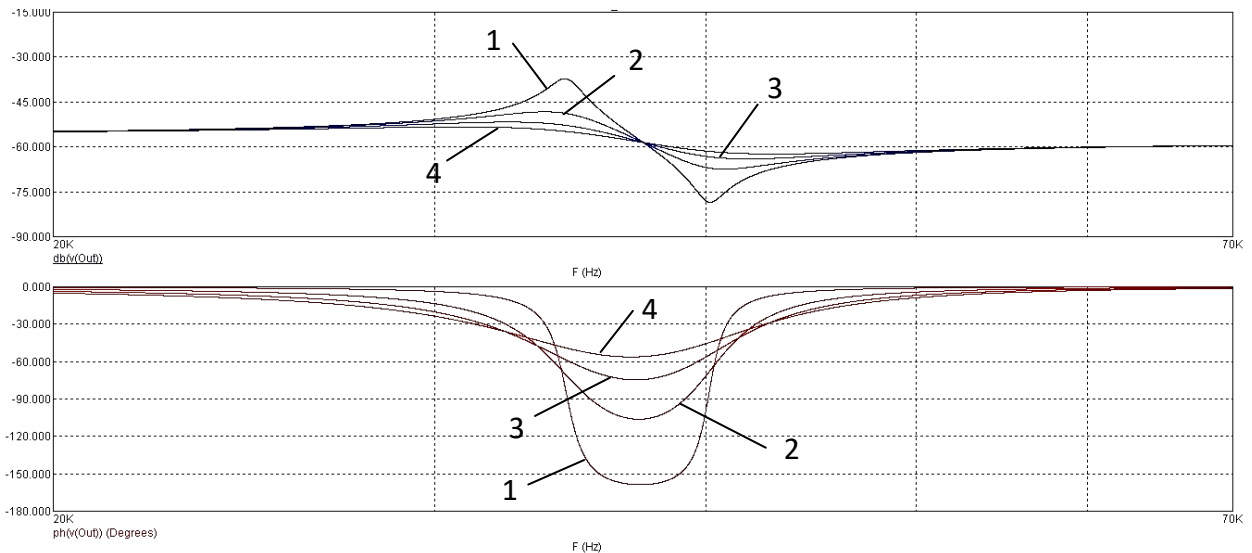


Рис. 2.15. АЧХ і ФЧХ п'єзоперетворювача з підсилювачем заряду:

$$1 - \delta = 90^0; \quad 2 - \delta = 85^0; \quad 3 - \delta = 80^0; \quad 4 - \delta = 15^0$$

Значення кутів взяті з міркувань побудови традиційних та доменно-дисипативних перетворювачів, які розглядалися в попередньому пункті. Кут  $15^0$  відповідає традиційному перетворювачу. Кути близько  $90$  градусів – досліджуваним перетворювачам. Як видно з рис. 2.15, перетворювачі, що запропоновані в роботі, мають більший рівень вихідної напруги. Крім того, експериментально проведені дослідження підтвердили співпадіння резонансних частот в експериментальному зразку та в досліджуваній моделі ( $34$  кГц), що говорить про достовірність отриманої функціональної моделі.

Перехідна характеристика показана на рис. 2.16.

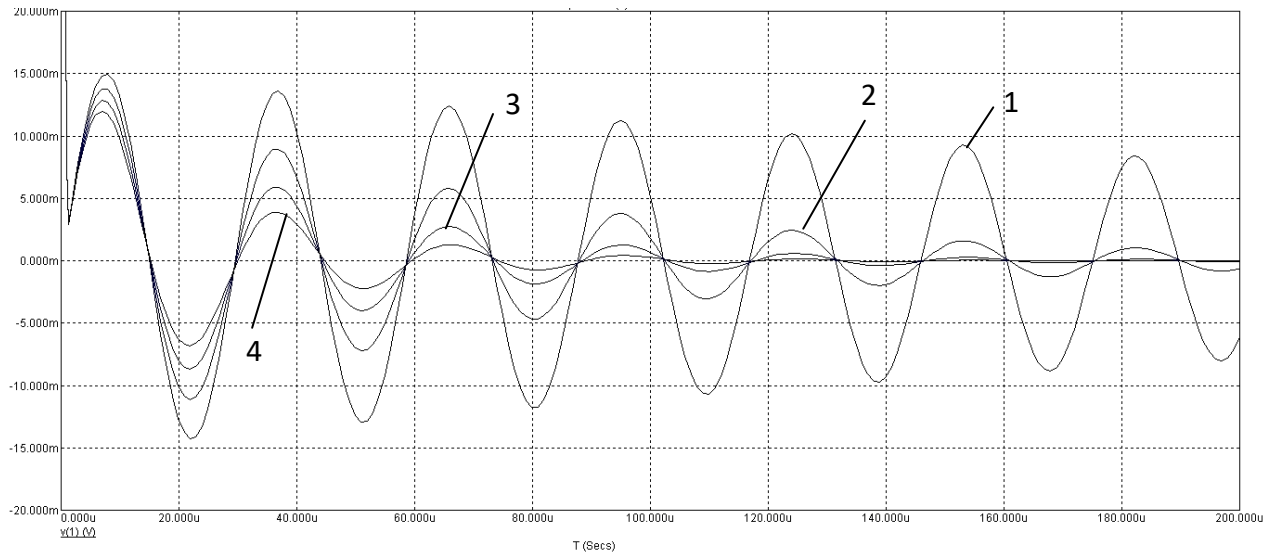


Рис. 2.16. Перехідна характеристика п'єзоперетворювача

з підсилювачем заряду:

$$1 - \delta = 90^{\circ}; \quad 2 - \delta = 75^{\circ}; \quad 3 - \delta = 60^{\circ}; \quad 4 - \delta = 50^{\circ}$$

### 2.2.3 Функціональне моделювання асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП

На підставі розглянутої вище моделі окремого ПП, функціональна модель асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП показана на рис. 2.17.

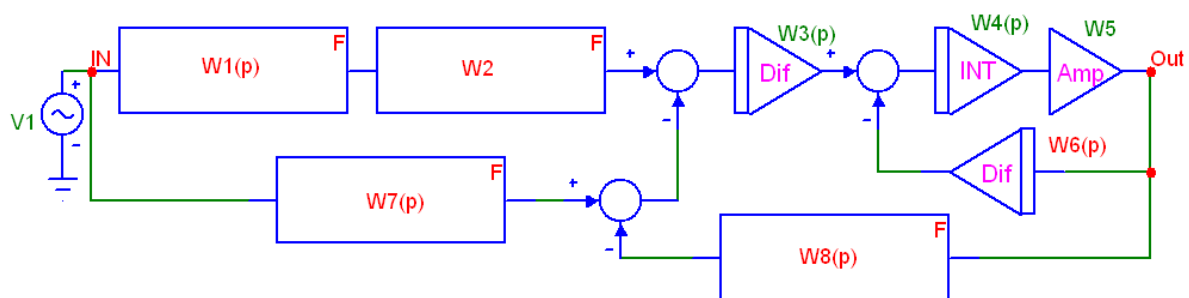


Рис. 2.17. Функціональна модель асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП

У даній моделі, у порівнянні з попередньою, додані дві ланки:  $W_7(p)$  – вплив сили на металеву пластину;  $W_7(p)$  – вплив п'єзоелемента на металеву пластину. Враховуючи коливальний характер металевої пластини, значення цих ланок визначаються згідно виразів (2.18) та (2.19), де методом електромеханічних аналогій лінійні розміри пластини прирівнюються відповідним значенням електричних складових еквівалентної схеми.

Передавальна функція в цьому випадку прийме вигляд:

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{W_3(p)W_4(p)W_5\{W_1(p)W_2(p) - W_7(p)\}}{1 + W_4(p)W_5W_6(p) - W_3(p)W_4(p)W_5W_8(p)}. \quad (2.27)$$

Беручи до уваги той факт, що окремо біморфна пластина не розглядається, усі частотні та часові характеристики доречно розглянути на прикладі завершеної конструкції – консольного асиметричного біморфного доменно-дисипативного п'єзоперетворювача.

#### 2.2.4 Функціональне моделювання консольного асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП

Зовнішній вигляд такого елемента зображено на рис. 2.18 (без зображення підсилювача заряду).

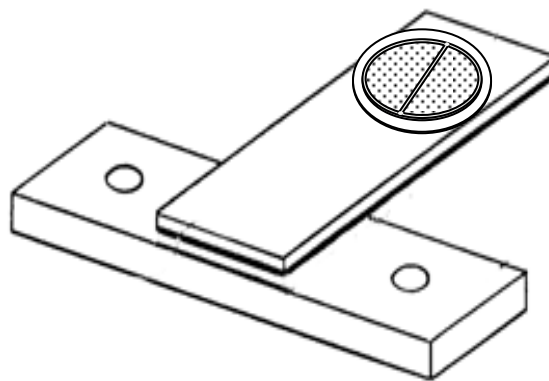


Рис. 2.18. Зовнішній вигляд консольного асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП

На підставі розглянутих вище моделей перетворювачів, функціональна модель консольного асиметричного біморфного доменно-дисипативного ПП з одним п'єзоелементом наведена на рис. 2.19 [50].

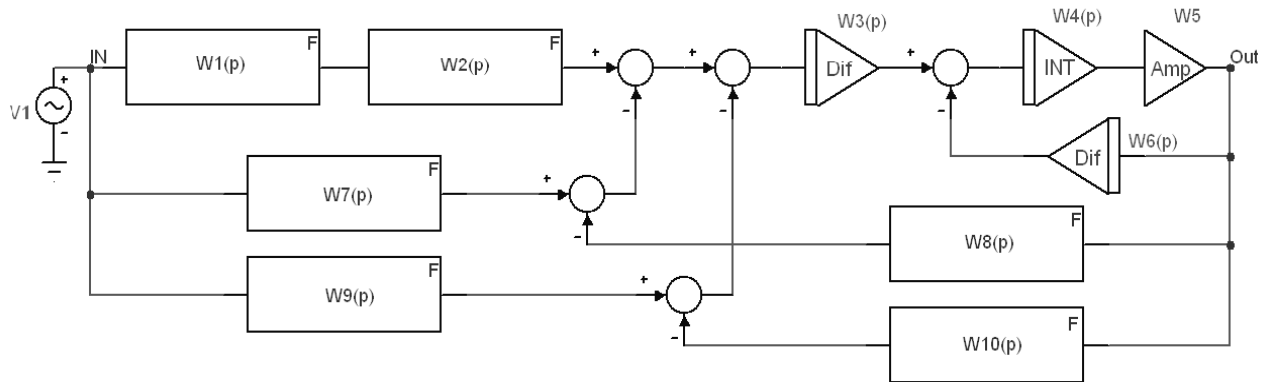


Рис. 2.19. Функціональна модель асиметричного біморфного доменно-дисипативного п'єзоперетворювача при його консольному закріпленні

Тут ланка  $W_1(p)$  відповідає процесу перетворення механічного впливу на ПП в механічну напругу;  $W_2(p)$  – перетворення механічної напруги в заряд на ПП;  $W_3(p)$  – перетворенню заряду в струм;  $W_4(p)$  – перетворенню сумарного струму у вхідну напругу  $U_{BX}$ ;  $W_5$  – підсиленню операційного підсилювача;  $W_6(p)$  – перетворенню вихідної напруги  $U_{ВИХ}$  в струм, що протікає через конденсатор зворотного зв'язку;  $W_7(p)$  – перетворенню механічного впливу на ПП в механічну напругу в металевій пластині біморфного ПП;  $W_8(p)$  – впливу ПП на деформацію металевої пластини біморфного ПП;  $W_9(p)$  та  $W_{10}(p)$  – відповідно ланкам  $W_7(p)$  та  $W_8(p)$  для консольної пластини.

По аналогії з описом ланок для біморфної пластини (ланки  $W_7(p)$  та  $W_8(p)$ ), ланки  $W_9(p)$  та  $W_{10}(p)$ , що описують процеси, які відбуваються в консольній пластині, їх значення визначається аналогічно ланкам для біморфної пластини, тільки, враховуючи різні розміри, змінюються значення відповідних елементів.

Передавальна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{W_2(p)W_3(p)W_4(p)W_5\{W_1(p) - W_7(p) - W_9(p)\}}{1 + W_4(p)W_5W_6(p) - W_2(p)W_3(p)W_4(p)W_5\{W_8(p) + W_{10}(p)\}}$$

На рис. 2.19 розглянутий випадок, коли металеві пластини біморфної та консольної пластин виконані з одного матеріалу, що цілком прийнятно з врахуванням вимог до використання мінімуму номенклатури матеріалів при розробці пристроїв. Якщо використані різні матеріали, тоді в схемі необхідно додати вплив ланок  $W_7(p)$  та  $W_8(p)$  на ланки  $W_9(p)$  та  $W_{10}(p)$  і навпаки.

В дисертаційному дослідженні за допомогою програмного пакета СхСАПР були досліджені АЧХ, ФЧХ, перехідні характеристики та реакції на спеціальні впливи схеми за рис. 2.19.

Так, на рис. 2.20, по аналогії з рис. 2.15 наведені АЧХ і ФЧХ для різних значень кутів  $\delta$  між векторами поляризації п'єзоелемента  $P$  та напруженості поля між вихідними електродами  $E$ .

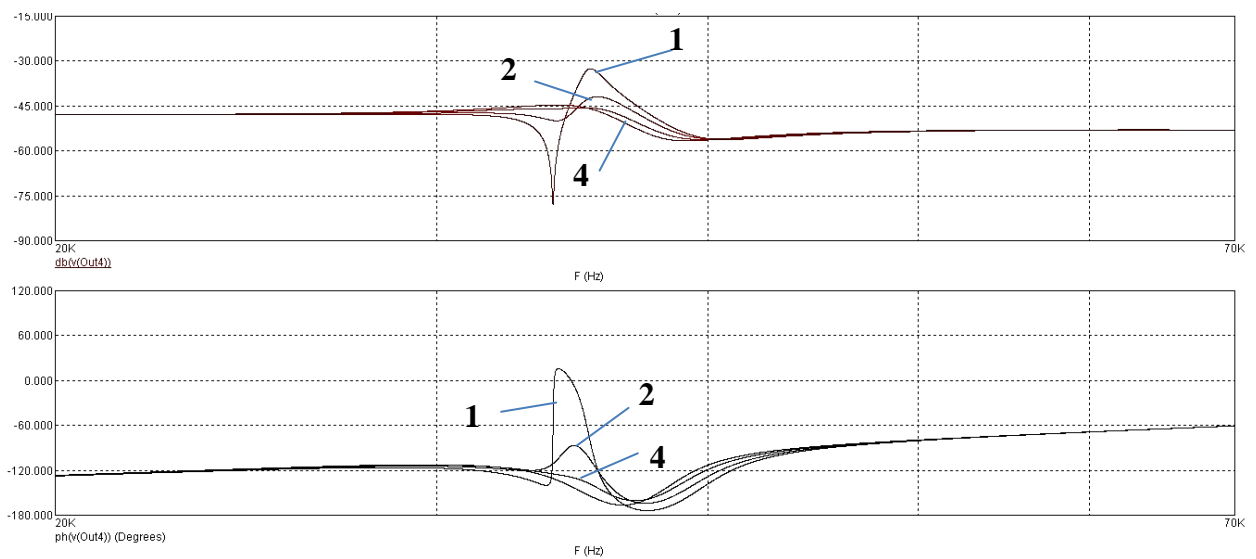


Рис. 2.20. АЧХ і ФЧХ п'єзоперетворювача з підсилювачем заряду:

$$1 - \delta = 90^0; \quad 2 - \delta = 80^0; \quad 3 - \delta = 60^0; \quad 4 - \delta = 15^0$$

Як видно з рис. 2.20, характеристики мають більш складний характер, що пояснюється більш складними процесами взаємодій біморфної та консольної пластин. Крім того, як і для випадку характеристик за рис. 2.15, для



розглядаємих характеристик підтверджується положення, що запропоновані в роботі перетворювачі мають більший рівень вихідної напруги.

Результати досліджень перехідної характеристики відповідають результатам, що представлені на рис. 2.16.

Отримані функціональні моделі дозволяють враховувати при проектуванні всі основні параметри та характеристики ПП та біморфної і консольної пластин. Для прикладу, на рис. 2.21 показані АЧХ для перетворювача при різних значення діаметру п'єзоелемента, де видно, що зі зміною радіуса змінюється як резонансна частота, так і значення вихідної напруги. Це повністю відповідає експериментальним результатам, а отже, також свідчить про адекватність побудованих моделей.

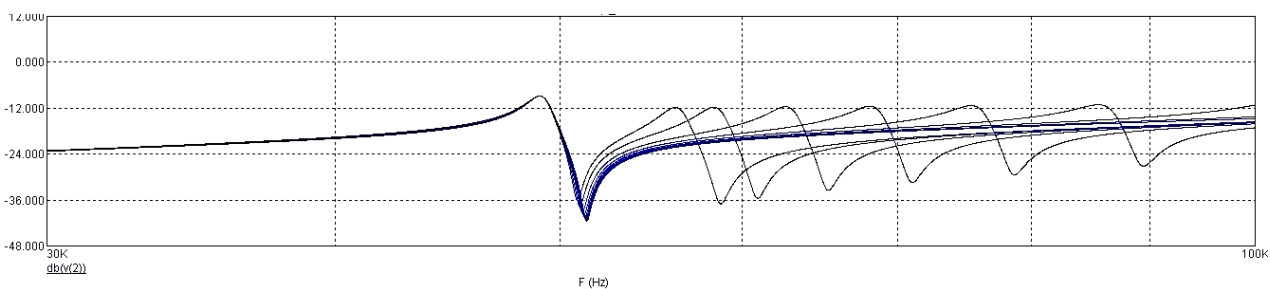


Рис.2.21. АЧХ для перетворювача при різних значення діаметру п'єзоелемента

Розглянемо далі відгуки перетворювача на спеціальні сигнали. На практиці, носимий IoT пристрій схильний до впливу на нього випадкових імпульсних сигналів. Такі впливи можна описати імпульсом з крутим переднім і спадаючим по експоненті заднім фронтом, що виникає в результаті будь-яких ударних впливів. Крім того, будь-який складний сигнал можна описати як суму таких імпульсних сигналів з різною амплітудою та довжиною спаду імпульсу.

Такий сигнал можна описати за допомогою відповідного джерела напруги складної форми з сигналом експоненціальної форми, який зображено на рис. 2.22.

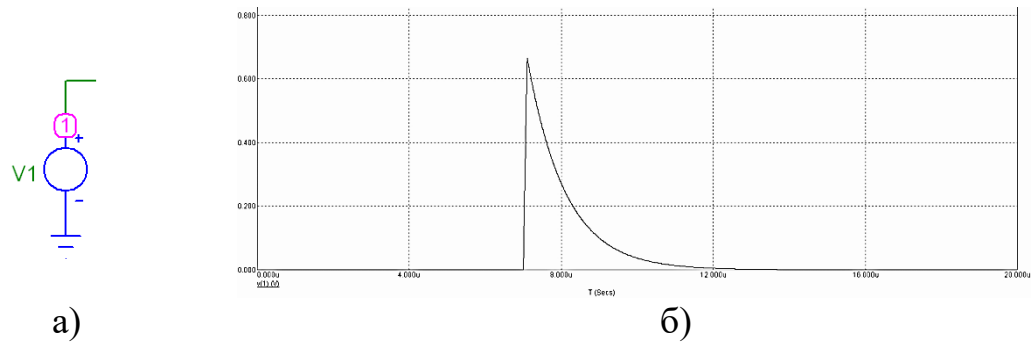


Рис. 2.22. Джерело с сигналу (а) та форма сигналу, що він генерує (б)

Відгуки моделі на сигнал спеціальної форми для двох випадків (при традиційній схемі – кут між векторами дорівнює  $10^0$ , та схемі, що пропонується, – кут дорівнює  $85^0$ ) показані на рис. 2.23.

Як слідує з аналізу характеристик за рис. 2.23, варіант перетворювача, що пропонується, має менші спотворення сигналу, що також говорить про переваги перетворювача.

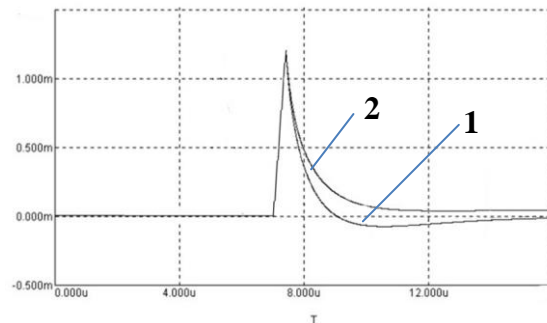


Рис. 2.23. Відгуки моделі на спеціальне вплив (у вигляді імпульсного сигналу, що спадає по експоненті – за рис. 2.21):

$$1 - \delta = 10^0; \quad 2 - \delta = 85^0$$

Розглянемо далі стійкість системи. Враховуючи той факт, що перетворювач має кілька резонансних елементів (один або декілька п'єзоелементів та біморфну та консольну пластини), виникає питання про стійкість системи, що не виникало резонансного режиму.

Для цього, в роботі розглянута стійкість системи за критерієм Найквіста. Для стійкості необхідно, щоб годограф діаграми Найквіста, при зміні частоти від 0 до нескінченності, не охоплював точку  $[-1, j0]$ .

Отриманий годограф Найквіста досліджуваного п'єзоперетворювача за схемою рис. 2.19 зображений на рис. 2.24.

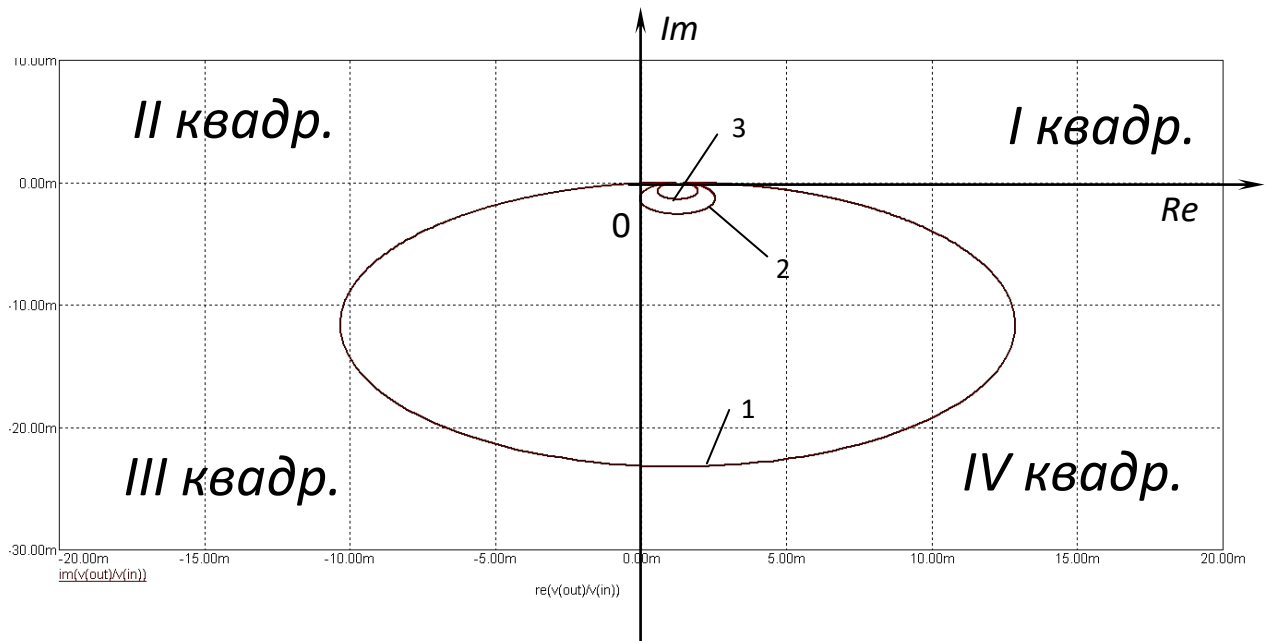


Рис. 2.24. Годограф Найквіста п'єзоперетворювача за схемою рис. 2.19:

$$1 - \delta = 90^0; \quad 2 - \delta = 80^0; \quad 3 - \delta = 15^0$$

На рис.2.24 комплексна площина розділена на чотири квадранта (по вісях координат). Як вже було зазначено вище, умовою стійкості є умова, коли годограф не охоплює точку з координатами  $[-1, j 0]$ , тобто, годограф повинен обов'язково проходити через квадранти II та III, що не відповідає випадку, що розглядається – з рис. 2.24 видно що годограф не проходить через II-й квадрант. Це означає, що досліджувані п'єзоперетворювачі є стійкими системами.

Отже, отримано другий науковий результат роботи, а саме: вперше отримані функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, що дозволяє розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів

і пластин при проектуванні п'єзоперетворювачів з максимальним рівнем вихідного сигналу.

### 2.3 Висновки до розділу 2

Дослідження впливу механічної напруги на значення п'єзомодуля виявило, що найкращим рішенням побудови консольних асиметричних біморфних п'єзоелементів є таке, при якому розміщення малих за діаметром п'єзоелементів ближче до краю консольної пластини, при умові якомога довшої довжини консольної пластини.

Дослідження впливу напряму трьох основних векторів на значення п'єзомодуля виявило, що існує певний діапазон значень механічної напруги, в межах якого значення п'єзомодуля максимально стабільні.

Отриманий аналітичний опис параметрів п'єзокерамічних елементів, що дозволяє визначати необхідну форму, розміри та розташування електродів для досягнення необхідних кутів між основними трьома векторами та значеннями механічних напружень, а отже досягати максимального рівня вихідного сигналу для живлення IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

Розроблені та досліджені функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів, які дозволяють розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів, а також металеві та консольної пластин для отримання максимального рівня вихідного сигналу п'єзоперетворювача, а отже, подовження часу роботи IoT пристрою при його автономному живленні.

З використанням програмного пакета СхСАПР отримані АЧХ, ФЧХ, перехідні характеристики і відгуки на спеціальні впливи для різних типів п'єзоперетворювачів. За допомогою критерію Найквіста досліджено стійкість різних моделей перетворювачів. Аналіз отриманих годографів показав, що система залишається стійкою при різних значеннях лінійних розмірів ПП та металевих пластин.

## РОЗДІЛ 3

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ІоТ ПРИСТРОЇВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

#### 3.1 Загальні питання розробки ІоТ пристроїв, узгодження генерації та споживання енергії в ІоТ пристрої

При розробці та побудові ІоТ пристроїв розглядається кілька ключових питань, які є визначальними. Для їх аналізу розглянемо загальну схему взаємодії ІоТ пристрою з навколишнім середовищем (рис. 3.1) [7].

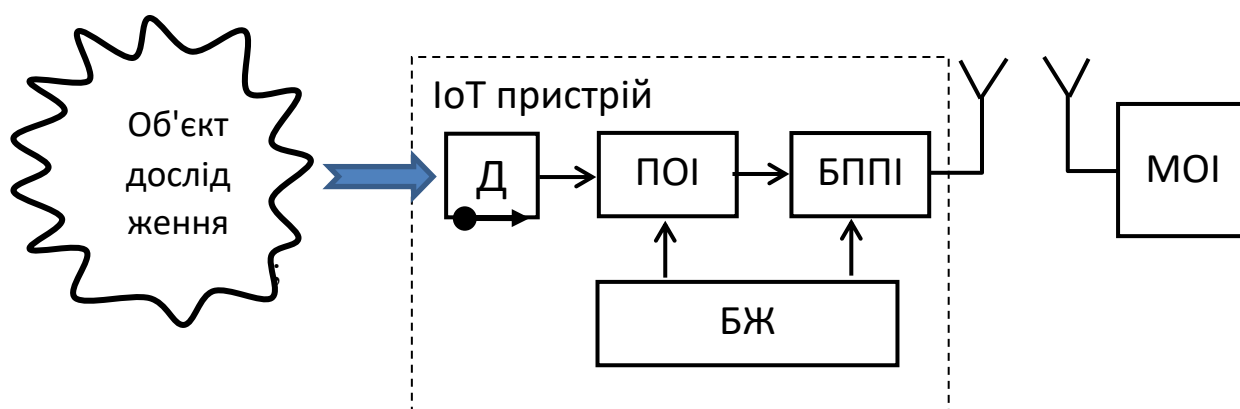


Рис. 3.1. Загальна схема взаємодії ІоТ пристрою з середовищем

На рис. 3.1. під об'єктом дослідження може виступати людина, технологічний процес або будь-що, що впливає/взаємодіє з ІоТ пристроєм, Д – датчики, ПОІ – пристрій обробки інформації (як правило побудовані на CPU і можуть бути поділені на окремі модулі), БППІ – безпроводний пристрій передачі інформації (найчастіше Wi-Fi модуль), МОІ – мережа обробки інформації (найчастіше в якості неї виступає мережа Інтернет), БЖ – блок живлення, який може складатися як з батарейного/акумуляторного живлення, так і з джерела генерації відновлювальної енергії, яка і розглядається в роботі.

Якщо IoT пристрій розглядається як елемент інформаційно-вимірювальної системи (наприклад, IoT пристрій є елементом розподіленої моніторингової системи, або є елементом контролю технологічного процесу тощо), то основними питаннями при розробці такого IoT пристрою є:

- вибір типу фізичного впливу на первинний перетворювач, а отже – залежного від цього типу датчика;
- безпосередньо первинного перетворювача (Д) здатного задовольнити як інформаційні, так і енергетичні потреби;
- вибір елемента накопичення енергії;
- вибір методу передачі вимірювальної інформації тощо (БПП);
- вибір способу живлення (БЖ).

Важливе значення має вибір бездротового типу передачі вимірювальної інформації, оскільки в багатьох технологічно складних та небезпечних процесах часто зустрічаються завади як раз на частотах передачі бездротової інформації (найчастіше 2,4 ГГц). В результаті аналізу було обрано декілька типів перспективних типів передачі в залежності від типу поставленої задачі, такі як ZigBee, LoRa тощо [46, 61, 90]. Проте, для мобільних IoT пристроїв широкого вжитку найкращим рішенням залишається найпопулярніший Wi-Fi канал.

Більшість питань по вибору ПОІ вже не є ключовими, оскільки сучасний рівень електронної техніки пропонує на ринку розробки вже готові модульні рішення, і розробка ПОІ складається, як правило з вибору того чи іншого модуля.

Одним найважливішим питанням виступає вибір типу живлення, оскільки в мобільних IoT пристроях батарея/акумулятор іноді займає набагато більше місця, ніж увесь інший пристрій отримання, обробки і передачі інформації. В роботі для вирішення цього питання запропоновано використовувати два рішення:

- комбінований метод, що поєднує акумуляторне живлення у поєднанні з генерацією енергії з ПП;

- використовувати лише енергію, що генерується з ПП.

Далі розглянемо модель взаємодії основних процесів при забезпеченні безперервної роботи системи при живленні елементів системи від енергії п'єзоелектричного перетворення з ПП – часові співвідношення вузлів схеми (рис. 3.2), де  $F_i(t)$  – функція залежності енергії від часу (втрат, накопичення, споживання),  $\delta_i$  – коефіцієнт передачі [7].

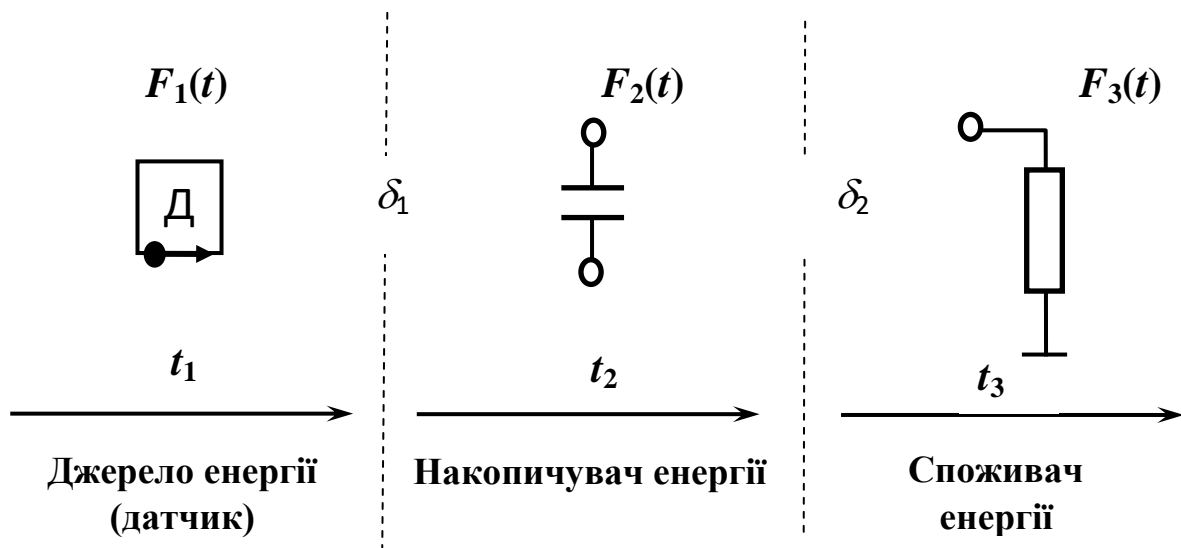


Рис. 3.2. Модель взаємодії основних процесів

Енергія, яку отримує датчик від впливу на ПП (перша ланка), накопичується в елементі накопичення енергії (друга ланка). Функція накопичення від часу має вигляд  $F_1(t)$ . Притому, в залежності від обраної схеми під'єднання елемента накопичення відбуваються втрати при передачі енергії  $\delta_1$ . При цьому в самій схемі накопичення з часом енергія також втрачається по закону  $F_2(t)$ . Споживання навантаження відбувається згідно функції  $F_3(t)$  (третя ланка). При цьому, коефіцієнт передачі  $\delta_2$  описує втрати при під'єднанні навантаження до схеми накопичення енергії.

Для забезпечення безперервної роботи необхідно, щоб додавання енергії до системи було більше, ніж вона витрачається на всіх складових схеми. Тобто умовою безперервної роботи IoT пристрою з живленням від енергії ПП є виконання виразу [7]:

$$F_1(t) > \delta_1 \cdot F_2(t) + \delta_2 \cdot F_3(t).$$

Напруга на п'єзоелементі [122]:

$$U_{ПП} = \frac{q}{C_{ПП}} = \frac{d_{ij}F}{C_{ПП}}$$

де  $F$  – сила, що діє на п'єзоелемент;  $q$  – заряд, що генерується на електродах під дією сили  $F$ ;  $C_{ПП}$  – електрична ємність між електродами;  $d_{ij}$  – п'єзомодуль (розрахунок цього параметру був детально розглянутий у попередньому розділі).

Енергія, що генерується на п'єзоелементі [122]:

$$W_{ПП} = \frac{CU^2}{2} = (d_{ij}F)^2$$

Розглянемо далі, як отримане співвідношення реалізується в загальній моделі функціонування IoT пристрою в умовах обмеженого енергозабезпечення.

## **3.2. Розробка моделі функціонування IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення**

### **3.2.1 Визначення вимог до моделі**

Для визначення вимог до моделі необхідно визначити початкові вимоги, а саме вхідні та вихідні параметри, які можна вважати основними, що визначають властивість системи [50].



Під час виконання цієї задачі були визначені такі основні складові системи:

- енергетичні складові (складається з енергій, що була запасена в системі, що поступає та споживається);
- кількість ПП (модульних елементів з ПП);
- кількість споживачів енергії, тобто кількість процесорних модулів;
- кількість завдань, які необхідно виконати системі;
- часові проміжки (складається з часу на виконання завдань та з часу роботи самої системи).

Головними завданнями, яке має вирішити ця модель при розробці IoT пристрою є:

- дати відповідь, чи може цей пристрій пропрацювати від заданих споживачів (процесорних модулів) та генераторів енергії (модулів ПП); скільки він зможе пропрацювати, тобто, чи достатньо буде цього часу, щоб здійснити, наприклад, передачу аварійної інформації;
- дати відповідь, скільки і які модулі ПП необхідно під'єднати до яких процесорних модулів, щоб пристрій працював.

В простому випадку IoT пристрій має один процесорний модуль і один ПП. В такому випадку залишається лише відповідь на перше питання – чи зможе пристрій пропрацювати і скільки. Проте, найчастіше IoT пристрій розділяють на кілька процесорних модулів: окремо центральний процесор, процесор обробки актуаторів (наприклад моторів – тобто окремі драйвери для моторів), процесор обробки сигналів (наприклад аудіо та відео інформації), процесор передачі даних (Wi-Fi модуль). Робиться це по багатьом міркуванням, наприклад, щоб уникнути вплив завад від моторів на Wi-Fi модуль тощо. Наприклад, в більшості простих мобільних телефонів є окремо центральний процесор (обробляє дані клавіатури тощо) та DSP-процесор (обробляє голосові сигнали).

Таким чином, метою подальшого дослідження є розробка моделі функціонування IoT пристрою, яка поєднує в собі існуючі моделі

підвищення ефективності основних параметрів системи, а також враховує можливі енергетичні співвідношення п'єзоперетворювачів в якості генераторів енергії для живлення IoT пристроїв.

### 3.2.2 Розробка математичної моделі

Спочатку представимо систему у вигляді моделі «чорного ящика» – найпростішого відображенням реальної системи, в якому повністю відсутні відомості про внутрішній зміст, а задаються тільки вхідні і вихідні зв'язки системи з середовищем (рис. 3.3) [50].

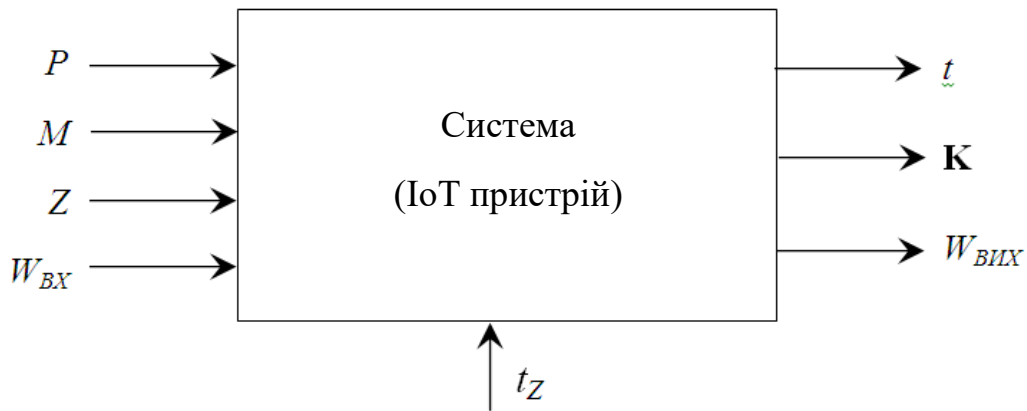


Рис. 3.3. Модель системи у вигляді «чорного ящика»

Як відомо, модель «сірого ящика» пов'язана із середовищем за допомогою своїх входів і виходів, опишемо ці параметри [96-101].

На систему впливають такі вхідні параметри:

$P$  – кількість п'єзоелементів, що генерують енергію для накопичення в

IoT пристрої,  $i = \overline{1, p}$  ;

$M$  – кількість обчислювальних пристроїв (процесорних плат) у

пристрої, що треба жити (модулів),  $j = \overline{1, m}$  ;

$Z$  – завдання, що необхідно виконати пристрою,  $s = \overline{1, z}$  ;

$W_{BX}$  – енергія, яка подається на вхід та складається з:

- а) попередньо накопиченої енергії  $W_{HAK}$ ;
- б) енергії, що генерується п'єзоперетворювачами  $W_{ПП}$ ;
- в) енергоспоживання електронних компонент пристрою  $W_{КОМ}$ ;
- г) енергоспоживання мікропроцесорів  $W_{CPU}$ .

Також на вхід системи подаються часові проміжки виконання завдань –  $t_Z$  (на моделі подано окремо, так як мають іншу природу складової системи).

На виході системи спостерігаються величини:

$t$  – час роботи IoT пристрою;

$\mathbf{K}$  – матриця з'єднань п'єзоперетворювачів з модулями;

$W_{ВИХ}$  – енергоспоживання системи.

Крім того,, можна визначити співвідношення між вхідними та вихідними параметрами системи, що має вигляд:

$$\begin{cases} t = f(t, P, M), \\ \mathbf{K} = f(W_{ВХ}, P, M), \\ W_{ВИХ} = f(P, M, Z, W_{ВХ}) \end{cases}$$

Тоді модель «чорного ящика» за рис. 3.3 можна перетворити в модель «сірого ящика» (рис. 3.4) [50].

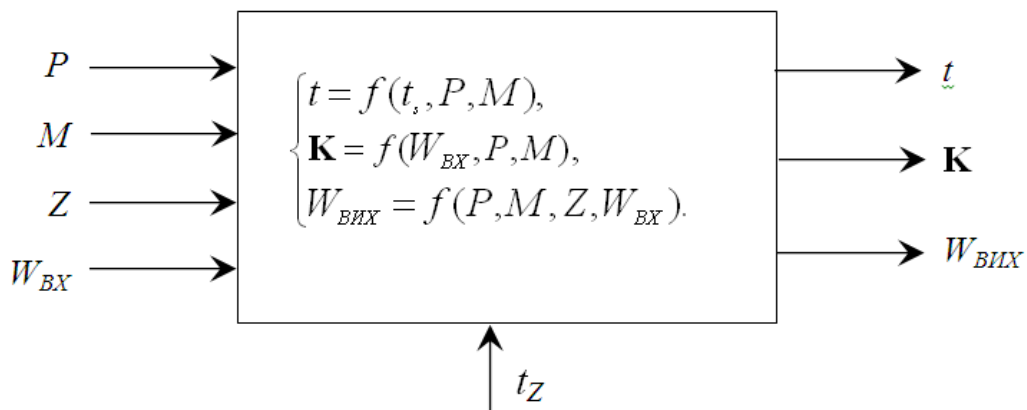


Рис. 3.4. Модель системи у вигляді «сірого ящика»

Для розробки моделі була використана теорія з наукових робіт [10,13,14,17,19-24,31,39,42,55,58-60,64-68,74,85,89,96-101,103-105,106-108, 111,113,116,118,119,151,152], а також власні дослідження [8,50,76].

Для побудови математичної моделі функціонування IoT пристроїв сформульовано умову безперервної роботи системи:

$$\sum_{j=1}^m W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{ПП}^i \geq \sum_{j=1}^m W_{КОМ}^j + \sum_{j=1}^m W_{CPU}^j .$$

Сформована матриця з'єднань п'єзоперетворювачів з модулями:

$$\mathbf{K} = [k_{ij}]_{\substack{i=1\dots p, \\ j=1\dots m}}$$

в якій кожен елемент може приймати такі значення:

- $k_{ij} = 1$ , якщо  $i$ -й п'єзоелемент живить  $j$ -й модуль;
- $k_{ij} = 0$ , якщо  $i$ -й п'єзоелемент не живить  $j$ -й модуль.

В такому випадку для працездатності IoT пристрою для кожного його  $j$ -го окремого модуля повинна виконуватися умова:

$$W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{ПП}^i \cdot k_{ij} - (W_{КОМ}^j + W_{CPU}^j) \geq 0 .$$

Тоді енергоефективність системи буде максимальною при виконанні умови:

$$\sum_{j=1}^m W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{ПП}^i \cdot k_{ij} \rightarrow \min .$$

При виконанні  $s$ -го завдання, енергія, що споживається мікропроцесором  $j$ -го модуля, повинна бути не більше суми накопиченої енергії і енергії, що надійшла від п'єзоелемента, тобто повинна виконуватися умова:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^z W_{CPU}^{js} + \sum_{j=1}^m W_{КОМ}^j \leq \sum_{j=1}^m W_{HAK}^j + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p W_{ПП}^i \cdot k_{ij} .$$

Для максимально швидкого виконання  $s$ -го завдання обирається максимальна кількість модулів  $X_{js}$ , тобто необхідне виконання умови:

$$k_{ij} X_{ij} \rightarrow \max, \text{ при } t_s = \min_{j=1}^m (t_{js}), X_{ij} \in M.$$

Математична модель функціонування ІоТ з максимальною енергоефективністю має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m W_{\text{HAK}}^j + \sum_{i=1}^p W_{\text{III}}^i \geq \sum_{j=1}^m W_{\text{KOM}}^j + \sum_{j=1}^m W_{\text{CPU}}^j, \\ W_{\text{HAK}}^j + \sum_{i=1}^p W_{\text{III}}^i \cdot k_{ij} - (W_{\text{KOM}}^j + W_{\text{CPU}}^j) \geq 0, \\ \sum_{j=1}^m W_{\text{HAK}}^j + \sum_{i=1}^p W_{\text{III}}^i \cdot k_{ij} \rightarrow \min, \\ \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^z W_{\text{CPU}}^{js} + \sum_{j=1}^m W_{\text{KOM}}^j \leq \sum_{j=1}^m W_{\text{HAK}}^j + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^p W_{\text{III}}^i \cdot k_{ij}, \\ k_{ij} X_{ij} \rightarrow \max, \text{ при } t_s = \min_{j=1}^m (t_{js}), X_{ij} \in M. \end{array} \right.$$

В такому випадку можна представити модель у вигляді «білого ящика», яка показана на рис. 3.5.

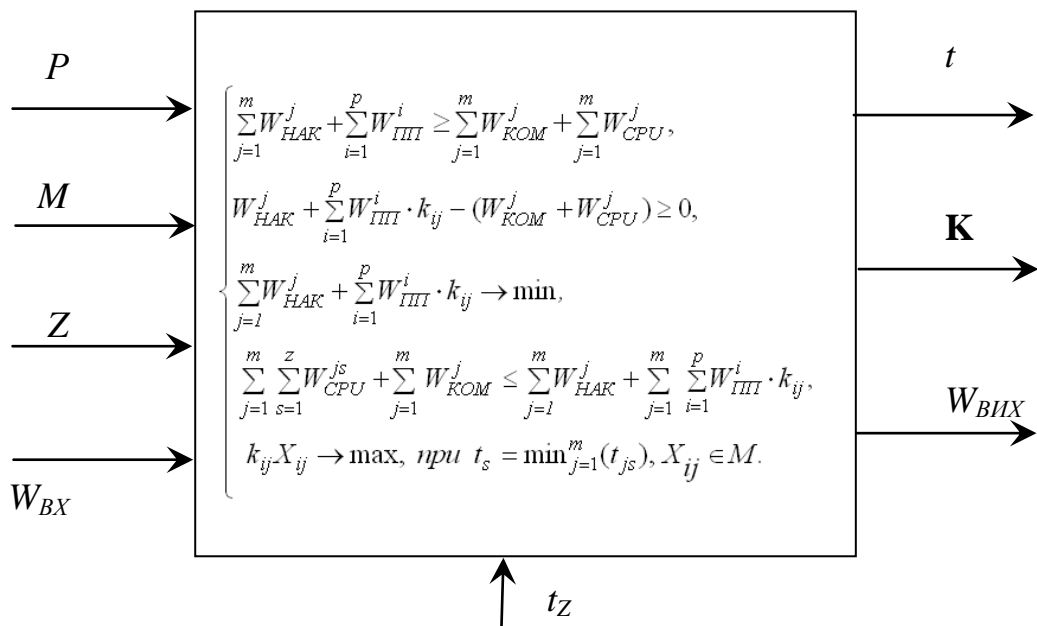


Рис. 3.5. Модель системи у вигляді «білого ящика»

Розроблена математична модель роботи IoT пристрою описує ключові параметри системи: час роботи, енергоспоживання, а також враховує енергетичні обмеження системи, що дозволяє розробнику визначити, скільки часу IoT пристрій зможе працювати при наявності ПП в якості джерела додаткової енергії, а також необхідну кількість ПП та їх підключення до відповідних модулів.

Таким чином, отримано третій науковий результат роботи, а саме отримала подальший розвиток математична модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, за рахунок врахування енергії, яка генерується п'єзокерамічними перетворювачами, що дозволяє будувати IoT пристрої з подовженим терміном роботи.

Розглянемо далі як ця модель може бути реалізована у програмному середовищі.

### **3.3 Розробка програмного забезпечення реалізації розробленої математичної моделі**

Програма розробляється на основі положень, що були отримані у п.3.1 та 3.2, що дозволяє будувати енергоефективні IoT пристроїв. Для цього були сформовані вимоги до його функціоналу та усіх складових частин. Програма повинна давати оцінку енергоспоживання IoT пристрою при виконанні завдань:

- оцінювати час, витрачений на виконання певної кількості завдань кожним компонентом (процесорною платою IoT пристрою);
- надавати візуальне зображення працездатності системи та показувати варіанти з'єднань п'єзопластин з процесорними модулями;
- візуально порівнювати ефективність роботи кожного з обраних варіантів.

### 3.3.1 Вибір технологій для реалізації програмного модуля

Для розробки програми була вибрана платформа Java Standard Edition від Sun Microsystems і мова програмування Java, спираючись на те, що дана платформа представляє гнучкий набір інструментів для реалізації графічного додатку, та дозволяє реалізувати UI (user interface) на високому рівні без великих витрат часу [81, 93].

Мова Java є об'єктно-орієнтованою мовою високого рівня. Стандартні бібліотеки забезпечують загальний спосіб доступу до таких платформозалежних особливостей, як обробка графіки, багатопотоковість та роботу з мережами.

Оскільки програма задіює чималу кількість даних, то в роботі прийнято рішення використовувати систему керування базами даних MySQL. При цьому обов'язковою вимогою є кросплатформеність. Програма повинна працювати на будь-якій операційній системі, на якій встановлено віртуальну машину Java.

### 3.3.2 Основні особливості структури програмного додатка

Відповідно до отриманих результатів досліджень на вхід модуля передаються такі параметри:

- вибір кількості компонент таких як кількість процесорних модулів та кількість п'єзомодулів;
- процесорний модуль: тип мікроконтролера, операційного підсилювача, Wi-Fi модуля, АЦП, ЦАП, комутатора та ін.;
- п'єзомодуль: кількість елементів, тип кераміки, форма, лінійні розміри, матеріал металевієї пластини, тощо;
- час на виконання завдань;
- кількість енергії, яка попередньо була в системі до виконання завдань.

В програмі реалізуються наступні властивості:

- автоматичне визначення розподілу поставлених завдань, згенерованих самостійно модулем; при цьому закладена можливість генерації завдань користувачем;
- поділ завдань між процесорними модулями IoT пристрою;
- підібрати ефективне під'єднання кожного з ПП до своєї процесорної плати для виконання кожного з визначених завдань.

Загальний модуль розділений на кілька підмодулів, кожен з таких яких реалізує кілька класів.

I. Перший логічний модуль є ядром програми, основним завданням якого є відображення інтерфейсів для зручного користування програмою.

Він складається з трьох класів:

- MainForm - є базовим класом, що реагує на більшість команд користувача та являє собою інтерфейс для взаємодії між ядром програми і користувачем.
- PPWorker - клас, що відповідає за коректну роботу алгоритмів підвищення енергоефективності IoT пристрою. До його функцій входять:
  - а) створення обробників для кожного ПП в IoT пристрої;
  - б) обробка потоку завдань, що надійшли в пристрій;
  - в) використання генератора випадкових чисел;
  - г) розподіл навантаження на ПП згідно обраного алгоритму;
  - д) запуск на виконання завдань, згідно заданого алгоритму.
- DatabaseWorker, основними функціями якого є:
  - а) налагодження зв'язку з базою даних MySQL;
  - б) отримання необхідних даних;
  - в) трансформація в відповідний формат;
  - г) передача даних іншим модулям системи.

Крім того, до першого під модуля додаються два додаткових класи:

- TaskGenerator;



- SqlConector.

2) PPWorker –

Взаємодія основних класів показана на UML-діаграмі на рис. 3.6.

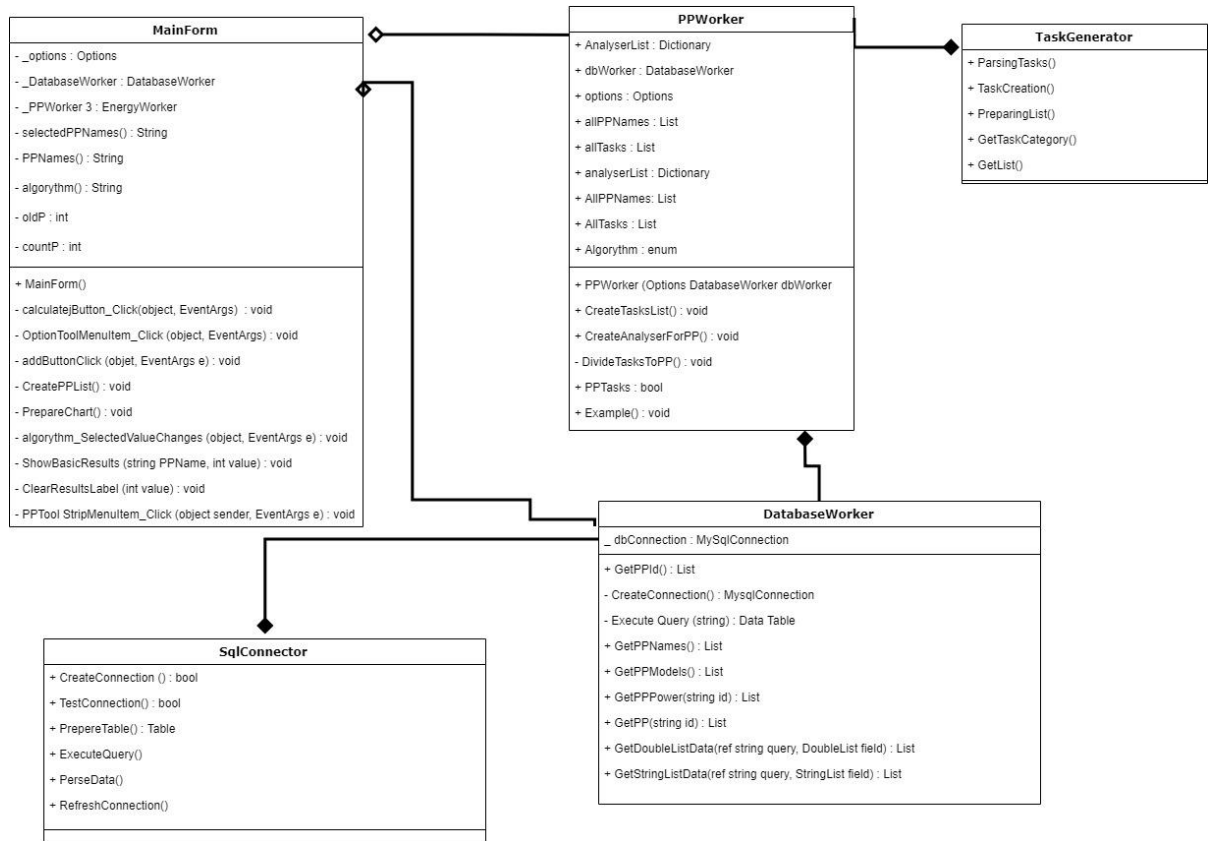


Рис. 3.6. UML-діаграма взаємодії основних трьох класів програми

Класи MainForm і PPWorker пов'язані між собою типом «Агрегація». Обидва класи знаходяться на одному «рівні», тобто жоден з цих класів не є більш важливим, ніж інший другий. Ці класи є самостійними. Однак клас MainForm використовує екземпляр класу PPWorker, а отже, моделюються відносини типу «частина / ціле».

Ця ситуація повторюється між класами MainForm і DatabaseWorker.

Як зазначалося вище – до підмодуля ядра відносяться два додаткових класи: SqlConnector і TaskGenerator:

- SqlConnector являє собою конектором до бази даних MySQL;

- TaskGenerator - клас, що задіюється для автоматичного створення списку завдань.

Взаємозв'язок між класами SqlConnection і DatabaseWorker, а також PPWorker та TaskGenerator складаються із зв'язку, що представляє собою більш строгий варіант агрегації.

II. Другий підмодуль призначений для користувача програмного інтерфейсу (UI), основна функція якого – візуалізація складових для взаємодії між системою і розробником. Даний під модуль має чотири класи:

- ModifyTaskListForm – форма для основних параметрів процесорних плат, що дає можливість оперувати інформацією про:

- а) тип мікроконтролеру;
- б) використаний операційний підсилювач;
- в) Wi-Fi модуль;
- г) АЦП та/або ЦАП;
- д) комутатор тощо.

- Options – клас, що відображає та зберігає визначення основних з'єднань.

- OptionsForm – вікно з опціями програми, де необхідно вказати:

- а) максимальну кількість модулів, які можна розмістити в системі;
- б) кількість п'єзомодулів що будуть використовуватися;
- в) інші основні налаштування програми.

- PPStatisticsDialog – форма для параметрів п'єзомодулів, що дає можливість оперувати інформацією про:

- а) тип кераміки;
- б) лінійні розміри;
- в) форму п'єзоелементу;
- г) матеріал пластини тощо.

UML-діаграма класів другого підмодуля показана на рис. 3.7.

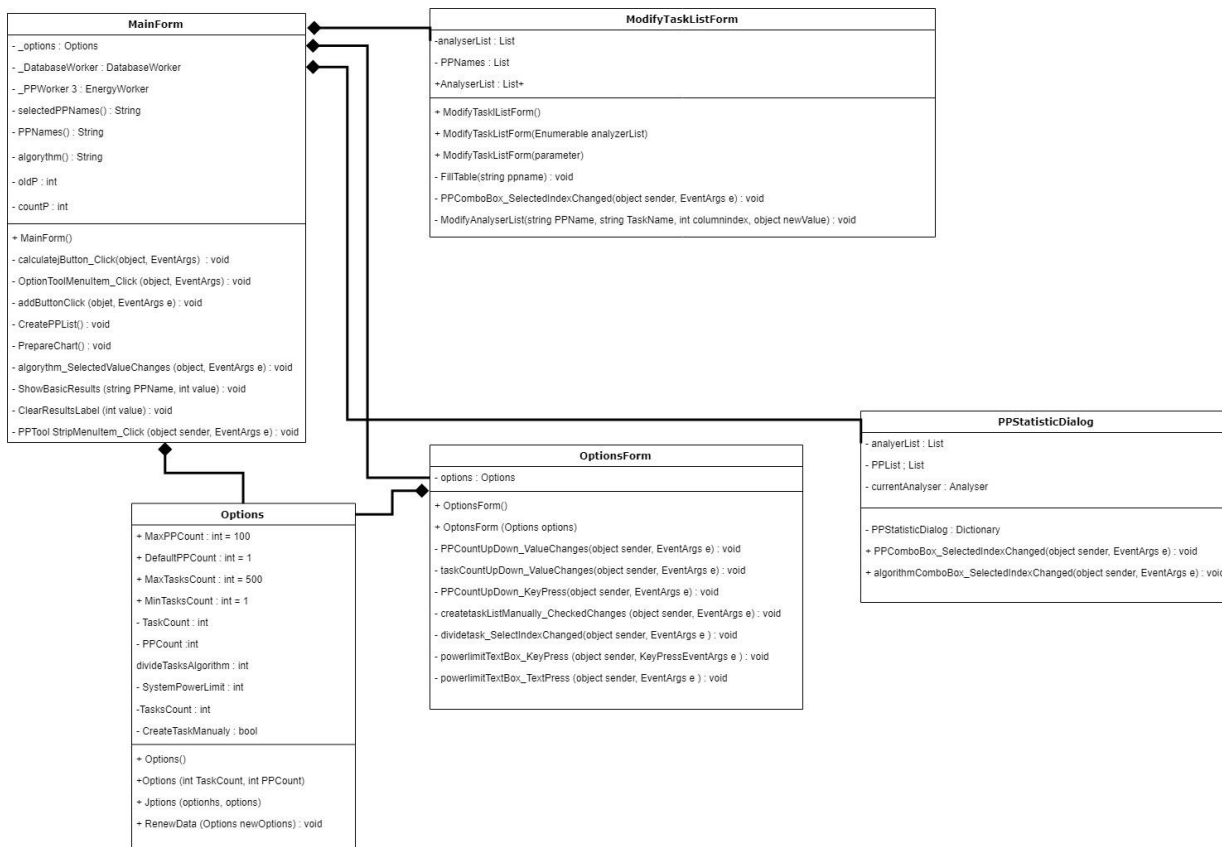


Рис. 3.7. UML діаграма другого підмодуля (UI)

Як можна зробити висновок з рис. 3.7,

Кожен із зазначених класів підмодуля UI залежить від класу MainForm (рис. 3.7).

Робота з базою даних заснована на використанні двох складових, які утворюють основний підмодуль роботи з базою даних:

- класу DatabaseWorker (прописані умови додавання даних, видалення, оновлення, робота з таблицями тощо).

- DatabaseConstNames - конфігураційного файлу.

Програма працює наступним чином:

- розроблений програмний модуль перевіряє з'єднання з базою даних, і отримує всю необхідну інформацію: доступні процесорні плати та п'єзопластини, які можуть бути використані в системі тощо;

- далі програма очікує вибору компонентів процесорних плат від розробника;

- після введення всієї інформації програма приступає до розрахунків:

а) спочатку програма генерує потік завдань за вибором розробника;

б) після цього програма приступає до розрахунків енергоефективної роботи кожної процесорної плати IoT пристрою: кожній платі створюється окремий потік виконання завдань, що прискорює отримання результатів;

- на останньому етапі програма виводить результати у вигляді графіків на відповідну форму (рис. 3.8).

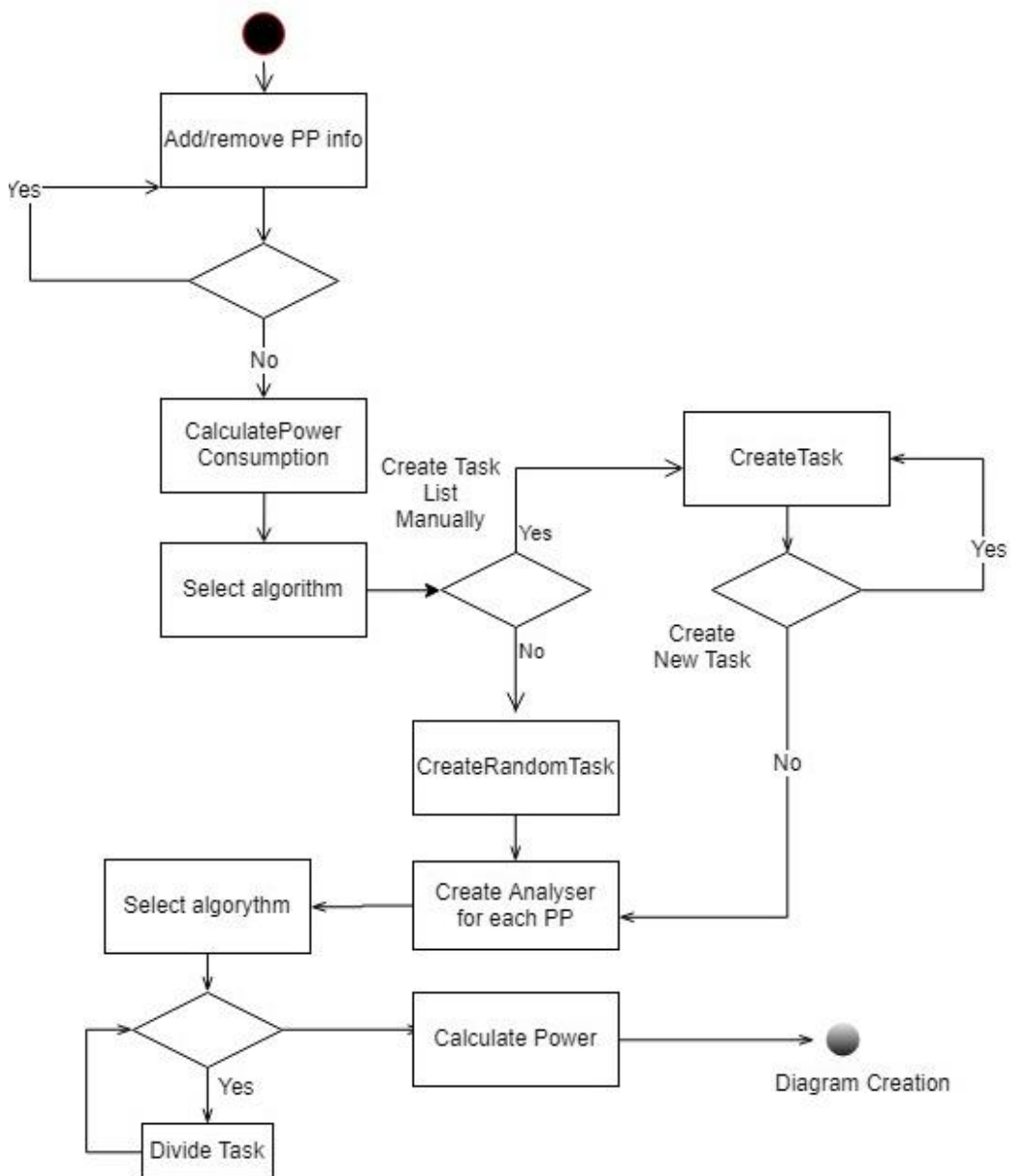


Рис 3.8. UML діаграма роботи програми

Розроблена програма може знаходитися в таких станах:

- отримання інформації про компоненти, вибір і додавання компонентів в систему;
- створення аналізатора для кожного процесу в системі;
- створення потоку завдань на виконання, або обробка вже існуючого набору завдань;
- розрахунок енергоспоживання IoT пристрою;
- виведення результатів.

Програма послідовно переходить від одного стану до іншого. Для більшості переходів участь розробника не передбачена, тобто програма модуль може працювати автономно. Однак в програму вкладена функція повного контролю з боку розробника, що реалізується станом очікування введення команд.

На рис. 3.9 показана фізична модель бази даних, з якою працює розроблена програма. Для цього використовувалося середовище MySQL Workbench. Ця програма надає зручний набір опцій для графічного управління базами даних MySQL.

База даних, з якою працює додаток, складається з шести таблиць:

- Manufacturer – загальна інформація про розробників;
- Hardware – інформація про компоненти, які можна включити в систему;
- Algorithms – для зберігання статистики та опису роботи алгоритмів;
- Tasks – зберігання даних про завдання;
- PPTask – для зберігання інформації про завдання;
- User – для ідентифікації користувача.

Для прикладу, таблиця Hardware складається з 6 основних полів: idHardware – є ідентифікатором процесорної плати елемента; PowerConsumption – визначає значення споживання енергії IoT пристроєм;

PowerLeft –відображає, скільки енергії залишилось для роботи пристрою;  
Cost – вартість процесора; тощо.

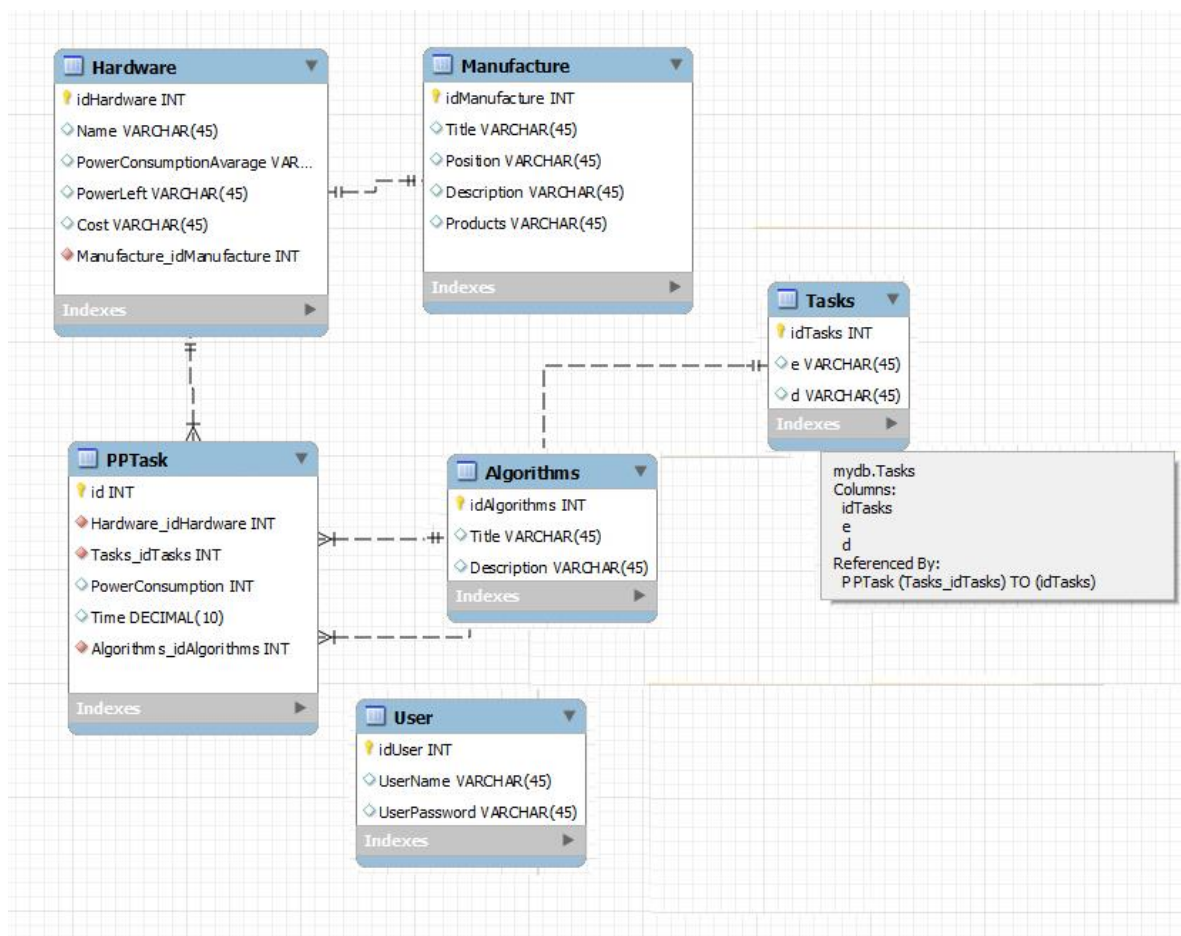


Рис. 3.9. Фізична модель бази даних для роботи з програмою

Таким чином, розроблена кросплатформена програма дозволяє проектувати IoT пристрої зі збільшеною енергоефективністю, при цьому:

- гнучко налаштовувати енергетичні параметри системи;
- підбирати п'єзопластини для процесорних плат;
- підбирати виконання завдань відповідним процесорним модулям для зниження енерговитрат.

Нижче наведені приклади вікон роботи розробленого програмного забезпечення.

На рис. 3.10 показані деякі приклади вікон введення та виводу інформації.

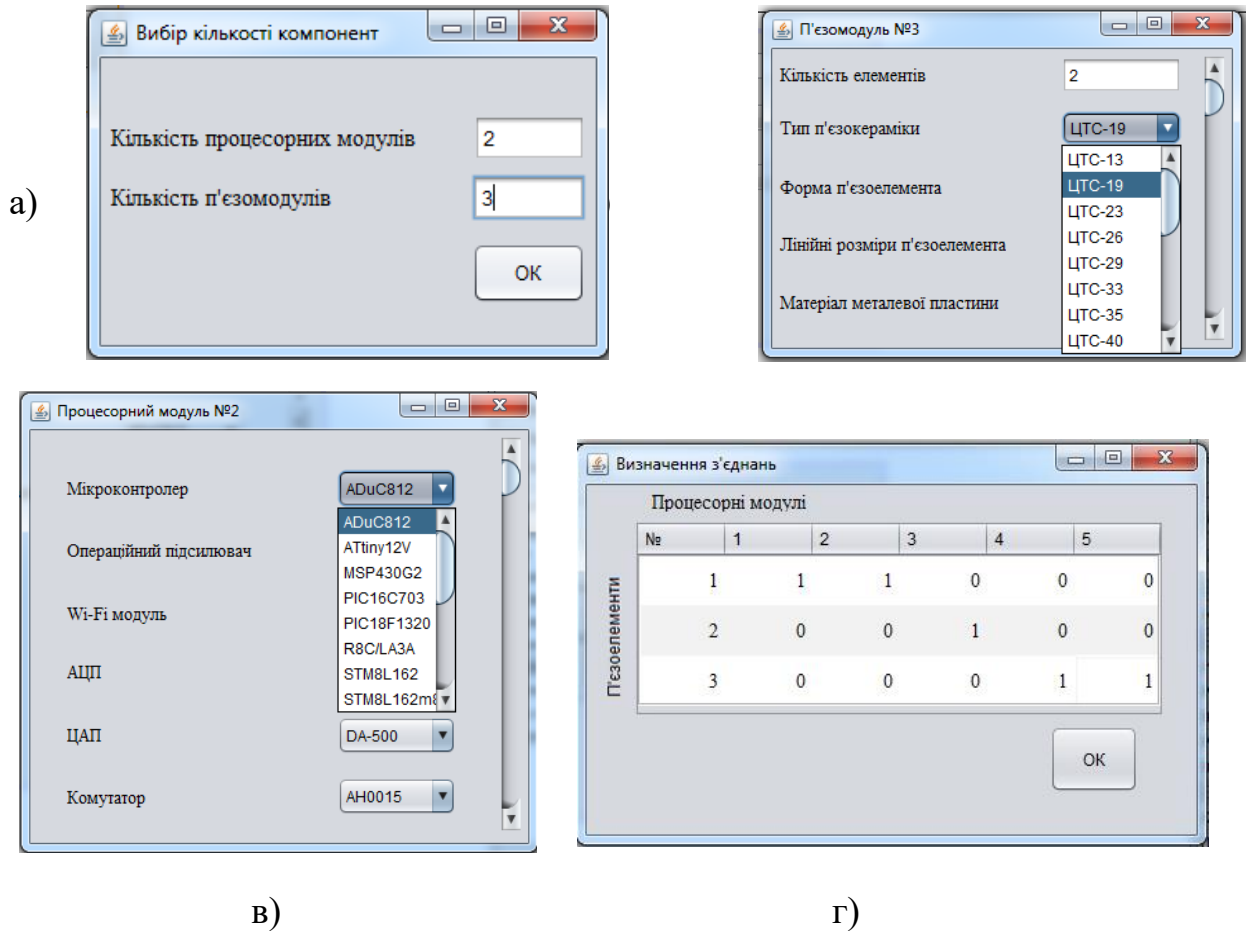


Рис. 3.10. Вікно роботи програми: а – вибір кількості модулів; б – вибір параметрів п'езомодуля (на рисунку для № 3); в – вибір параметрів процесорного модуля (на рисунку для № 2); г – виведення результату (матриці з'єднань)

### 3.4 Загальна схема побудови IoT пристрою

Усі отримані в розділах 2 та 3 результати можуть бути ефективно використані при побудові енергоефективних IoT пристроїв на базі п'езокерамічних перетворювач.

Основними задачами при проектуванні ПП для IoT пристрою є:

Задача 1. Визначення форми п'езоеlementу та електродів.

Задача 2. Визначення розмірів та матеріалів п'єзоелементу, пластини та консолі.

Задача 3. Визначення можливості і часу роботи IoT пристрою з запропонованим ПП, визначення варіанту підключення ПП для процесорних модулів для найбільшої енергоефективності IoT пристрою.

Рішення першої задачі реалізується за допомогою удосконаленого аналітичного опису параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці (описано в п. 2.1), що дозволило визначати форми біморфних п'єзоелементів, їх електродів, а також необхідного механічного напруження для збільшення потужності вихідного сигналу IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів. Це є першим пунктом наукової новизни.

Рішення другої задачі реалізується за допомогою розроблених функціональних моделей консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів (описано в п. 2.2), що дозволили розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів, а також металеві та консольні пластини для отримання максимального рівня вихідного сигналу п'єзоперетворювача, а отже, подовження часу роботи IoT пристрою при його автономному живленні. Це є другим пунктом наукової новизни.

Рішення третьої задачі реалізується за допомогою розробленої математичної моделі функціонування IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення (описано в п. 3.2), що дозволило визначати можливість та час автономної роботи таких пристроїв з використанням розроблених в роботі п'єзоперетворювачів. Це є третім пунктом наукової новизни.

Загальна схема розробки ПП для IoT пристрою наведена на рис. 3.11.

У сукупності виконання всіх трьох задач з використанням розроблених в дисертаційній роботі положень дозволяє спроектувати енергоефективні IoT пристрої на базі п'єзокерамічних перетворювачів. Це дозволяє стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.





Рис. 3.11. Загальна схема розробки ПП для IoT пристрою

### 3.5 Висновки до розділу 3

Розроблена математична модель функціонування IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення, що дозволяє визначати можливість та час автономної роботи таких пристроїв, а також визначати варіанти підключення ПП для процесорних модулів для найбільшої енергоефективності IoT пристрою.

Показана розробка програмного забезпечення реалізації розробленої математичної моделі: вибір технологій для реалізації програмного модуля, основні особливості структури програмного додатка тощо. Показані вікна роботи програмного додатка.

Розглянута загальна схема розробки ПП для енергоефективних IoT пристроїв, яка складається з трьох задач: визначення форми п'єзоелементу та електродів; визначення розмірів та матеріалів п'єзоелементу, пластини та консолі; визначення можливості і часу роботи IoT пристрою з запропонованим ПП, а також визначення варіанту підключення ПП для процесорних модулів для найбільшої енергоефективності IoT пристрою. Показано, що використання розроблених в дисертаційній роботі положень дозволяє виконати всі три завдання, а отже, спроектувати енергоефективні IoT пристрої на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ТА ПРОВЕДЕНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 4.1 Дослідження експериментального стенду

Для перевірки отриманих в роботі теоретичних положень були розроблені лабораторні стенди та проведені експериментальні дослідження різних типів п'єзоперетворювачів. Для цього були розглянуті наступні питання: вибір типу п'єзоелементів; вибір типу металевих пластин; вибір типу конструкцій консольних ПП; вибір схеми накопичувача енергії; вибір імітації механічного впливу; побудова лабораторного стенду; проведення експериментальних досліджень.

##### 4.1.1 Вибір п'єзоелементів та пластин

Враховуючі, що IoT пристрої мають малі розміри, для досліджень були обрані малорозмірні п'єзоелементи 14 типів, які зображені на рис. 4.1: 11 дисків діаметром 27 мм та висотою 0,44 мм; 4 диски діаметром 19 мм та висотою 1,5 мм; 3 диски діаметром 19,2 мм та висотою 0,6 мм; 5 дисків діаметром 29 мм та висотою 0,4 мм; 4 циліндри діаметром 24 мм, внутрішнім діаметром 10 мм та висотою 1 мм; 20 біморфів з дисковим п'єзоелементом з діаметром 8 мм з діаметром металеві пластини 12 мм висотою 0,2 мм; 2 циліндри діаметром 15 мм, внутрішнім діаметром 5 мм та висотою 5 мм; 3 біморфи з дисковим п'єзоелементом з діаметром 14 мм з діаметром металеві пластини 20 мм та висотою 0,3 мм; 2 біморфи з дисковим п'єзоелементом з діаметром 14 мм з діаметром металеві пластини 18 мм та висотою 0,3 мм; 2 п'єзодзвінка ЗП-19; 2 циліндри діаметром 30 мм та висотою 5 мм; 2 циліндри діаметром 19 мм, внутрішнім діаметром 5 мм та висотою 1,5 мм; 8 циліндрів

діаметром 26 мм, внутрішнім діаметром 10 мм та висотою 1,2 мм; 2 суцільні циліндри діаметром 20 мм та висотою 18 мм.



Рис. 4.1. Досліджувані в роботі типи п'єзоелементів

Для малорозмірних IoT конструкцій найкраще підійдуть мініатюрні п'єзоелементи 7ВВ-12-9 фірми muRata [4], що складаються з металеві пластины з латуні діаметром 12 мм та товщиною 0,1 мм із закріпленою на ній п'єзоелемента з діаметром 9 мм та товщиною 0,12 мм. Резонансна частота – 9 кГц, ємність – 8 нФ, вага – 0,143 г. Характеристики інших п'єзокерамічних асиметричних біморфних елементів цієї фірми, що також були розглянуті в роботі (деякі показані на рис. 4.2), описані в [5].



Рис. 4.2. Асиметричні п'єзокерамічні перетворювачі фірми muRata, що досліджувалися в роботі: 1 – елемент 7ВВ-12-9; 2 – елемент 7ВВ-20-3; 3 – елемент 7ВВ-20-6С

Вимоги до металевої пластини консольної конструкції – гнучкість та міцність. В роботі були розглянуті пластини кількох матеріалів та товщин:

- оцинковані сталеві пластини з розмірами 72x25x0,15 мм;
- сталеві пластини з розмірами 35x20x0,1 мм;
- алюмінієві пластини з розмірами 45x30x0,1 мм;
- латунні пластини з розмірами 50x30x0,1 мм;

Під час експериментів лінійні розміри (довжини та ширини) змінювалися, для перевірки впливу цих розмірів на характеристики ПП та для перевірки адекватності отриманих теоретичних положень.

#### 4.1.2 Розробка накопичувача енергії

При побудові консольних асиметричних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів важливим питанням є розробка модуля накопичення і контролю заряду, який підключається безпосередньо до виходу п'єзоперетворювача. Типова схема первинного перетворювача зі схемою випрямлення і накопичення показана на рис. 4.3 [18].

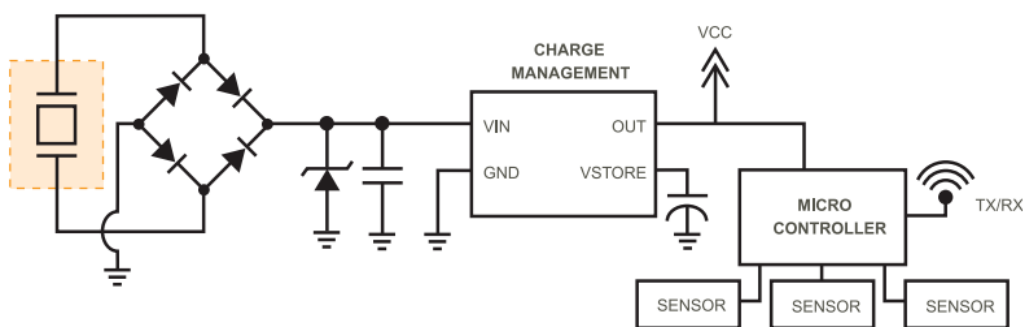


Рис. 4.3 Схема пристрою накопичення енергії з ПП

Використовується кілька рішень в якості плат випрямлення і накопичення, які містять подвійний двонапівперіодний випрямляч і накопичувальний конденсатор. Деякі рішення містять перетворювач з комутованою вихідною напругою. Особливістю таких перетворювачів є ефективна можливість роботи з високоімпедансними джерелами енергії,

яким є п'єзоелемент. Крім того, так як джерела регенеруємої енергії не завжди можуть виробляти енергію, такі перетворювачі повинні мати модуль контролю та управління живлення, яке зможе комутувати живлення від акумулятора, або від джерела вібрації. У разі падіння напруги від джерела енергії вібрації нижче порогового значення, перемикач комутує підключення навантаження до акумуляторної батареї.

Вимогами до схеми накопичення було забезпечення безперебійного живлення навантаженні: від схеми накопичення енергії вібрації, або, при низькому значенні напруги нижче порогу – від акумуляторної батареї. В роботі було розроблено власне схемо технічне рішення накопичувача енергії з ПП на основі чипу LTC3330 Linear Technology [3] (рис. 4.4).

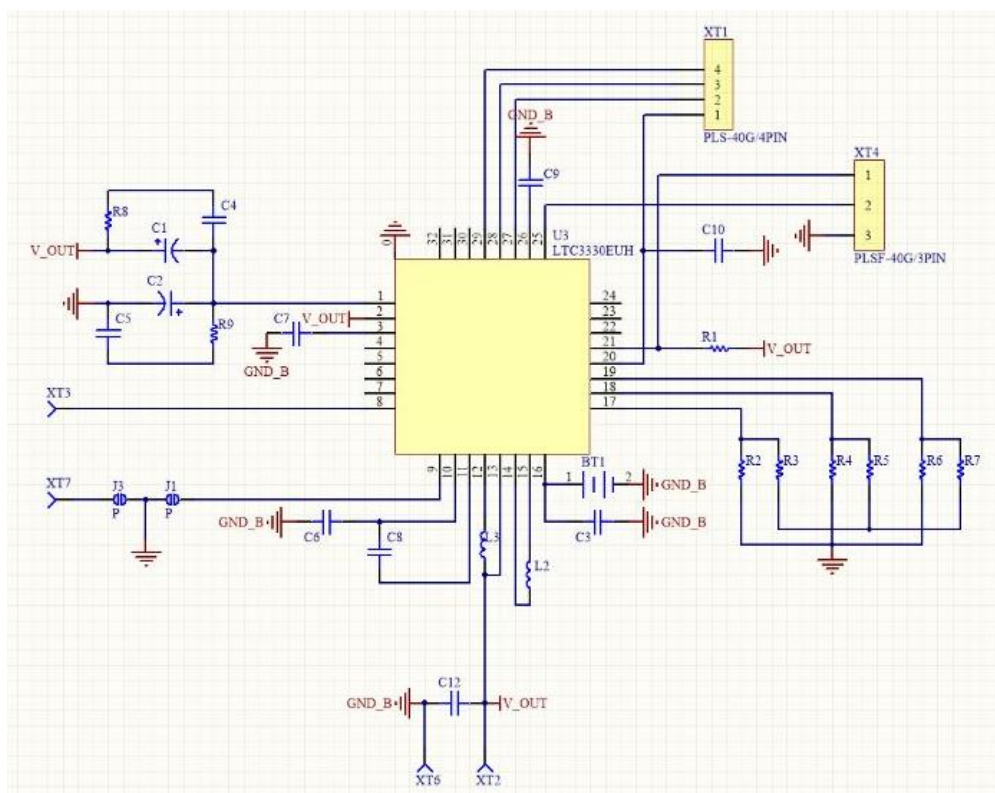


Рис. 4.4. Схема накопичувача енергії вібрації на основі чипу LTC3330 Linear Technology

На рис. 4.5 показані розроблені моделі плати, а також замовлені та виготовлені на Львівському підприємстві Pcbprint [6] печатні плати (рис. 4.6).

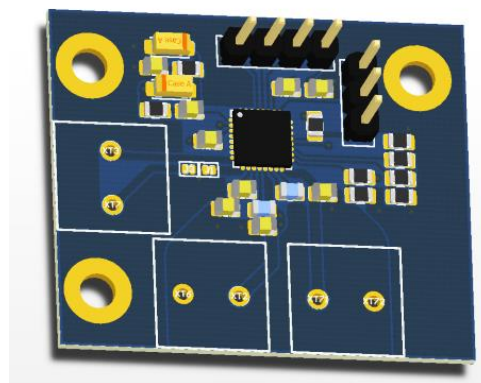
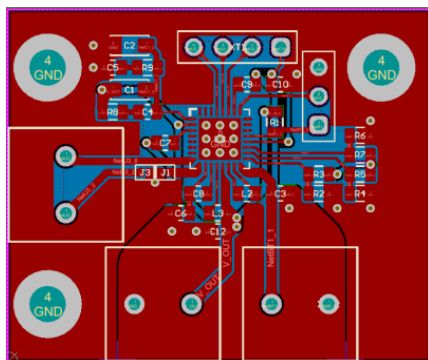


Рис. 4.5. Розроблені моделі плат накопичувачів енергії

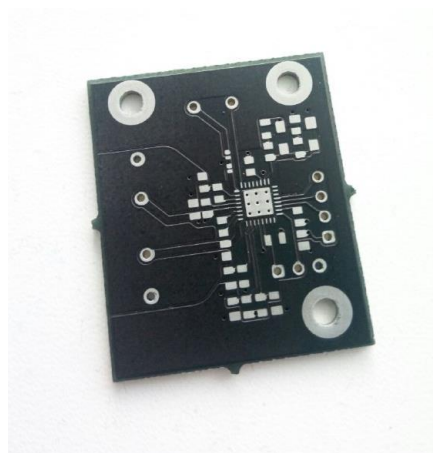
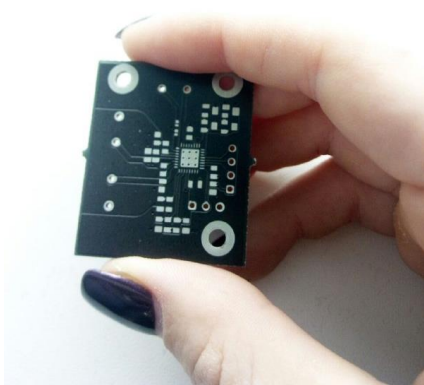


Рис. 4.6. Виготовлені на замовлення плати

На рис. 4.7 наведено фото повністю зібраних плат.

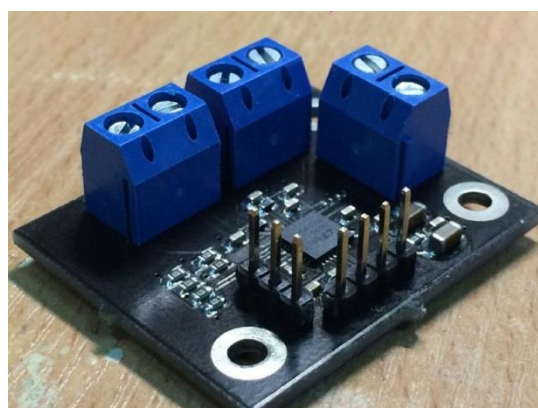
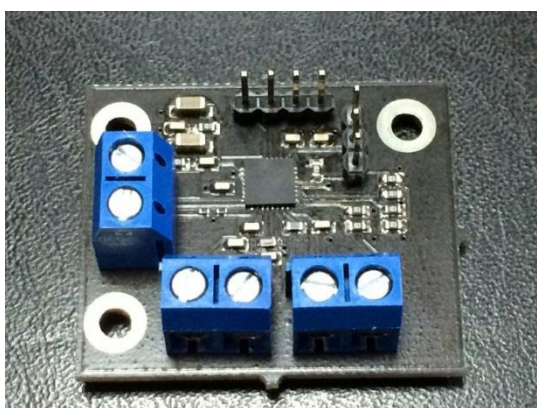


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд розроблених плат

В роботі було виготовлено 4 вироби, з якими подалі проводилися експериментальні дослідження.

### 4.1.3 Експериментальний стенд для дослідження вібраційних впливів

Загальний вигляд лабораторної установки показаний на рис. 4.8. Було застосовано джерело живлення Lips2010, осцилограф SDS1052DL+, генератор ГЗ-106, мілівольтметр ВЗ-38.

Конструкція експериментальної платформи показана на рис. 4.9. В якості джерела вібрації виступив мотор AMS1141М від Elecrow к асиметричним навантаженням на валу. Частота обертання мотора підраховувалася за допомогою пристрою на основі мікроконтролера PIC16F873. Установка фіксувалася за допомогою платформи AOYUE328. На рис. 4.9 показаний випадок дослідження консольного п'єзоелектричного накопичувача з чотирма п'єзоелементами 7ВВ-12-9.

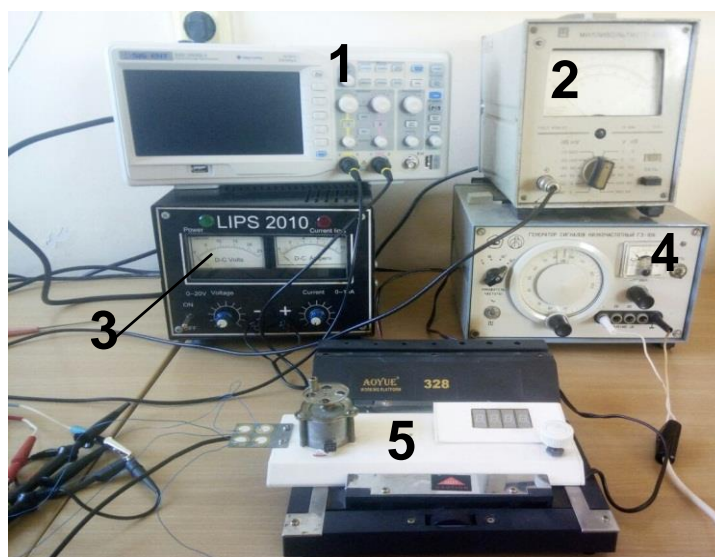


Рис. 4.8. Експериментальний стенд для досліджень вібраційних впливів:

1 – осцилограф SDS1052DL+; 2 – мілівольтметр ВЗ-38; 3 – джерело живлення Lips2010; 4 – генератор ГЗ-106; 5 – експериментальна платформа

За допомогою установки були досліджені різні варіанти виконання конструкції консольних п'єзоперетворювачів накопичення енергії вібрації: біморфні та триморфні, різні схеми під'єднання п'єзоелементів, їх кількість та тип. Деякі з результатів наведено нижче [77, 78].



Рис. 4.9. Конструкція експериментальної платформи для дослідження впливу вібрації

На рис. 4.10 наведено результати досліджень кількості п'єзоелементів на пластині, де показані нормовані значення вихідної напруги п'єзоперетворювачів при їх різній кількості та розташуванню в залежності від різних значень частоти обертання мотора, тобто вібрації.

Так, з рис. 4.10 видно, що найбільшу ефективність мають перетворювачі з двома асиметричними п'єзоелементами, що закріплені з протилежних сторін металевої пластини. Це можна пояснити розміщенням елементів в місцях найбільшої деформації, роботою в режимі протилежних деформацій. Збільшення кількості АБП призводить навпаки до зменшення чутливості, що можна пояснити збільшення жорсткості всієї конструкції, що призводить до зменшення деформації, а отже – і впливу на п'єзокерамічний елемент.

Крім того, за допомогою складеної експериментальної установки були перевірені положення, отримані та описані у другому розділі. Так, на рис. 4.11 та 4.12 приведені отримані і розраховані залежності рівня вихідного сигналу (нормовані) в залежності від форм та розмірів електродів.



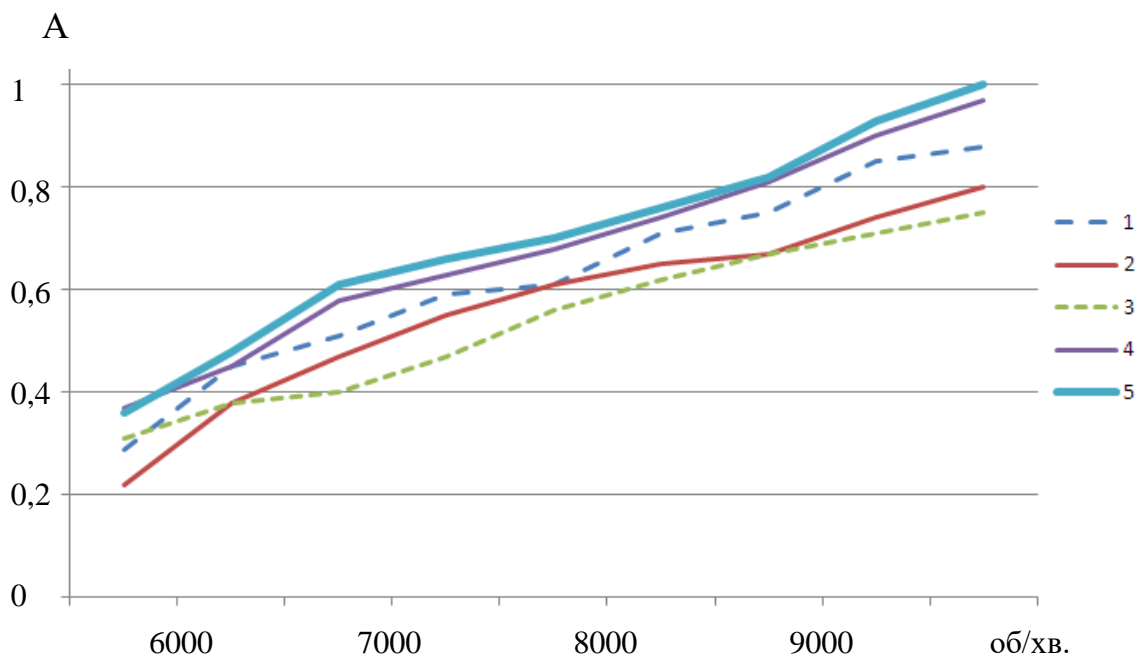


Рис. 4.10. Залежність нормованих значень вихідної напруги п'єзоперетворювачів в залежності від частоти обертання мотора при різних підключеннях асиметричних біморфних п'єзоелементів (АБП):  
 1 – три АБП; 2 – чотири АБП; 3 – один АБП; 4 – два АБП з однієї сторони консольної пластини; 5 – два АБП з протилежних сторін консольної пластини

На рис. 4.11 наведено результати дослідження тонких асиметричних біморфних ДДП з ПП у формі диска. Зміною розмірів (відповідно й форм) електродів змінюється кут між векторами поляризації  $P$  й напруженості поля між вихідними електродами  $E$ . Як видно з рис. 4.11, б, залежність вихідного сигналу має нелінійний характер, що цілком підтверджується отриманий в другому розділі висновок. Крім того, крива має свій максимум, тобто рівень вихідного сигналу є максимальним не завжди при перпендикулярних векторах  $P$  та  $E$ . Це означає, при проектуванні конструкцій ПП необхідно використовувати отримані в роботі моделі, а не просто забезпечувати перпендикулярність відповідних векторів. Цей результат був підтверджений й на інших подібних експериментах.

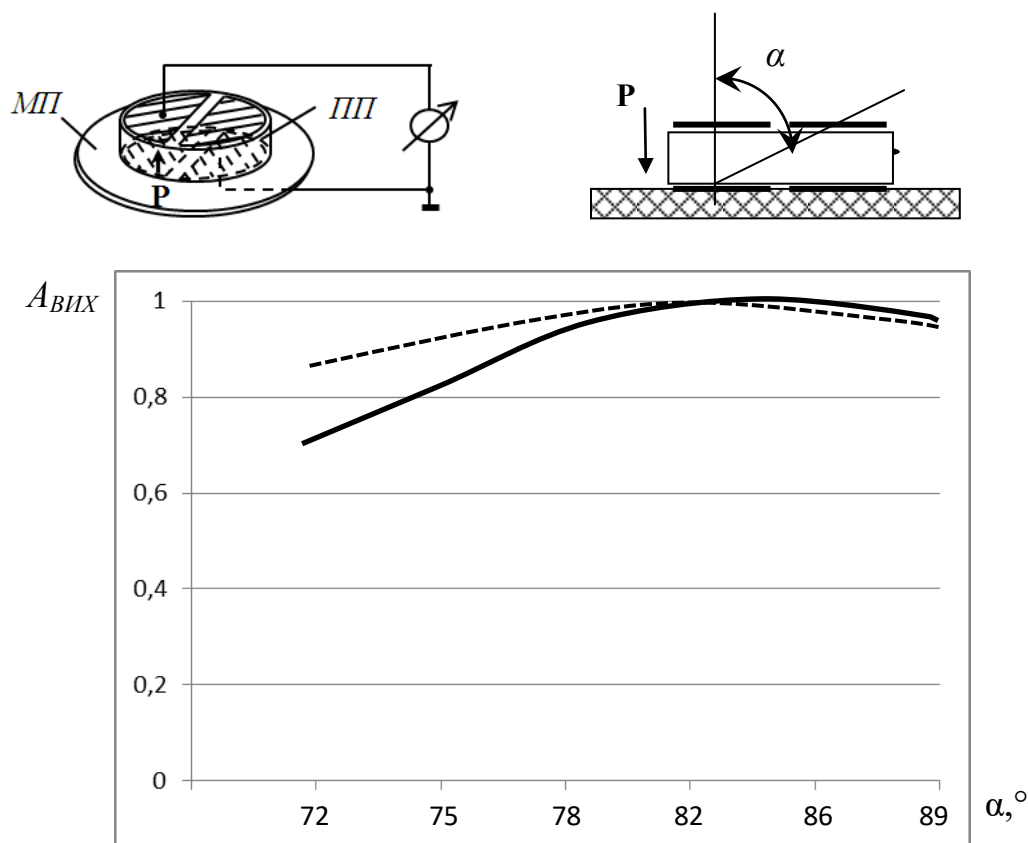


Рис. 4.11. Розраховані (пунктирна лінія) та експериментально отримані (суцільна лінія) залежності рівнів вихідного сигналу (нормовані) в залежності від форм та розмірів електродів з ПП у формі тонкого диска

На рис. 4.12 показаний випадок дослідження циліндричних ПП, у яких ПП поляризовані по товщині. Електроди розміщувалися на торцях циліндру, забезпечуючи при цьому майже перпендикулярний кут між векторами  $P$  та  $E$ . Зміною розмірів та форм електродів досліджувався вплив кута між основними векторами на рівень вихідного сигналу. Отримані результати підтверджують висновки, що були отримані в попередньому дослідженні.

Також були експериментально перевірені результати, що були отримані при розробці функціональних моделей, які описані в п. 2.2. Так, для прикладу, при дослідженні впливу довжини консольної пластини на рівень вихідного сигналу в експерименті були обрані асиметричний біморфний п'єзоелемент 7ВВ-20-6С та оцинковані сталеві пластини з

розмірами 72x25x0,15 мм. Поступовим відрізанням вільного кінця пластини зменшувався її розмір. Різниця відхилень між експериментальними та теоретичними даними не перевищувала 7 %.

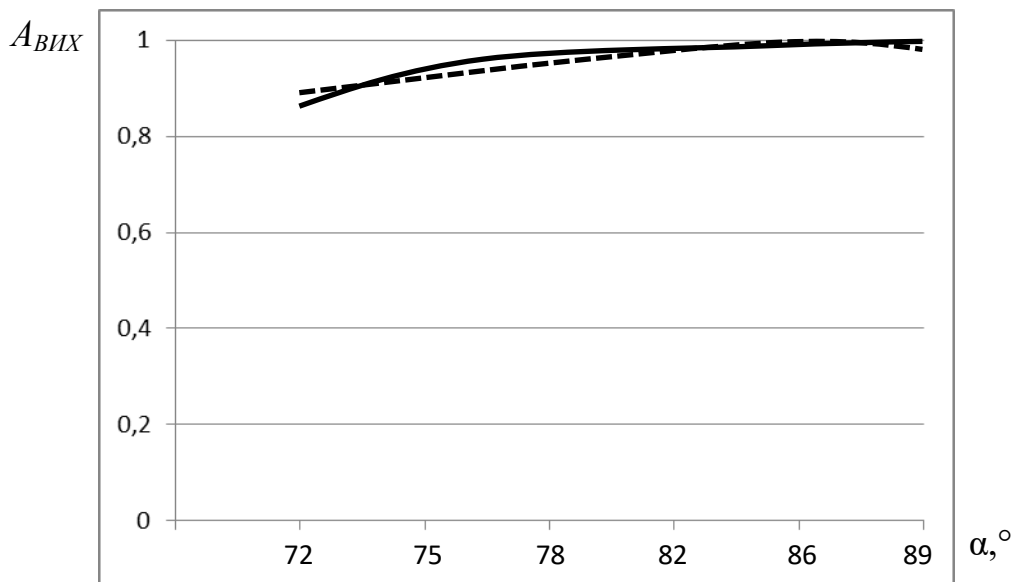


Рис. 4.12. Розраховані (пунктирна лінія) та експериментально отримані (суцільна лінія) залежності рівнів вихідного сигналу (нормовані) в залежності від форм та розмірів електродів з ПП у формі циліндра

Слід зазначити, що в усіх проведених досліджень розбіжність між експериментальними та теоретичними даними не перевищувала 10 %. Враховуючи, що ПП є складним елементом, який складно описати математично та побудувати відповідну точну модель, ці результати можна вважати цілком прийнятними.

#### 4.1.4 Експериментальний стенд для дослідження акустичних впливів

Для дослідження впливу акустичних хвиль був зібраний стенд, подібний до стенду за рис. 4.8, де замість експериментальної платформи був використаний пульсофон (рис.4.13). Рівень звукового тиску пульсофону був перевірений за допомогою шумоміру ВШВ-003.

Відстань між досліджуваним ПП та граничною робочою поверхнею пульсофону дорівнювала 3 мм. Рівень подачі напруги на пульсофон змінювався в діапазоні від 1 до 10 В. Діапазон робочих частот, в якому здійснювалися дослідження – 200 Гц – 15 кГц (обраний з міркувань лінійності характеристики звукового тиску).

Проведені експерименти підтвердили результати, отримані за допомогою стану за рис. 4.8. Проте рівень сигналу, порівняно з вібраційними впливами, був приблизно на порядок менше, що цілком прийнятно, враховуючи різницю вібраційного та акустичного впливу на досліджувані ПП.

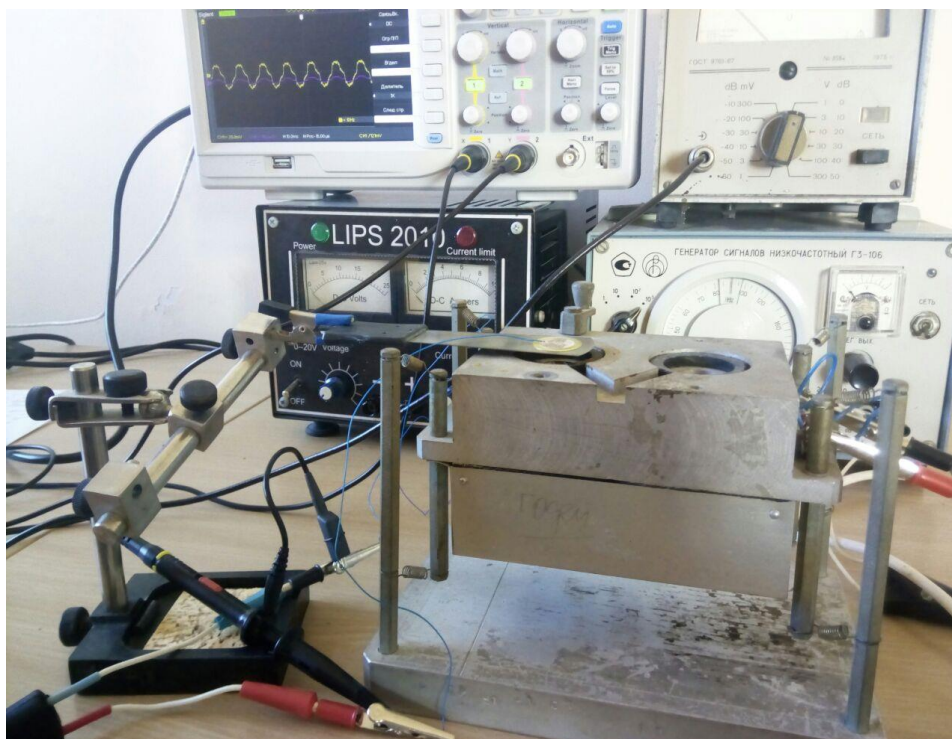


Рис. 4.13. Експериментальний стенд для досліджень акустичних впливів:  
 1 – осцилограф SDS1052DL+; 2 – мілівольтметр ВЗ-38; 3 – джерело живлення Lips2010; 4 – генератор Г3-106; 5 – пульсофон; 6 – тримач досліджуваного зразка; 7 – досліджуваний консольний ПП

Крім того, на стенді було з'ясовано, що серед розглянутих асиметричних біморфних п'єзоелементів найбільшу чутливість мають елементи 7ВВ-20-6С.

## 4.2 Зразки розроблених IoT пристроїв на базі запропонованих теоретичних рішень

### 4.2.1 Розробка IoT Smart Toys

Розроблені в роботі ідеї були застосовані при проектуванні інтелектуальних IoT іграшок в стартап проєкті Cubomania (<https://cubomania.io>) [2], де автор брав безпосередню участь як розробник і член команди, що представляла цей виріб на різноманітних конкурсах і виставках. Іграшки проєкту – це інтерактивні мультимедійні кубики з функцією руху, програмною підтримкою, що розвивають творчість і моторику дитини.

Загальний вигляд базового IoT пристрою (без експериментальної консольної пластини з ПП) показаний на рис. 4.14. До складу виробу входять: 1 – корпус; 2 – LEGO поверхні (зверху та знизу); 3 – захисне скло; 4 – кольоровий екран; 5 – відеокамера; 6 – ІК-датчик наближення; 7 – CPU (центральний процесор); 8 – динамік; 9 – датчик звуку; 10 – датчик температури; 11 – магнітний компас, акселерометр, гіроскоп; 12 – акумулятор; 13 – модуль зарядки; 14 – два мотора.

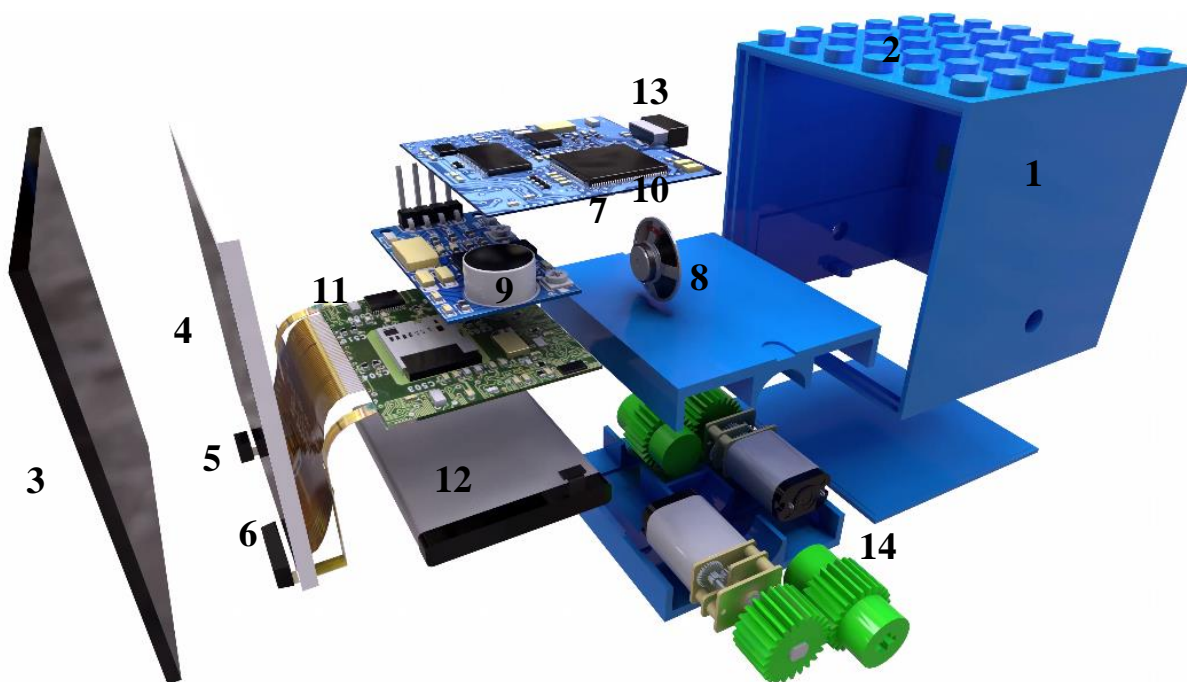


Рис. 4.14. Склад розробленої IoT Smart Toys

Консольна пластини закріплювалася всередині на задній стінці пристрою. В експерименті були використані оцинкована стальна пластинка марки 08пс/3сп розмірами 35x20x0,4 мм та три асиметричних біморфних п'єзоелементи 7ВВ-12-9. Проводилися різноманітні експерименти як з вібрацією іграшки на платформі, так і безпосередньо під час гри дитиною іграшкою (кілька разів з грою кількома дітьми протягом біля двох годин).

Обробка результатів експериментів показала, що використання консольних пластин дозволило до 10 % подовжити роботу інтелектуальної іграшки. Розроблені IoT Smart Toys були представлені на виставках електронних виробів шести міст України та на міжнародній виставці CES-2018 (Лас-Вегас, США). Зображення стендів та самих розроблених IoT Smart Toys наведено у додатку Б дисертації.

#### 4.2.2 Розробка п'єзомагнітних тахометрів

Як було показано в п.1.1, IoT пристрої мають застосування в багатьох областях життєдіяльності людини, однією з яких є й виробництво. В роботі було досліджено можливість використання запропонованих рішень на прикладі п'єзомагнітних тахометрів, оскільки вібрація та механічні оберти робочих валів можуть бути використані як елементи впливу на ПП.

В результаті досліджень були розроблені та запатентовані дві конструкції п'єзомагнітних тахометрів [83, 84] (рис. 4.15, 4.16).

П'єзомагнітний тахометр за рис.4.16 [83] містить ротор 1 із закріпленим на ньому постійним магнітом 2, статор 3 (на фіг. 1 показаний край статора) з пластиною 4 з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника, яка обернена до магніту ротора 2, і п'єзоелементом 5 з двома електродами 6 та 7, які розташовані на протилежних сторонах п'єзоелемента 5 і підключені до підсилювача електричних коливань 8 і лічильника імпульсів 9. При обертанні ротора 1 постійний магніт 2 при

кожному оберті ротора проходить поблизу нерухомо встановленої на деякій відстані пластини з магнітопровідного матеріалу 4. При цьому магнітні сили взаємодії притягують (відштовхують) пластину 4 до магніту 2. Ця взаємодія передається п'єзоелементу 5 та викликає розтяг (стиснення) п'єзоелемента і, через прямий п'єзоефект, призводить до появи напруги на сигнальних електродах 6 та 7. Отриманий сигнал підсилюється підсилювачем електричних коливань 8 і підраховується лічильником імпульсів 9.

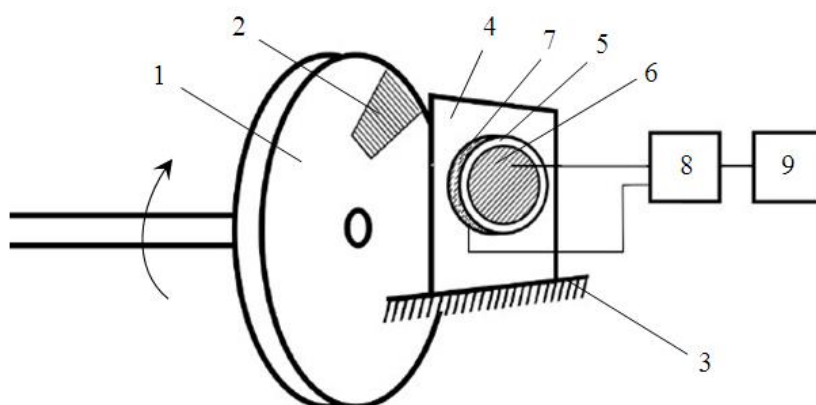


Рис. 4.15. Конструкції п'єземагнітних тахометрів за патентом 132568:

1 – ротор; 2 – постійний магніт; 3 – статор; 4 – пластина з магнітопровідного матеріалу; 5 – п'єзоелемент; 6, 7 – електроди; 8 – підсилювача електричних коливань; 9 – лічильник імпульсів

Виконання пластини з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника дозволяє здійснити закріплення її тільки однією стороною (кінцем пластини), у той час коли три інші сторони вільно коливаються. У свою чергу закріплення тільки однієї сторони призводить до того, що п'єзоелемент отримує властивості консольного п'єзоперетворювачів, коли вільні кінці пластини отримують максимальні переміщення. Це призводить до максимальної деформації закріпленого на пластині п'єзоелемента, що в свою чергу призводить до підвищення рівня вихідного сигналу.

В експерименті був виготовлений п'єземагнітний тахометр, в якому використовувався постійний магніт діаметром 20 мм і товщиною 3 мм із

самарій-кобальту; прямокутна пластина 40x50 мм товщиною 0,2 мм із магніто-м'якого сплаву 50НП, п'єзоелемент діаметром 30 мм і товщиною 0,3 мм з п'єзокераміки ЦТС-19. Відстань між магнітом ротора і пластиною статора була рівною 2 мм.

В якості двигуна використовувався ДПМ-20НЗ-01 з частотою обертання 9000об/хв. Рівень вихідного сигналу по схемі, що заявлена, був рівним 255 мВ. Для тахометра за схемою прототипу [82], коли усі сторони пластини закріплені – 70 мВ. Таким чином, виготовлення тахометра з конструкцією, що запропонована в роботі, дозволило підвищити рівень вихідного сигналу більше ніж в 3 рази.

Інша запатентована конструкція п'єзомагнітного тахометра показана на рис. 4.16 [84]. Форма п'єзоелементу, яка використана в тахометрі, та вигляд електродів тощо, показані на рис. 4.17.

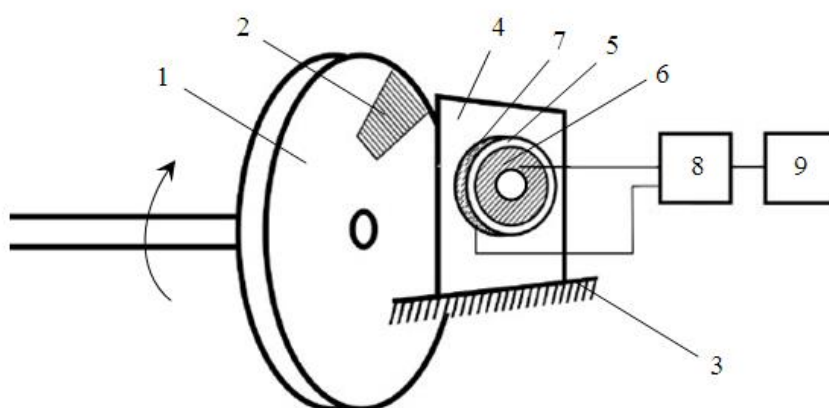


Рис. 4.16. Конструкції п'єзомагнітних тахометрів за патентом 132569

П'єзомагнітний тахометр на рис. 4.17 містить ротор 1 із закріпленим на ньому постійним магнітом 2, статор 3 (на рис. 4.16 показаний край статора) з пластиною 4 з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника, яка обернена до магніту ротора 2, і п'єзоелементом 5 з двома електродоми 6 та 7, які розташовані на протилежних сторонах п'єзоелемента 5 і підключені до підсилювача електричних коливань 8 і лічильника імпульсів 9. Причому, електрод 7, що знаходиться на тій стороні п'єзоелемента 5, що прикріплюється до пластини 4, виконаний у



вигляді диску діаметру  $d$ , а електрод 6 на протилежній стороні п'єзоелемента 5 виконаний у вигляді кільця з внутрішнім діаметром  $d$  та зовнішнім, що дорівнює діаметру п'єзоелемента  $D$ . В пластині 4 зроблений отвір діаметром  $d_{пл}$  таким чином, що електрод 7 розміщується всередині цього отвору, причому  $d < d_{пл} < D$ .

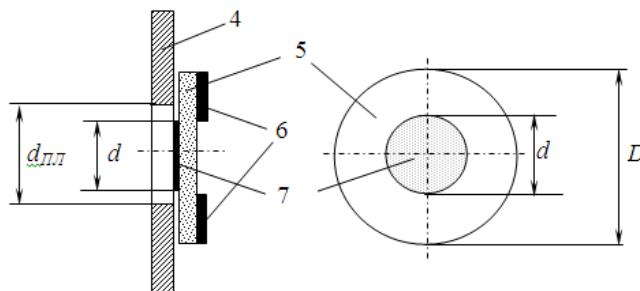


Рис. 4.17. Конструкції п'єзоелемента, що використаний в тахометрі за патентом 132569

Розташування отвору в пластині та сигнальних електродів на п'єзоелементі таким чином, як це показано на рис. 4.18, приводить до того, що вектор напруженості електричного поля вихідного сигналу створює з вектором поляризації кут рівний  $90^\circ$ . Це призводить до появи доменно-дисипативних властивостей п'єзоелемента, які характеризуються збільшеною величиною вихідного сигналу.

В експерименті використані тіж самі компоненти, що й для експерименту з тахометром за рис. 4.15. Дисковий електрод п'єзоелемента виконаний діаметром 18 мм, кільцевий внутрішнім діаметром 18 мм та зовнішнім 30 мм. В пластині навпроти дискового електрода зроблений отвір діаметром 20 мм. Рівень вихідного сигналу по запропонованій конструкції був рівним 147 мВ. Для тахометра за схемою прототипу [82], коли усі електроди виконані сполошними на всю поверхню сторони п'єзоелемента та без отвору у пластині – 72 мВ. Таким чином, виготовлення тахометра за конструкцією патенту дозволило підвищити рівень вихідного сигналу приблизно в 2 рази.

В рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу» (№ ДР 0115U000316) була запропонована конструкція реалізації п'єзомагнітного перетворювача для генерації електричної енергії, основна механічна частина котрого показана на рис. 4.18 [94].

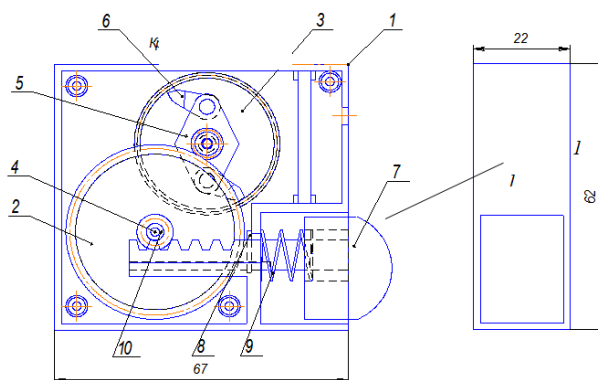


Рис. 4.18. Конструкція п'єзогенератора:

1 – корпус; 2 – маховик; 3 – шестерня; 4 – вал; 5 – муфта; 6 – зуб муфти; 7 – кнопка; 8 – шайба; 9 – пружина; 10 – штифт; 11 – п'єзоелемент

Робота пристрою здійснюється наступним чином. При натисканні на кнопку 7 розкручується маховик 2, який через муфту 5 завдяки зубця 6 штовхає шестерню 3. Магніти, які розміщені на зубцях муфти впливають на п'єзоелемент 11. Електрична напруга, яке утворюється на п'єзоелементі 11, передається на плату електричної обробки сигналу (на рис. не показана).

Креслення деяких з елементів показані на рис. 4.19 [94].

Таким чином, застосування запропонованих рішень збільшення амплітуди вихідного сигналу п'єзомагнітних перетворювача дозволило побудувати п'єзомагнітних перетворювача механічної енергії в електричну з достатнім рівнем накопиченої енергії для живлення автономних малопотужних IoT пристроїв.

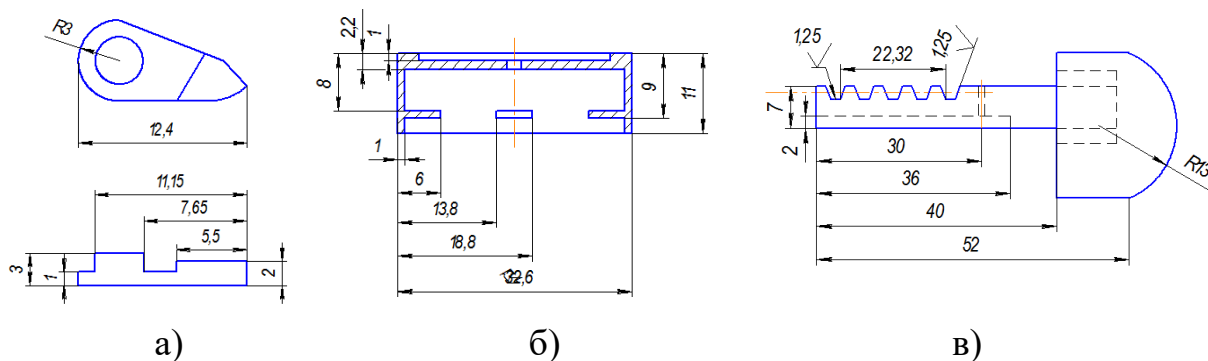


Рис. 4.19. Креслення деталей: а) – зуб муфти; б) – маховик; в) – кнопка

### 4.3 Приклади областей застосування розроблених IoT пристроїв

В п.1.1 визначався великий перелік галузей застосування IoT техніки. Використання розроблених в роботі рішень найбільш цікаве в тих випадках, де заміна батарейного/акумуляторного живлення є або неможлива, або вельми проблематична. Цим характеризуються виробництва, де такі датчики фізично недоступні. Особливо гостро це питання стоїть у випадку, якщо це датчики аварійних ситуацій. Розглянемо далі такі випадки.

#### 4.3.1 Визначення аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв за допомогою консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів

Визначення аварійних ситуацій та аварій на ранніх стадіях в типових технологічних процесах, пов'язаних з хімічною, радіаційною та пожежовибухонебезпекою, є важливим питанням в запобіганні виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру [29, 75, 80, 110].

В більшості випадків аварії на потенційно-небезпечних об'єктах (ПНО) або об'єктах підвищеної небезпеки (ОПН) відбуваються не через форс-мажорні обставини, такі як цунамі, землетрус, військова агресія

тощо, а в наслідок порушення (зміни) технологічного процесу через поломку обладнання або недбале управління (людський фактор). В таких випадках аварія, як правило, не відбувається миттєво – їй передують деякі зміни в роботі обладнання, які можуть бути визначені на ранніх стадіях. Зміна в роботі обладнання призводить до змін струмів, механічних обертів тощо, що супроводжується зміною теплової картини нагріву окремих елементів, а також зміною механічних коливань агрегатів. Зміну теплової картини фіксують за допомогою тепловізорів. Такий спосіб добре зарекомендував себе у визначенні бракованих електричних плат, де легко фіксується зміна нагріву радіоелементів при зміні проходження через них струмів. Метод термофіксації на ПНО та ОПН в більшості випадках не є дієвим, оскільки робочі агрегати більшості небезпечних об'єктів вкриті корпусами, що ускладнює процес отримання термокартини. Крім того, у випадку пожежі наявний дим повністю заблокує отримання будь-якої візуальної картини.

Іншим методом фіксації відхилень в роботі ПНО та ОПН є зміна вібраційної картини. На рис. 4.20 наведений приклад використання віброгенератора Vulture на промисловій установці [18].



Рис. 4.20. Установка віброгенератора Vulture на промисловому двигуні [18]

Наявність відхилень в вихідному струмі віброгенератора слугує показником характеру функціонування і стану контролюємого обладнання.

В якості таких датчиків вібрацій найчастіше й використовують п'єзокерамічні перетворювачі. Проте при такому методі фіксацій в відхиленні роботи обладнання ПНО та ОПН виникає декілька технічних питань:

- спосіб передачі інформації від датчиків вібрацій;
- можливість ідентифікації пошкодженого обладнання при їх великій чисельності;
- чутливість датчиків для фіксації малих відхилень вібрацій.

Перша задача легко розв'язується за допомогою використання бездротового зв'язку, хоча це і призводить до подорожчання загальної системи контролю.

Для ідентифікації об'єктів (друга задача), які можна зчитувати дистанційним способом, у логістиці та на виробництві найчастіше використовують RFID (Radio Frequency Identification). Проте, наявні в RFID-передавачах мікроконтролери чутливі до сильних радіовипромінювань, що обмежує їх застосування в зонах дії великих небажаних радіочастотних випромінювань, якими як раз і характеризуються промислові ПНО та ОПН. В цьому випадку рішенням є застосування радіочастотної ідентифікації на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), які так само здійснюються на п'єзокерамічних елементах [102]. Конструкція такого ідентифікатора показана на рис. 4.21 [110].

Радар випромінює радіочастотний сигнал. На поверхні п'єзопластики нанесений зустрічно-штирвовий перетворювач (ЗШП), за допомогою якого, через прямий п'єзоефект, електромагнітні коливання сигналу перетворюються у механічні коливання п'єзопластики. На поверхні пластини нанесені металеві смуги, що слугують рефлекторами і відбивають сигнал. Відбитий сигнал, завдяки зворотному п'єзоефекту та ЗШП, перетворюється у радіочастотний сигнал, який фіксується радаром. Завдяки різним відстаням між металевими смугами (рефлекторами)

формується різний радіочастотний сигнал, що слугує ідентифікатором перетворювача.

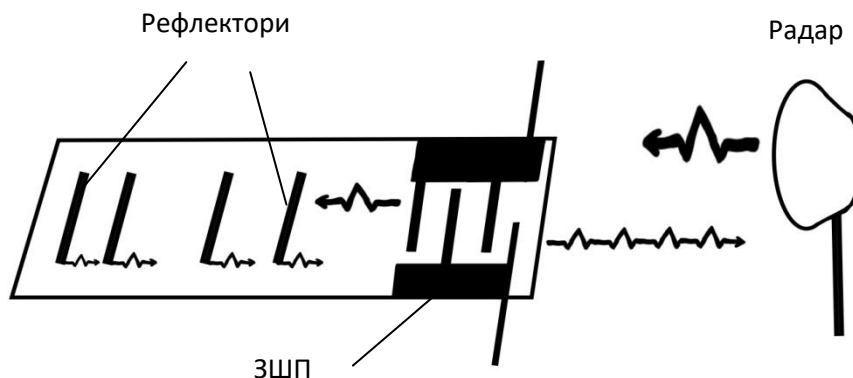


Рис. 4.21. Радіочастотний п'єзоідентифікатор на ПАХ

Таким чином, загальний принцип роботи п'єзотранспондера (транспондер – приймально-передавальний пристрій) в якості датчика показаний на рис. 4.22 [109].

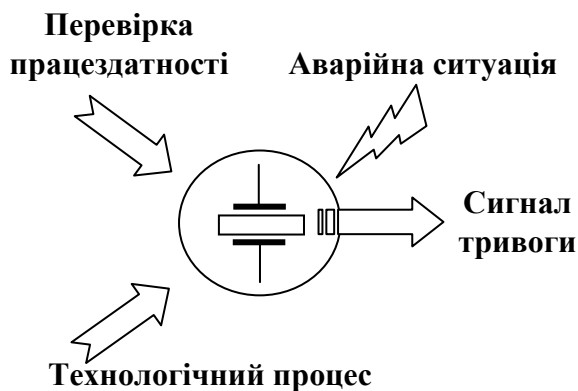


Рис. 4.22. Принцип роботи п'єзотранспондера в якості датчика

Під впливом технологічного процесу (статичний та/або динамічний тиск, вібрація тощо) відбувається живлення датчика. При наявності аварійного стану п'єзодатчик фіксує відхилення технологічного процесу від заданого і дистанційно по безпроводному каналу передає ідентифікаційний сигнал тривоги. Причому при необхідності за

допомогою приймально-передавального пристрою можна в будь-який час провести перевірку працездатності датчика.

Для вирішення третьої задачі – підвищення чутливості датчиків, запропоновано використання розроблених в роботі п'єзодатчиків вібрації у вигляді консольних доменно-дисипативних п'єзокерамічних перетворювачів. Збільшення чутливості за рахунок використання доменно-дисипативних властивостей п'єзоелементу, коли вектор напруженості поля вихідного сигналу практично перпендикулярний вектору поляризації кераміки, можна досягти зміною форм електродів на сторонах п'єзоелемента. Крім того, для ідентифікації п'єзоперетворювачів в роботі запропоновано змінювати форми та площі електродів при виконанні головної вимоги: вектор напруженості поля вихідного сигналу повинен наближатися до нормалі до вектора поляризації кераміки. Цього можна досягти, якщо електроди на протилежних гранях не будуть перетинатися (рис. 4.23) [79].

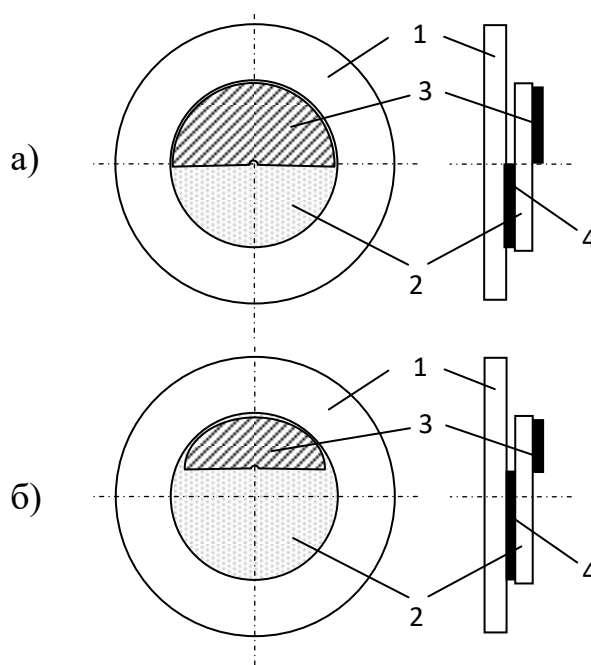


Рис. 4.23 Консольні асиметричні біморфні доменно-дисипативні п'єзоперетворювачі для задачі ідентифікації

На рис. 4.23 показані два варіанти доменно-дисипативних перетворювачів: на металевій пластині 1 закріплений тонкий круглий поляризований по товщині п'єзоелемент 2, на якому закріплені з різних сторін п'єзоелементу електроди 3 та 4. Так як площі електродів з різних сторін не перетинаються, вектор напруженості вихідного поля буде завжди наближатися до нормалі до вектора поляризації, забезпечуючи доменно-дисипативні властивості п'єзоперетворювача [72, 122].

Як відомо, різна форма та розміри електродів призводять до зміни як чутливості, так і значень резонансної частоти. Таким чином, зміною розмірів та форм електродів можна змінювати властивості перетворювачів, що забезпечить їх ідентифікацію, а отже, і ідентифікацію обладнання, на якому вони закріплені.

В експериментальному дослідженні була поставлена задача ідентифікації трьох асиметричних п'єзоперетворювачів. Для цього були вибрані п'єзоелементи 7ВВ-12-9 фірми muRata [4], що складаються з металевої пластини з латуні діаметром 12 мм та товщиною 0,1 мм із закріпленою на ній п'єзоелемента діаметром 9 мм та товщиною 0,12 мм. Резонансна частота – 9 кГц, ємність – 8 нФ, вага – 0,143 г.

Для імітації передачі вібрації використана оцинкована стальна пластина марки 08пс/3сп розмірами 35x20x0,4 мм, на якій було закріплено три досліджувані п'єзоелементи (ідентифікатори) та вихідний п'єзоелемент, з якого знімався сигнал. Пластина була закріплена консольно (з одного боку пластини). В якості джерела вібрації виступив мотор AMS1141M з асиметричним навантаженням на валу. Конструкція експериментальної установки показана на рис. 4.24 [110].

Вібраційна платформа була зафіксована за допомогою АОУУЕ328. В якості джерела живлення використаний прилад Lips2010. Для створення та вимірювання параметрів вібрації використано осцилограф SDS1052DL+, генератор ГЗ-106, мілівольтметр ВЗ-38.



На трьох п'єзоелементах-ідентифікаторах були виконані електроди різних форм за умови не перетинання площ протилежних граней: третина площі, половина, та дві третини.



Рис. 4.24. Експериментальна установка для дослідження п'єзоідентифікаторів

Проведені експерименти показали, що зміна напруги на кожному з трьох п'єзоелементів викликала зміну напруги та форми вихідного сигналу на четвертому – вихідному п'єзоелементі. Причому, завдяки різним характеристикам п'єзоелементів-ідентифікаторів вдалося однозначно визначити, на який з трьох п'єзоелементів подавалася напруга.

Таким чином, зміна вібрації обладнання, яка виникне через зміну його робочого процесу, буде передана п'єзоперетворювачу, що закріплений на досліджуваному обладнанні. Переданий від п'єзоперетворювача сигнал буде однозначно ідентифікований, а отже, буде ідентифіковане обладнання, яке змінило свій робочий режим. Це дає можливість визначення аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв на їх ранніх стадіях [110].

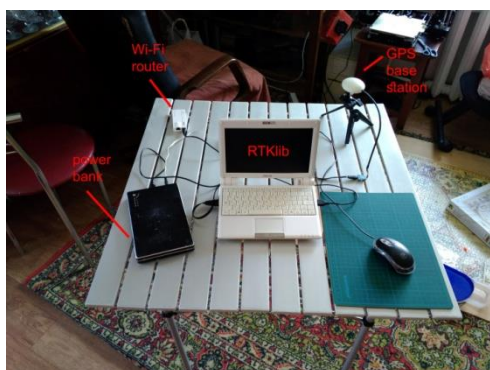
#### 4.3.2 Розробка високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI)

Розробка була успішно впроваджена при проектуванні високоточного маяка-трекера, де фізичним впливом на ПП є потік повітря, що з'являється при падінні трекера з висоти. Завдяки запропонованому рішенню був виграний науковий конкурс "Best Device For FAI" (27 травня 2017 р., м. Дніпро).

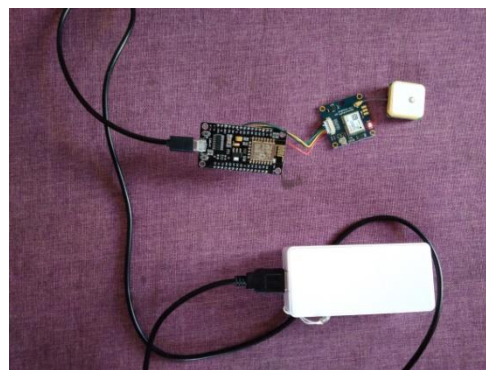
Учасникам інноваційного турніру належало вирішити задачу запроповану Міжнародною авіаційною федерацією (FAI). При виконанні багатьох завдань на змаганнях з повітроплавання пілотів просять скинути спеціальний маркер якомога ближче до цілі, що знаходиться на землі. Виграє учасник, маркер якого ближче до цілі. Учасникам турніру пропонувалося знайти рішення, згідно ТЗ, яке зробить можливим оперативне, автоматичне вимірювання положення маркерів, що дозволить показувати глядачам відстань від центру до маркерів онлайн.

В даному випадку на маркері розміщувався розроблений в роботі ПП, на який впливав потік повітря при падінні маркера. За завданням конкурсу існує обмеження по масі. Одним з найважчих елементів є акумулятор. Заміна акумулятора на запропонований пристрій суттєво здешевлює IoT пристрій (оскільки інформація повинна дистанційно передаватися в мережу і надсилатися усім учасникам та спостерігачам змагань) і робить його набагато легшим. На рис. 4.25, а зображена базова станція, на рис. 4.27, б – безпосередньо сам трекер.

В табл. 4.1 наведено калькуляцію всієї розробленої системи. Як видно з таблиці, заміна акумулятора на запропонований виріб дозволяє здешевшати загальну вартість трекера до 15 % (за рахунок заміни вартісного акумулятора) при збереженні працездатності трекера.



а)



б)

Рис. 4.25. Базова станція (а) та маяк-трекер (б)

Таблиця 4.1. Калькуляція собівартості автоматизованої системи для проведення змагань повітряних куль

Комплектуючі	Вартість одного виробу, у.о.	Вартість серійного виробу		
		в Україні, у.о.	За кордоном, у.о.	Вартість доставки в Україну
<b>Базова станція</b>				
Плата Raspberry 3	38,17	36,98	39,99	0
Wi-Fi роутер з можливістю підключення зовнішньої антени	19,08	17,18	17,1	2,33
UPS під автомобільний акумулятор	62,40	56,16	55,8	1,74
Автомобільний акумулятор	46,76	42,08	41,8	7,64
Направлена Wi-Fi антенна	54,20	48,78	19,25	0
GPS модуль	15,57	11,45	18,22	2,33
GPS антенна	13,74	12,37	2,61	1,68
Доставка		12		15,72
Всього:	249,92	237	210,49	
<b>Мітка</b>				
GPS модуль	15,57	11,45	18,22	2,33
Wi-Fi модуль, з роз'ємом під зовнішню антену	3,24	3,02	1,87	2,82
Wi-Fi антенна	13,74	12,06	3,36	1,74
Акумулятор	3,85	3,44	6,15	0,48
Корпус	3,00	3,00	3,00	
Стрічка	2,00	2,00	2,00	
Доставка		4,00		7,37
Всього:	41,4	38,97	41,97	

За результатами перемоги в конкурсі була відкрита та успішно виконана госпдоговірна науково-дослідна робота на тему «Розробка технічного рішення виготовлення високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI)» (договір № 154 від 13.06.2017), в якій дисертант був виконавцем.

#### **4.4 Порівняння запропонованих рішень з відомими**

Впровадження запропонованих в роботі рішень дозволяє суттєво підвищити потужність енергії, що передається ПП до навантаження. Так, на рис. 4.26 наведено порівняння потужностей, які генерують відомі рішення, та запропоновані в роботі, а саме: наведено значення потужностей, які споживають різні типи електронної техніки, та рівні потужностей, які генерують відомі та запропоновані ПП.

Як видно з рис. 4.26, відомі рішення можуть забезпечити споживання дуже малої кількості компонентів. В свою чергу, енергії, яку генерують запропоновані ПП дозволяють жити майже всі необхідні компоненти для роботи IoT техніки, що говорить про можливість їх ефективного застосування в якості постійних та додаткових джерел напруги.

Запропоновані в роботі моделі (п. 2.2) дозволяють визначати форми біморфних п'єзоелементів, їх електродів, а також необхідного механічного напруження для збільшення потужності вихідного сигналу IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів. Функціональні моделі (п. 2.3) консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів дозволяють розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів, а також металевої та консольної пластин для отримання максимального рівня вихідного сигналу п'єзоперетворювача, а отже, подовження часу роботи IoT пристрою при його автономному живленні.

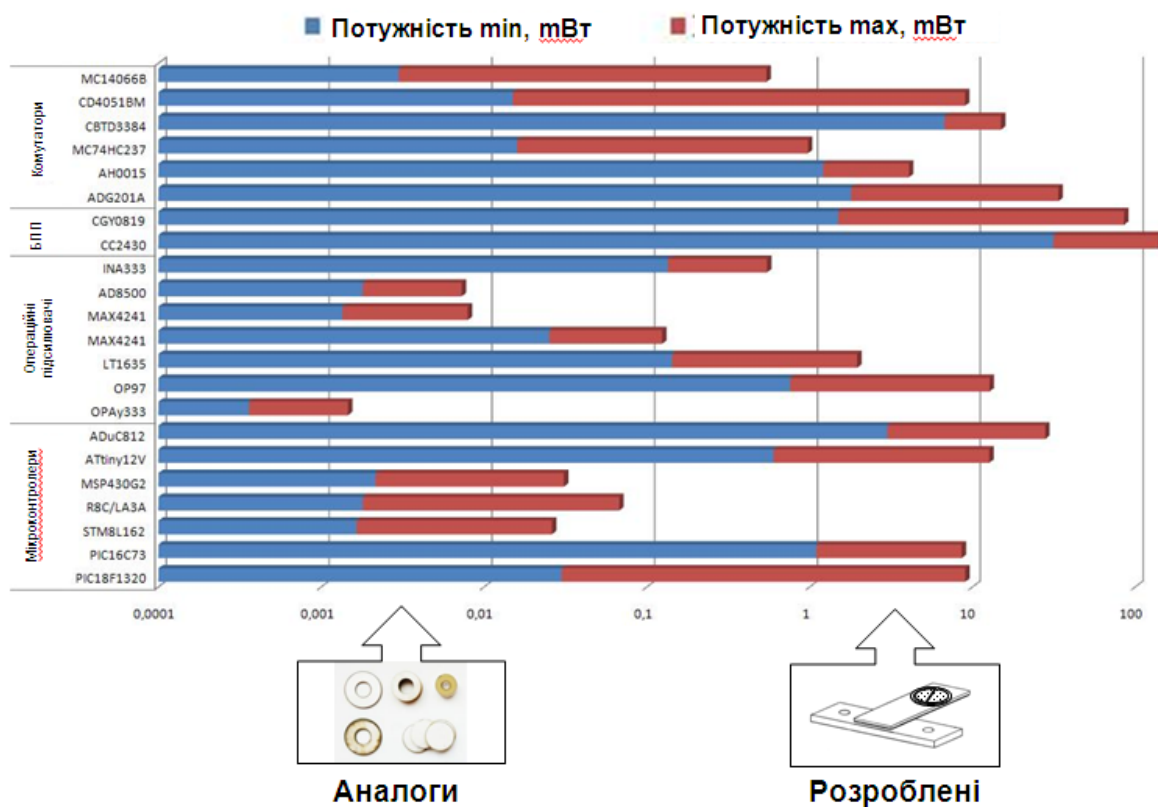


Рис. 4.26. Порівняння потужностей, які генерують відомі рішення, та запропоновані в роботі

Розроблена математична модель (п. 3.1) функціонування IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення дозволяє визначати можливість та час автономної роботи таких пристроїв з використанням розроблених в роботі п'єзоперетворювачів. Така модель дозволяє визначити кількість необхідних ПП для живлення всього IoT пристрою, а також визначити необхідні підключення в залежності від вирішуваних задач: які ПП і в якій кількості повинні під'єднуватися до яких процесорних модулів. Це дозволяє підвищити енергоефективність IoT пристрою і подовжити час його роботи.

Крім того, експериментальне дослідження розроблених зразків IoT пристроїв на базі запропонованих в роботі консольних доменно-дисипативних асиметричних біморфних п'єзокерамічних перетворювачів показали, що отримані в роботі положення дозволяють подовжити до 10 % час роботи IoT пристроїв при їх батарейному живленні, дати можливість

здійснити передачу сигнальної інформації при надзвичайній події, а також зменшити на 15 % вартість IoT пристроїв.

Враховуючи все вищенаведене, можна стверджувати, що поставлена в роботі мета досягнута.

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

В роботі зібрані експериментальні стенди для дослідження вібраційних та акустичних впливів на ПП. Розроблене власне схемотехнічне рішення накопичувача енергії від ПП на основі чипу LTC3330 Linear Technology, виготовлені зразки.

За допомогою установки були досліджені різні варіанти виконання конструкції консольних п'єзоперетворювачів накопичення енергії вібрації: біморфні та триморфні, різні схеми під'єднання п'єзоелементів, їх кількість та тип. Дослідження проводилися з 14 типами ПП, різними типами біморфних та консольних пластин. Розроблено конкретні рекомендації по проектуванню ПП для енергоефективних IoT пристроїв.

Показані приклади застосування розроблених рішень: для IoT Smart Toys стартапу Subomania та в конструкціях п'єзомагнітних тахометрів. Показано, що запропоновані рішення дозволили збільшити амплітуду вихідного сигналу до достатнього рівня для живлення автономних малопотужних IoT пристроїв.

Показана можливість ідентифікації технологічного обладнання за допомогою запропонованих в роботі рішень, що може бути використане в системі визначення аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв. Здійснено розробку п'єзокерамічних автономних датчиків з можливістю ідентифікації, що дозволило використовувати їх в системах раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв. В якості такого ідентифікатора в п'єзоперетворювачах запропоновано використовувати форми та розміри електродів.

Показана реалізація запропонованого в роботі рішення при проектуванні високоточного маяка-трекера для змагань повітряних куль під егідою міжнародної федерації авіаційних видів спорту (FAI).

Здійснено порівняння енергоефективності відомих рішень із запропонованими. Експериментальне дослідження розроблених зразків IoT пристроїв на базі запропонованих в роботі консольних доменно-дисипативних асиметричних біморфних п'єзокерамічних перетворювачів показали, що отримані в роботі положення дозволяють подовжити до 10 % час роботи IoT пристроїв при їх батарейному живленні, дати можливість здійснити передачу сигнальної інформації при надзвичайній події, а також зменшити на 15 % вартість IoT пристроїв.

## ВИСНОВКИ

У дисертації на основі виконаних автором досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення енергоефективності IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів, що дозволяє подовжити час роботи IoT пристроїв з автономним живленням.

У результаті виконаних автором досліджень отримано наукові та практичні результати, аналіз яких дозволяє стверджувати, що сформульовані в роботі задачі можуть вважатися виконаними. Під час виконання роботи використано коректні і достовірні методи дослідження.

У роботі отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Проведений аналіз існуючих моделей і засобів побудови IoT пристроїв з живленням від автономних джерел напруги, який виявив їх основні недоліки та шляхи подальшого вдосконалення. Показано, що перспективним напрямком подальшого розвитку є використання в якості джерел додаткового живлення п'єзокерамічних перетворювачів. Визначено основні шляхи збільшення енергоефективності IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

2. Удосконалений аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміці дозволив визначати форми біморфних п'єзоелементів, їх електродів, а також необхідного механічного напруження для збільшення потужності вихідного сигналу IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

3. Розроблені та досліджені функціональні моделі консольних біморфних доменно-дисипативних п'єзоперетворювачів дозволили розраховувати лінійні розміри п'єзоелементів, а також металеві та консольної пластин для отримання максимального рівня вихідного сигналу п'єзоперетворювача, а отже, подовження часу роботи IoT пристрою при його автономному живленні.



4. Розроблена математична модель функціонування IoT пристроїв в умовах обмеженого енергозабезпечення дозволяє визначати можливість та час автономної роботи таких пристроїв з використанням розроблених в роботі п'єзоперетворювачів.

5. Експериментальне дослідження розроблених зразків IoT пристроїв на базі запропонованих в роботі консольних доменно-дисипативних асиметричних біморфних п'єзокерамічних перетворювачів показало, що отримані в роботі положення дозволяють подовжити до 10 % час роботи IoT пристроїв при їх батарейному живленні, надають можливість здійснити передачу сигнальної інформації при надзвичайній події, а також зменшити на 15 % вартість IoT пристроїв.

6. Практична цінність роботи полягає в розширенні науково-технічної бази проектування IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів та в доведенні отриманих наукових результатів до конкретних моделей та IoT пристроїв, які впроваджено, зокрема, при розробці IoT Smart Toys стартапу Subomania та в навчальному процесі двох університетів: в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили (м. Миколаїв) та в Черкаському національному університеті імені Богдана Хмельницького.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bondarenko Yu. Yu., Bazilo K. V., Kynytska L. G. The increase of sound pressure level of monomorph transducers with the use of spatial energy force structure of piezoelement. Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2015. № 3. С. 5–9.
2. Cubomania. Reshaping education with blockchain / Cubomania. – Режим доступу: <https://cubomania.io>.
3. LTC3330 Nanopower Buck-Boost DC/DC with Energy Harvesting Battery Life Extender / Linear Technology Corporation. – Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3330fc.pdf>
4. Murata. Innovator in electronics. 7bb-12-9 // Веб-сайт магазину muRata. – Режим доступу: URL: <https://www.murata.com/products/productdetail?partno=7BB-12-9>
5. Mouser electronics. Murata 7BB Series Audio Indicators & Alerts // Веб-сайт магазину Mouser electronics. – Режим доступу: URL: [https://eu.mouser.com/Murata/Audio-Indicators-Alerts/7BB-Series/\\_/N](https://eu.mouser.com/Murata/Audio-Indicators-Alerts/7BB-Series/_/N)
6. Pcbprint.com - сервіс з експрес виробництва друкованих плат / Pcbprintю – Режим доступу: <http://pcbprint.com.ua>.
7. Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor. Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 6. No. 6 (38). P. 4–13.
8. Zhuravska I., Musiyenko M., Koretska O., Wojciech S. & others. Self-powered information measuring wireless networks using the distribution of tasks within multicore processors. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2017. Vol. 10445: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. № 1044527. P. 1–13.
9. Акопян В.А., Иванцов Е.К., Конопкин В.Ф., Морданов Б.П. Влияние механических напряжений на величину пьезомодуля  $d_{33}$  / Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. – Изд-во Ростовского университета, 1985. – С. 30-34.
10. Амелина М.А. Конспект лекций по курсу Компьютерный анализ и синтез электронных устройств / Часть 1. – Смоленск, 2005. – 120 с.

11. Андреев Н.Н. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение. – „Электричество”, 1947. – С. 2, 5–13.
12. Андреев Н.Н. Расчет пьезоэлектрического передатчика: Труды Всесоюзн. заочн. энергетич. института. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – С. 1, 5–12.
13. Барский А. Б. Параллельные процессы в вычислительных системах / М.: Изд-во «Радио и связь», 1990. – 256 с.
14. Белоус А.И. Мурашко И.А., Сякерский В.С. Методы минимизации энергопотребления при проектировании КМОП БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 2. – С. 39–44.
15. Бондаренко Ю. Ю., Филимонов С. О., Мисан А. А. Влияние геометрических параметров на амплитуду колебаний пьезоэлектрического актуатора малогабаритных летательных аппаратов / Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2018. № 2. С. 70–75.
16. Бородин В.З., Дорошенко В.А., Крамаров О.П., Мадорский В.В. Ориентационные эффекты в сегнетокерамике при действии одномерного сжатия, параллельно оси поляризации // Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. – Изд-тво Ростовского университета, 1971. – С. 49-58.
17. Бройдо В.Л., Ильина О.П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации / СПб. Питер, 2004. – 703 с.
18. Бугаев В.И., Дидук В.А., Мусиенко М.П. Сборщики энергии вибраций от Mide Technology приходят на смену батарейкам / Новости электроники. Москва. – № 7(141). 2015. С. 23-27.
19. Бумагин А., Гладкова Е., Гондарь А., Куляс М., Руткевич А., Стешенко В., Тайлеб М., Шишкин Г. Методы снижения энергопотребления в строго самосинхронных микропроцессорных схемах / Электронный журнал компоненты и технологии. – Режим доступа: [http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2009\\_09\\_109.pdf](http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2009_09_109.pdf).
20. Вальковский В. А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход / М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.

21. Виснадул Б.Д., Lupin С.А., Сидоров С.В., Чумаченко П.Ю. Основы компьютерных сетей / Учеб. Пособие. – М.: ИД «Форум»: ИНФРА-М, 2007. – 272 с.
22. Водяхо А.И., Горпец Н.Н., Пузанков Д.В. Высокопроизводительные системы обработки данных / М.: Высшая школа, 1997. – 304 с.
23. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления / СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
24. Гергель В.П., Стронгин Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем / Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2003. – 184 с.
25. Глозман И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
26. Голямина И.П. К вопросу о колебаниях по толщине поляризованных пластин титаната бария / Акустический журнал. – 1955. – 1. – С. 40-47.
27. Грибовский П.О. Керамические твердые схемы. – М.: Энергия», 1971. – 448 с.
28. Гутин Л.Я. К теории пьезоэлектрического эффекта. – ЖЭТФ, 1945, 15, 367-379.
29. Деревянко А.А., Антошкин А.А., Бондаренко С.Н., Дурев В.А., Мурын М.Н. Применение и эксплуатация приборов пожарной автоматики: Практическое пособие / Х.: УГЗУ, 2007. – 205 с.
30. Джагупов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. – С. Пб.: Политехника, 1994, – 608с.
31. Дідук В. А. Моделі, методи та засоби розроблення архітектур реконфігурованих гетерогенних комп'ютерних систем: дис. на получение научной степени канд. техн. наук: спец. 05.13.05 „Компьютерные системы и компоненты” / Миколаїв, 2012. – 140 с.
32. Домаркас В.И., Кажис Р.-Й.Ю. Контрольные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтис, 1975. – 258 с.
33. Домаркас В.И., Петраускас А. Колебания асимметричных биморфных пьезоизлучателей / Ультразвук. Науч. тр. вузов Лит. ССР. – 1976. – №8. – С. 57–64.

34. Дорошенко В.А., Бородин В.З., Крамаров О.П., Мачавариани Ш.В. Характеристики пьезокерамических материалов в условиях воздействия больших давлений и высоких температур / Электронная техника: Научно-техн. сборник. Серия 14. Материалы, выпуск 6. – М.: «Электроника», 1969. – С. 98–106.
35. Дорошенко В.А., Крамаров О.П., Виталинская. Влияние распределения доменов по критическим механическим напряжениям на характеристики пьезокерамики при действии продольного сжатия / Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. – Издательство Ростовского университета, 1976. – С. 57–65.
36. Дорошенко В.А., Пикалев Э.М., Виталинская Г.Н., Поздняков Н.Н. Доменные процессы в сегнетокерамике при действии сильного поперечного сжатия // Пьезоэлектрические материалы и преобразователи. Изд-во Ростовского университета, 1976. – с. 66-73.
37. Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования / Дискретный анализ и исследование операций, серия 2, том 7, №2, 2000. – С. 22–46.
38. Журавська І.М., Корецька О.О., Мусієнко М.П. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення. Матеріали Х Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2016», 11–14 жовтня 2016. Вінниця: ВНТУ. 2016. С. 79–81.
39. Замятина Е. Распределенные системы и алгоритмы: курс лекций / Е. Замятина, А. Миков. – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/1146/238/lecture/6141>.
40. Интернет вещей / Wikipedia. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет\\_вещей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интернет_вещей)
41. Интернет вещей, IoT, M2M мировой рынок / TAdviser. – Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья: Интернет\\_вещей,\\_IoT,\\_M2M\\_\(мировой\\_рынок\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья: Интернет_вещей,_IoT,_M2M_(мировой_рынок))
42. Кайнов А.С. Решение задачи распределения заданий в мультипроцессорной системе методом Флетчера-Ривса / Научный

- журнал «Современные наукоемкие технологии» – 2008. – №12. – Режим доступа: <http://www.eLibrary.ru>.
43. Кварцевые резонаторы: Справочник / Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М., 1976.
  44. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с.
  45. Корецька О.О. Аналіз та вибір основних складових побудови безпровідних інформаційно-вимірювальних систем з саможивлюючими первинними перетворювачами // Матеріали ХХ Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2017», 13–17 листопада 2017. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2017. С. 42–43.
  46. Корецька О.О. Вибір безпровідних технологій для інформаційно-вимірювальних систем // Матеріали VI Міжнародна науково-практична конференція «Датчики, прилади та системи – 2017». Черкаси: Видавець Третьяков О. 2017. С. 49–51.
  47. Корецька О.О. Використання програмного забезпечення Мігросар для моделювання режимів роботи поліметричних датчиків // Матеріали VIII Всеукр. науково-практична конференція «Free and Open Source Software», 22–24 листопада 2016. Харків: Харківський національний університет будівництва та архітектури. 2016. С. 49.
  48. Корецька О.О. Доменно-дисипативні п'єзоперетворювачі в конструкціях п'єзомагнітних тахометрів // Матеріали ХХI Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2018», 12–17 листопада 2018. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 100–101.
  49. Корецька О.О. До питання побудови поліметричних інформаційно-вимірювальних систем із живленням від енергії вимірювального сигналу // Матеріали ХVІІІ Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2015», 12–20 листопада 2015. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2015. С. 115–116.
  50. Корецька О.О. Математичні та функціональні моделі енергоефективних ІоТ пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів / Наукові праці: науковий журнал. Серія

- «Комп'ютерні технології». Вип. 308. Т. 320. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 33–37.
51. Корецька О.О. Методи та засоби підвищення вихідної напруги датчиків, що працюють від енергії вимірювального сигналу // Матеріали XIX Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2016», 14-18 листопада 2016. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2016. С. 91–93.
  52. Корецька О.О. Моделювання датчиків за допомогою open source програмних засобів // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Free and Open Source Software – 2015», 24-27 листопада 2015. Харків: Харківський національний університет будівництва та архітектури. 2015. С. 93.
  53. Корецька О.О. Розробка енерго-ефективних IoT пристроїв з живленням від п'єзоелементів // Матеріали Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум–2018: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі», 7–10 червня 2018. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 96.
  54. Королев М.В., Карпельсон А.Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. – М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.
  55. Кулик А.Я. Бевз О.М., Кривогубченко С.Г. Системи та мережі передавання даних / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 101 с.
  56. Куценко А.Н. Матрица чувствительностей акустического тензометра / Труды ученых ОПИ. – 1995. – №1. – С.122–124.
  57. Лавриненко В.В. Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975. – 112 с.
  58. Левин В. К. Современные суперкомпьютеры семейства МВС Электронный ресурс. / Электрон, текст, дан. – Б. м., 2002. – Режим доступа: <http://www.parallel.ru/mvs/levin.html>.
  59. Левитин А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / Пер. с англ. под ред. И. В. Красикова. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 576 с.
  60. Лейбзон А. Я. Удосконалення методики та автоматизація проектування місцевих мереж зв'язку: автореф. дис. на здобуття наук.

- ступеня канд. техн. наук: спец. 05.12.02 „телекомунікаційні системи та мережі” / Одеса, 2002. – 16 с.
61. Леонов А. Модули ZigBee / А. Леонов // Беспроводные технологии, № 1(06), 2007. – С. 14–16.
  62. Магнитные и диэлектрические приборы / Под ред. Г.В. Катца. Ч1. - М.: “Энергия”, 1964. – 416 с.
  63. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоиздат, 1989.-272с.
  64. МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов / М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
  65. Манухин С.В., Сухонос М.И. Алгоритмы оптимизации энергопотребления и повышения эффективности процессоров с масштабированием частоты и напряжения гетерогенного кластера // Труды Международной конференции «Параллельные и распределенные вычислительные системы» PDCS 2013. – 2013. – С. 209–217.
  66. Миллер Р., Боксер Л. Последовательные и параллельные алгоритмы: Общий подход / Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 406 с.
  67. Миренков Н.Н. Параллельное программирование для многомодульных вычислительных систем / М.: Радио и связь, 1989. – 319 с.
  68. Монахов О. Г. Параллельные системы с распределенной памятью: управление ресурсами и заданиями / О. Г. Монахов, Э. А. Монахова. – Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2001. – 168 с.
  69. Мусиенко М.П. Доменно-дисипативні п’єзокерамічні датчики контрольно-вимірjuвальних систем / «Вісник Технологічного університету Поділля», Хмельницький.– 2004. – Т. 3. – №2. – Ч. 1. – С. 91–94.
  70. Мусиенко М.П. Магнитные пьезодатчики частоты вращения валов рабочих механизмов // Труды межд. НТК «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта», Севастополь. – 2004 – Т. 2 – С. 165–167.
  71. Мусиенко М.П. Пьезомагнитные датчики тахометров: Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2005. – №1 (400). – С. 107-110.



72. Мусиенко М.П. Теоретические основы, методы и средства структурно-энергосилового преобразования на основе полиэлектродных пьезокерамических элементов для систем управления: Диссертация д-ра техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2006. – 495 с.
73. Мусієнко М.П. Просторова енергосилова структура п'єзокерамічних перетворювачів / Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Приладобудування», Київ. – 2004. – №27. – С. 22–27.
74. Мусієнко М.П., Савінов В.Ю. Разработка системы проектирования энергоэффективных распределенных компьютерных систем с энергоограниченными удаленными модулями // Міжнародна науково-практична конференція «Ольвійський форум» – Т. 10: ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. – С. 25–26.
75. Мусієнко М.П., Журавська І.М., Бурлаченко І.С., Денісов О.О., Корецька О.О., Белозьоров Ж.О. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку / Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 254. Т. 266. Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили. 2015. С. 112–118.
76. Мусієнко М.П., Журавська І.М., Савінов В.Ю., Корецька О.О. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж / Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 295. Т. 307. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили. 2016. С. 42–49.
77. Мусієнко М.П., Корецька О.О. Консольні п'єзоелектричні накопичувачі вібрації для IoT пристроїв / Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 296. Т. 308. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили. 2017. С. 139–145.
78. Мусієнко М.П., Корецька О.О. Накопичувачі енергії вібрації IoT-пристроїв на основі консольних п'єзоелементів // Матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2018», 22-25 травня 2018. Вінниця: ВНТУ. 2018. С. 93–94.
79. Мусієнко М.П., Корецька О.О. Підвищення чутливості датчиків п'єзомагнітних тахометрів // Матеріали VII Міжнародної науково-

- практичної конференції «Датчики, прилади та системи – 2018», 17-21 вересня 2018. Черкаси: видавець Гордієнко Є. І., 2018. С. 9–12.
80. Мусієнко М.П., Куценко С.В., Бакарджієв Р.О., Корецька О.О. Метод розміщення сповіщувачів провідно-безпровідної системи пожежної сигналізації всередині будівлі / Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 275. Т. 287. Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. С. 139–144.
81. Мюллер Р.Д. UML: Базы данных и UML. Проектирование / Лори, 2002. – 432 с.
82. Патент України № 8500. МПК G01P 3/48, П'єзомагнітний тахометр / 15 Шарапов В.М., Мусієнко М.П., Марченко С.В. Заяв. 20.12.04; Опубл. 15.08.05, Бюл. № 8.
83. Пат. на корисну модель 132568 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812372; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.
84. Пат. на корисну модель 132569 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812373; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.
85. Пашнев А.А., Кучук Г.А., Бердочник А.Д. Модель распределения вычислительных ресурсов гетерогенной компьютерной сети по квантам заданного интервала времени в режиме пакетной обработки данных / Системи управління, навігації та зв'язку, – №2(6), 2008. – С. 120–127.
86. Петлеваний П. В. Моделі засобів живлення компонент комп'ютерних систем від енергії первинних перетворень // Міжнародна науково-практична конференція «Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі». – Т. 6. – Ялта: ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – С. 172.
87. Плужников В.М., Семенов В.С. Пьезокерамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 168 с.
88. Поздняков П.Г., Федотов И.М., Бирюков В.И. Кварцевые резонаторы с пленочными нагревателями / Электронная техника. Научно-техн. сборник. Серия 9 – Радиокomпоненты, выпуск 4. – М.: Электроника, 1971. – С. 27–37.

89. Прангишвили И. В. Многопроцессорные и локальные сети микро-ЭВМ в распределенных системах управления / М.: Энерго-атомиздат, 1985. – 272 с.
90. Пушкарев О. Кирпичики для построения сети ZigBee / Беспроводные технологии, № 1, 2006. – С. 34–38.
91. Пьезоэлектрические датчики и сенсоры. Учебное пособие / Шарапов В. М., Бондаренко Ю. Ю., Кисиль Т. Ю., Трембовецкая Р. В. и др. / под ред. Ю. Ю. Бондаренко. Черкассы: Издатель Александр Третьяков, 2017. 395 с.
92. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / Под. ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
93. Рамбо Дж., Блаха М. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка / Питер, 2007. – 544 с.
94. Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу: звіт з НДР: ДР № 0115U000316 / кер. роботи М. П. Мусієнко, виконавець О. О. Корецька. К.: УКРНТЕІ, 2016 – 278 с.
95. Рудницкий С.И., Шарапов В.М., Шульга Н.А. Колебания дискового биморфного преобразователя типа металл-пьезокерамика // Прикладная механика. – 1990. – Т. 26. – №10.
96. Савинов В. Ю. Модели построения распределенных компьютерных систем с ограниченным энергопотреблением удаленных модулей // Сборник трудов НТК «СИЭТ-2014». – Одесса, 2014. – С. 78–79.
97. Савинов В. Ю. Разработка комплексной модели распределенных компьютерных систем с ограниченным энергопотреблением удаленных модулей // Научно-техническая конференция «Современные информационные технологии 2014». – Одесса, 2014. – С. 137–138.
98. Савинов В. Ю. Оптимальне енергоспоживання розподілених комп'ютерних систем з енергообмеженими вимірювальними модулями при вирішенні випадкових задач // Наукові праці ЧДУ ім. П. Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Т. 229 – Миколаїв, 2013. – С. 5–8.

99. Савинов В. Ю. Оптимальное энергопотребление распределенных систем с автономно питаемыми удаленными модулями // Международная научно-техническая конференция «Проблемы информатизации». – Тольятти, 2013. – С. 79.
100. Савинов В. Ю. Уменьшение энергопотребления распределённых компьютерных систем с энергоограниченными измерительными модулями // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – № 6, 2013. – С. 29–31.
101. Савінов В. Ю. Розробка ефективних моделей розподілених комп'ютерних систем з енергообмеженими віддаленими модулями / Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: «Комп'ютерні технології». – Т. 225. – Миколаїв, 2014. – С. 78–82.
102. Система радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах / Компоненты и технологии. – Режим доступа:URL: [http://kit-e.ru/articles/rfid/2005\\_6\\_188.php](http://kit-e.ru/articles/rfid/2005_6_188.php)
103. Ситников В.С. Биленко А.А. Анализ построения вычислений на основе реконфигурируемых компьютерных систем / Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків, 2010. – № 7(48). – С. 212–214.
104. Ситніков В. С., Волчок В. Є. Автоматизовані системи контролю та обліку енергоресурсів як різновид Інтернету речей. Наукові праці : наук. журн. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Т. 308. Вип. 296. Миколаїв, 2017. С. 64–66.
105. Ситніков В. С., Максименко А. О. Побудова на нечіткій логіці комп'ютерної системи автоматичного управління об'єктом, що має обмежені обчислювальні й енергетичні ресурси. Наукові праці : наук. журн. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Т. 287. Вип. 275. Миколаїв, 2016. С. 83–88.
106. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Санкт-Петербург: ООО «Питер Пресс», 2007. – 992 с.
107. Таненбаум Э. Стен М. Ван. Распределенные системы: принципы и парадигмы / Пер. с англ. А. Леонтьев. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.

108. Тарков М.С. Вложение структур параллельных программ в структуры живучих распределенных вычислительных систем / Автометрия. – 2003. – Том 39, № 3. – С. 84–96.
109. Томенко М.Г., Корецька О.О. Підвищення надійності систем раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв за допомогою безпроводних автономних п'єзотранспондерів / Наукові праці: науковий журнал. Серія «Комп'ютерні технології». Вип. 305. Т. 317. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили. 2018. С. 122–126.
110. Томенко М.Г., Корецька О.О. Використання консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів у вібродіагностиці при визначенні аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв / Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. Черкаси: ЧДТУ. С. 68–72.
111. Топорков В. В. Модели распределенных вычислений / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.
112. Трофимов А.И. Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок. – М.: Машиностроение, 1979. – 95 с.
113. Тягунова М. Ю. Методы диспетчеризации задач в распределенных компьютерных системах: дис. на получение научной степени канд. техн. наук: спец. 05.13.05 „Компьютерные системы и компоненты”, – Київ, 2010. – 140 с.
114. Улитко А.Ф. Об определении коэффициента электромеханической связи в задачах установившихся колебаний пьезокерамических тел // Материалы IX Всесоюз. акуст. конф. – М.: АКИН, 1977. – С. 27–30.
115. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
116. Фортов В.Е. Савин Г.И., Левин В.К. Создание и применение высокопроизводительных вычислений на базе высокопроизводительных вычислительных технологий / Информационные технологии и вычислительные системы. – 2001. – № 1. – С. 3–10.
117. Харкевич А.А. Теория преобразователей. – М.: Госэнергоиздат, 1948.

118. Хокни Р. Джессоуп К. Параллельные ВС. Архитектура, программирование и алгоритмы / Пер. с англ. Д. Н. Абашкина. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.
119. Хорошевский В.Г., Курносков М.Г. Алгоритмы распределения ветвей параллельных программ по процессорным ядрам вычислительных систем / Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 56–67.
120. Что такое IoT, или интернет вещей / CoinSpotю – Режим доступа: <https://coinspot.io/beginners/что-такое-iot-или-internet-veshhej>.
121. Что такое интернет вещей? / AIN.UA. – Режим доступа: <https://ain.ua/special/what-is-iot>.
122. Шарапов В.М. Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики : монография / Под ред. В.М.Шарапова. – Москва: Техносфера, 2006. - 632 с.
123. Шарапов В.М., Бондаренко Ю.Ю., Мусиенко М.П. и др. Методы линеаризации амплитудно-частотных характеристик асимметричных биморфных преобразователей // Труды Межд. НТК «Приборостроение-2004». – Винница-Ялта, 2004. – С. 22–26.
124. Шарапов В.М., Лега Ю.Г., Мусиенко М.П. и др. Исследование асимметричных биморфных преобразователей // Труды филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в г. Калуга. Специальный выпуск. – Ялта, 2000. – С. 445–447.
125. Шарапов В.М., Лега Ю.Г., Роттэ С.В., Мусиенко М.П. Диаграммы направленности круглых и овальных асимметричных биморфных пьезоэлектрических излучателей / Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 2001. – №3. – С. 57–62.
126. Шарапов В.М., Минаев Б.Ф., Мусиенко М.П. и др. Исследование доменно-диссипативных пьезокерамических преобразователей / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №2. – С.17–22.
127. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Мусиенко М.П. Теория автоматического управления. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 200 с.

128. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Аллавердиев А.М. Расчет асимметричных биморфных пьезоэлементов / Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту. – 1998. – №3 – С. 3–7.
129. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Балковская Ю.Ю. и др. Доменно-диссипативные пьезодатчики // Материалы XVI Межд. НТК «Датчик-2004». – Москва, 2004. – С. 37–38.
130. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Балковская Ю.Ю. и др. Доменно-угловой диссипативный пьезокерамический преобразователь // Праці II-ї НТК “Триладобудування 2003: стан і перспективи”. – Київ, 2003. – С. 92–93.
131. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Балковская Ю.Ю. Об одной классификации пьезокерамических преобразователей / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №3. – С. 116–120.
132. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Балковская Ю.Ю. и др. Пьезодатчики контрольно-измерительных систем / Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький. – 2003. – №3. –Т. 2. – С. 149–152.
133. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Марченко С.В. Исследование переходной характеристики пьезомагнитного датчика тахометра / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №4. – С. 87-89.
134. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Марченко С.В. Исследование пьезомагнитных датчиков тахометров / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №4. – С. 90–93.
135. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Марченко С.В. К исследованию модели пьезомагнитного датчика тахометра / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №4.
136. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Марченко С.В. Математическая модель пьезомагнитного датчика тахометра // Труды межгосударственной НМК “Проблемы математического моделирования”. – Днепродзержинск, 2004. – С. 151–152.
137. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Марченко С.В. Математические модели магнитных пьезодатчиков тахометров // Математичне моделювання. – Днепродзержинск. – 2004. – №1(11). – С. 61–63.

138. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Доменно-диссипативные пьезоэлектрические преобразователи с обратной связью / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №1. – С. 74–79.
139. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Исследование доменно-диссипативных пьезопреобразователей с обратной связью / Весник ОНПУ. – Одесса, 2004.
140. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. и др. Исследование доменно-диссипативных пьезокерамических преобразователей / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2003. – №2. – С. 17–22.
141. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Просторова енергосилова структура п'єзоперетворювачів // Праці III-ї НТК «Приладобудування 2004: стан і перспективи». – Київ, 2004. – С. 103–104.
142. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Пьезокерамические преобразователи контрольно-измерительных систем // 13-th National Scientific Symposium with international participation "Metrology And Metrology Assurance '2003". – Bulgaria: Sozopol, 2003.-С.100–104.
143. Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Синтез пространственной энергосиловой структуры пьезоэлектрических датчиков // Материалы 11-й междунар. конф. по автоматическому управлению «Автоматика-2004». – Киев, 2004. – Т.2. – С. 69.
144. Шарапов В.М., Мусієнко М.П. Ширококутові доменно-дисипативні п'єзокерамічні перетворювачі / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №6. – С. 127–131.
145. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Ротге С.В. и др. Синтез пьезопреобразователей с учетом пространственной энергосиловой структуры пьезоэлементов // Труды Межд. НТК «Приборостроение-2004». – Винница-Ялта, 2004. – С. 32–35.
146. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Ротге С.В. и др. Пьезокерамические преобразователи физических величин // Труды 1-го Межд. радиоэлектронного Форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Харьков, 2002. – С. 482–485.
147. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Чудаева И.Б. и др. Пьезомагнитные устройства в приборостроении / «Ученые записки Симферопольского



- государственного университета». (Сб. трудов Межд. конф. «Приборостроение-98»).–Винница.–1998.–С. 302–304.
148. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Чудаева И.Б., Марченко С.В. Пьезомагнитные датчики частоты вращения валов механизмов // Материалы XVI Межд. НТК «Датчик-2004». – Москва. – 2004. – С. 35-36.
149. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. / Отв. ред. Б.П. Маслов; АН УССР. Ин-т механики. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 228 с.
150. Шульга Н.А., Шарапов В.М., Рудницкий С.И. Колебания дискового биморфного преобразователя типа металл-пьезокерамика // Прикладная механика. – Том.26. – 1990. – №10. – С. 64-72.
151. Эндрюс Г. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования / Пер. с англ. А. Подосельника и др. – М.: Вильяме, 2003. – 512 с.
152. Якобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения / Питер, 2002. – 496 с.

## Додаток А.1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Чорноморського національного  
університету імені Петра Могили,  
д.т.н., професор

Л.П.Клименко

2019 р.

## ДОВІДКА

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Корецької Олександри Олегівни

Основні результати роботи Корецької О.О. застосовуються при викладанні дисциплін «State of the Art IT» та «Кібербезпека» студентам спеціальності 123 – комп'ютерна інженерія.

До програми лекційного курсу «State of the Art IT» введені такі теми, які містять матеріал роботи здобувача (нумерація лекцій згідно з робочою програмою):

- лекція № 3: «Технологія Internet of Thingh (IoT)»;
- практичне заняття № 4: «Приклади використання IoT».

До програми лекційного курсу «Кібербезпека» введені такі теми, які містять матеріал роботи здобувача (нумерація лекцій згідно з робочою програмою):

- лекція № 2: «Основи безпеки IoT»;
- практичне заняття № 3: «Архітектура системи безпеки IoT».

До лекційного курсу включено такі результати, отримані автором, а саме: моделі та засоби побудови енергоефективних IoT пристроїв з автономним живленням.

Матеріал, отриманий Корецькою О.О., дозволяє студентам ознайомитися з новими методами організації подовження терміну живлення пристроїв IoT, а також організації його безпечної роботи.

Декан факультету  
комп'ютерних наук,  
к.т.н., доцент

А. П. Бойко

В.о. завідувача кафедри  
комп'ютерної інженерії,  
к.ф.-м.н., доцент

О. В. Дворник

## Додаток А.2

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор навчально-наукового  
інституту інформаційних та освітніх  
технологій Черкаського національного  
університету ім. Б.Хмельницького,

д.ф.-м.н., доцент

Ю. О. Ляшенко



«17» січня 2019 р.

## ДОВІДКА

**про впровадження в навчальний процес результатів  
дисертаційної роботи Корецької Олександрі Олегівни на тему  
«Моделі та засоби побудови енергоефективних IoT пристроїв на базі  
п'єзокерамічних перетворювачів»**

Основні результати роботи Корецької О.О. застосовуються при викладанні дисципліни «Комп'ютерні мережі» студентам напряму підготовки 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

До програми лекційного курсу введені такі теми, які містять матеріал роботи здобувача (нумерація лекцій згідно з робочою програмою):

- лекція № 12: «Організація мережі «Розумний будинок»»;

- лекція № 14: «Налаштування прав користувачів та віддаленого доступу».

До лекційного курсу включено результати, що отримані автором, а саме: модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, що дозволяє будувати IoT пристрої з подовженим терміном роботи.

Матеріал, отриманий Корецькою О.О., дозволяє студентам ознайомитися з новими моделями побудови енергоефективних IoT пристроїв.

Зав. кафедри автоматизації  
та комп'ютерно-інтегрованих  
технологій, к.т.н.

В. А. Дідук

## Додаток А.3

**CUBOMANIA, Ltd.**

BVI Company # 1973069

<https://cubomania.io/>

January 15, 2019

Cubomania is the blockchain-powered online platform for creation and distribution of personalized educational content.

At the moment, the problem of the issue of IoT toys, as well as their component remains relevant. Therefore, developed in the research of **Koretska O. O. "Models and tools for building energy-efficient IoT devices based on piezoceramic transducers"** models allow to increase the energy efficiency of IoT toys based on piezoceramic transducers and can be used in the following Cubomania developments:

- when modeling and testing in conditions of limited CuboBaddy toys power;
- when testing the term of the work of the toy during the mechanical impact on her.

The test results showed that the model developed in the research of Koretska O. allows extending the operation time of an IoT toy with its battery supply to 10%.

CTO Cubomania

Ya. Krainyk

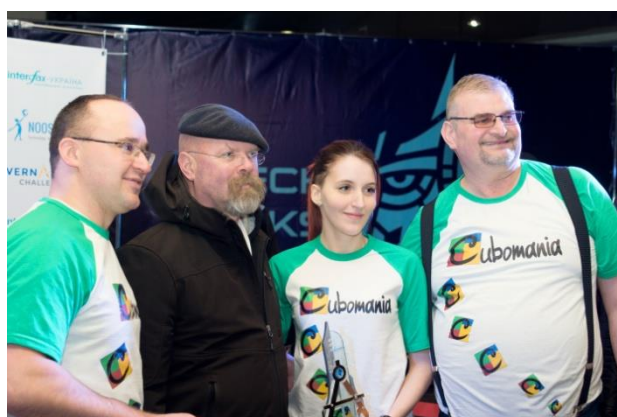
## Додаток Б

### Участь здобувача в діяльності проекту Subomania

#### Участь у виставці InnoTech\_(Київ, 7-9.04.2017)



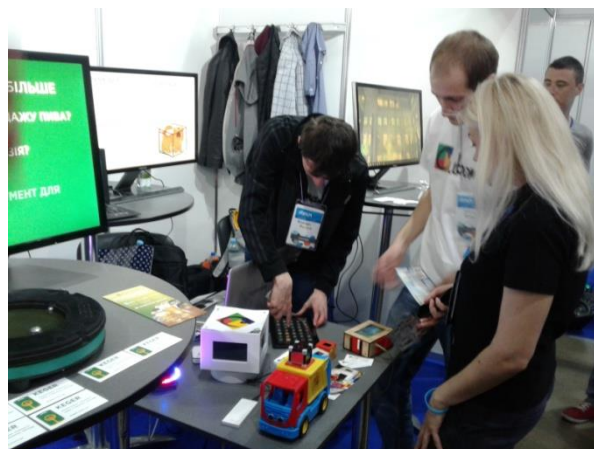
#### Участь у виставці Vernadsky\_Challenge\_(Дніпро, 22.04.2017)



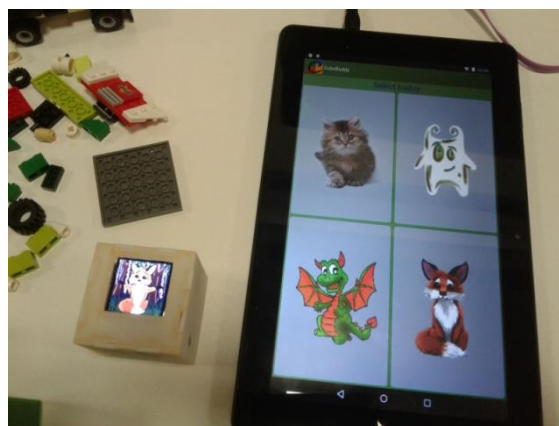
#### Участь у виставці Maker Fare\_(Київ, 21.05.2017)



### Участь у виставці iForum\_(Київ, 25.05.2017)



### Участь у виставці UVCA\_IT\_Day\_(Київ, 12.10.2017)



### Участь у виставці CES-2018\_(Las Vegas, USA, 9-12.01.2018)



## Додаток В.1



UA 132568 U

- Корисна модель належить до виміральної техніки та може бути використана в промисловості і лабораторній практиці для вимірювання швидкостей обертання валів різних машин та механізмів.
- Відомий тахометр, що містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор із закріпленням на ньому п'єзоелементом із двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань та лічильника імпульсів, причому на п'єзоелементі закріплена пластина з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту (АС СРСР № 461370, опубл. 25.02.75, Бюл. № 7).
- Недоліком цього тахометра є невисока точність вимірювання та низький рівень вихідного сигналу.
- Найближчим аналогом є п'єзомагнітний тахометр, який містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинкою з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'єзоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, причому пластина з магнітопровідного матеріалу закріплена по тій самій (Патент України № 8500, МПК G01P 3/48, П'єзомагнітний тахометр / Шарпапов В.М., Мусієнко М.П., Марченко С.В. Заяв. 20.12.04; Опубл. 15.08.05, Бюл. № 8).
- Недоліком цього тахометра є низький рівень вихідного сигналу.
- В основу корисної моделі поставлена задача підвищення рівня вихідного сигналу п'єзомагнітного тахометра шляхом змін конструкції датчика.
- Поставлена задача вирішується тим, що
- П'єзомагнітний тахометр, що заявляється, містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинкою з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'єзоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів.
- П'єзомагнітний тахометр, що заявляється, відрізняється тим, що пластина з магнітопровідного матеріалу виконана у формі прямокутника та закріплена до статора однією стороною.
- Кожна з вказаних відмієних ознак є необхідною, а всі разом - достатніми для досягнення технічного результату.
- Технічним результатом корисної моделі є підвищення рівня вихідного сигналу.
- Корисна модель пояснюється кресленнями (див. креслення), де показано аксонометричне зображення п'єзомагнітного тахометра, що заявляється.
- П'єзомагнітний тахометр містить ротор 1 із закріпленням на ньому постійним магнітом 2, статор 3 (на кресленні показаний край статора) з пластинкою 4 з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника, яка обернена до магніту ротора 2, і п'єзоелементом 5 з двома електродами 6 та 7, які розташовані на протилежних сторонах п'єзоелемента 5 і підключені до підсилювача електричних коливань 8 і лічильника імпульсів 9.
- П'єзомагнітний тахометр працює таким чином.
- При обертанні ротора 1 постійний магніт 2 при кожному оберті ротора проходить поблизу нерухомо встановленої на певній відстані пластинки з магнітопровідного матеріалу 4. При цьому магнітні сили взаємодії притягують (відштовхують) пластинку 4 до магніту 2. Ця взаємодія передається п'єзоелементу 5 та викликає розтяг (стиснення) п'єзоелемента 1, через прямий п'єзоэффект, призводить до появи напруги на сигнальних електродах 6 та 7. Отриманий сигнал підсилюється підсилювачем електричних коливань 8 і підраховується лічильником імпульсів 9.
- Виконання пластинки з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника дозволяє здійснити закріплення її тільки однією стороною (кінцем пластинки), у той час, коли три інші сторони вільно коливаються. У свою чергу закріплення тільки однієї сторони призводить до того, що п'єзоелемент отримує властивості консольного п'єзоперетворювача, коли вільні кінці пластинки отримують максимальні переміщення. Це призводить до максимальної деформації закріпленої на пластині п'єзоелемента, що в свою чергу призводить до підвищення рівня вихідного сигналу.
- Приклад конкретного застосування.
- Було виготовлений п'єзомагнітний тахометр, в якому використовувався постійний магніт діаметром 20 і товщиною 3 мм із самарій-кобальту; прямокутна пластина 40-50 мм товщиною 0,2 мм із магнітного сплаву 50НТ, п'єзоелемент діаметром 30 і товщиною 0,3 мм з п'єзокераміки ЦТС-19. Відстань між магнітом ротора і пластинкою статора була рівною 2 мм. В якості двигуна використовувався ДТМ-20Н3-01 із частотою обертання 9000 об/хв. Рівень вихідного сигналу по схемі, що заявляється, був рівним 255 мВ. Для тахометра за схемою прототипу, коли усі сторони пластинки закріплені, - 70 мВ. Таким чином, виготовлення тахометра



УКРАЇНА

(19) UA (11) 132568 (13) U  
(51) МПК  
G01P 3/48 (2006.01)МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

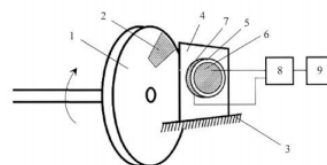
## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	у 2018 12372	(72) Винахідник(и):	Мусієнко Максим Павлович (UA), Корсєцька Олександра Олегівна (UA)
(22) Дата подання заявки:	13.12.2018	(73) Власник(и):	ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003 (UA)
(24) Дата, з якої є чинним: права на корисну модель:	25.02.2019		
(46) Публікація відомостей про видану патенту:	25.02.2019, Бюл. № 4		

## (54) П'єзомагнітний тахометр

## (57) Реферат:

П'єзомагнітний тахометр містить ротор з закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинкою з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'єзоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів. Пластина з магнітопровідного матеріалу виконана у формі прямокутника та закріплена до статора однією стороною.

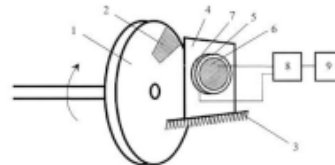


UA 132568 U

з конструкцією, що заявляється, дозволило підвищити рівень вихідного сигналу більше ніж у 3 рази.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 П'єзомагнітний тахометр, який містить ротор з закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинкою з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'єзоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, який відрізняється тим, що пластина з магнітопровідного матеріалу виконана у формі прямокутника та закріплена до статора однією стороною.



Класифікація винахіду А. Буковинський

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 13/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01001

Додаток В.2



УКРАЇНА (19) UA (11) 132569 (13) U  
(51) МПК G01P 3/48 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: <b>у 2018 12373</b>	(72) Винахідник(и): <b>Мусієнко Максим Павлович (UA), Корецька Олександра Олегівна (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>13.12.2018</b>	(73) Власник(и): <b>ЧОРНОМОРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ПЕТРА МОГИЛИ, вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003 (UA)</b>
(24) Дата, з якої є чинним: <b>25.02.2019</b>	(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.02.2019, Бюл.№ 4</b>

(54) П'ЕЗОМАГНІТНИЙ ТАХОМЕТР

(57) Реферат:

П'езомагнітний тахометр містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинною з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'езоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів. Електрод знаходиться на тій стороні п'езоелемента, що прикріплюється до пластини, виконаний у вигляді диска діаметра d. Електрод на протилежній стороні п'езоелемента виконаний у вигляді кільця з внутрішнім діаметром d та зовнішнім, що дорівнює діаметру п'езоелемента D. В пластині з магнітопровідного матеріалу виконаний отвір діаметром d<sub>отв</sub> таким чином, що електрод п'езоелемента розміщується всередині цього отвору, причому d < d<sub>отв</sub> < D.

UA 132569 U

UA 132569 U

UA 132569 U

Корисна модель належить до виміральної техніки та може бути використана в промисловості і лабораторній практиці для вимірювання швидкості обертання валів різних машин та механізмів.

Відомий тахометр, що містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор із закріпленням на ньому п'езоелементом із двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, причому на п'езоелементі закріплена пластинка з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту [АС СРСР № 461370, опубл. 25.02.75, Бюл. № 7].

Недоліком цього тахометра є невисока точність вимірювання та низький рівень вихідного сигналу.

Найближчим аналогом є п'езомагнітний тахометр, який містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинною з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'езоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, причому пластинка з магнітопровідного матеріалу закріплена по талерій [Патент України № 8500, МПК G01P 3/48, П'езомагнітний тахометр / Шарпаєв В.М., Мусієнко М.П., Марченко С.В. Заяв. 20.12.04, Опубл. 15.08.05, Бюл. № 8].

Недоліком цього тахометра є низький рівень вихідного сигналу.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення рівня вихідного сигналу п'езомагнітного тахометра шляхом зміни конструкції датчика.

Поставлена задача вирішується тим, що п'езомагнітний тахометр, який містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинною з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'езоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, згідно з корисною моделлю, електрод, який знаходиться на тій стороні п'езоелемента, що прикріплюється до пластини, виконаний у вигляді диска діаметра d, електрод на протилежній стороні п'езоелемента виконаний у вигляді кільця з внутрішнім діаметром d та зовнішнім, що дорівнює діаметру п'езоелемента D, а в пластині з магнітопровідного матеріалу виконаний отвір діаметром d<sub>отв</sub> таким чином, що електрод п'езоелемента розміщується всередині цього отвору, причому d < d<sub>отв</sub> < D.

Технічний результатом корисної моделі є підвищення рівня вихідного сигналу.

Корисна модель повсякчасно кресленнєм:

- на Фіг. 1 показано аксонометричне зображення п'езомагнітного тахометра, що запропонований;
- на Фіг. 2 показано зображення п'езоелемента з пластинною.

П'езомагнітний тахометр містить ротор 1 із закріпленням на ньому постійним магнітом 2, статор 3 (на Фіг. 1 показаний край статора) з пластинною 4 з магнітопровідного матеріалу у формі прямокутника, яка обернена до магніту ротора 2, і п'езоелементом 5 з двома електродами 6 та 7, які розташовані на протилежних сторонах п'езоелемента 5 і підключені до підсилювача електричних коливань 8 і лічильника імпульсів 9. Причому електрод 7, що знаходиться на тій стороні п'езоелемента 5, що прикріплюється до пластини 4, виконаний у вигляді диска діаметра d, а електрод 6 на протилежній стороні п'езоелемента 5 виконаний у вигляді кільця з внутрішнім діаметром d та зовнішнім, що дорівнює діаметру п'езоелемента D. У пластині 4 виконаний отвір діаметром d<sub>отв</sub> таким чином, що електрод 7 розміщується всередині цього отвору, причому d < d<sub>отв</sub> < D.

П'езомагнітний тахометр працює наступним чином.

При обертанні ротора 1 постійний магніт 2 при кожній оберті ротора проходить поблизу нерухомо встановленої на певній відстані пластини з магнітопровідного матеріалу 4. При цьому магнітні сили взаємодії притягують (відштовхують) пластинку 4 до магніту 2. Ця взаємодія передається п'езоелементу 5 та викликає розтяг (стиснення) п'езоелемента і, через прямий п'езоефект, призводить до появи напруги на сигнальних електродах 6 та 7. Отриманий сигнал підключається до підсилювача електричних коливань 8 і підраховується лічильником імпульсів 9.

Розташування отвору в пластині та сигнальних електродів на п'езоелементі таким чином, як це показано на Фіг. 2, призводить до того, що вектор напруженості електричного поля вихідного сигналу створює з вектором поляризації кут α=90°. Це призводить до появи діелектрико-дисиплятивних властивостей п'езоелемента, які характеризуються збільшеною величиною вихідного сигналу [див. Шарпаєв В.М., Мусієнко М.П., Шарпаєв Е.В. П'езомагнітні електричні датчики: монографія (Под ред. В.М. Шарпаєва, - Москва: Техносфера, 2006. - 632 с.)].

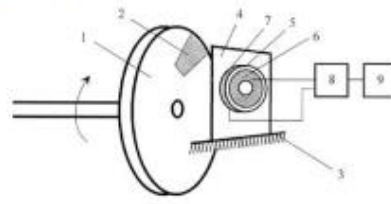
Приклад конкретного застосування.

Був виготовлений п'езомагнітний тахометр, в якому використовувався постійний магніт діаметром 20 і товщиною 3 мм із самарій-кобальту, прямокутна пластинка 40 × 50 мм товщиною 0,2 мм із магнітного сплаву 50НТ, п'езоелемент діаметром 30 і товщиною 0,3 мм з

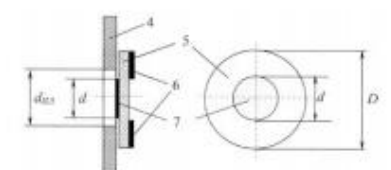
п'езокераміки ЦТС-19. Диск електрод п'езоелемента виконаний діаметром 18 мм, кільцевий внутрішній діаметром 18 мм та зовнішнім 30 мм. У пластині навпроти дискового електроду виконаний отвір діаметром 20 мм. Відстань між магнітом ротора і пластинною статора була рівною 2 мм. Як двигун використовувався ДПМ-20Н3-01 з частотою обертання 9000 об/хв. Рівень вихідного сигналу по схемі, що зазначалась, був рівним 147 мВ. Для тахометра за схемою найближчого аналога, коли усі електроди виконані суцільними на всю поверхню сторони п'езоелемента та без отвору в пластині - 70 мВ. Таким чином, виготовлення запропонованого тахометра дозволило підвищити рівень вихідного сигналу приблизно в 2 рази.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

П'езомагнітний тахометр, який містить ротор із закріпленням на ньому постійним магнітом, статор з пластинною з магнітопровідного матеріалу, яка обернена до магніту ротора, і п'езоелементом з двома електродами, підключеними до підсилювача електричних коливань і лічильника імпульсів, який відрізняється тим, що електрод, який знаходиться на тій стороні п'езоелемента, що прикріплюється до пластини, виконаний у вигляді диска діаметра d, електрод на протилежній стороні п'езоелемента виконаний у вигляді кільця з внутрішнім діаметром d та зовнішнім, що дорівнює діаметру п'езоелемента D, а в пластині з магнітопровідного матеріалу виконаний отвір діаметром d<sub>отв</sub> таким чином, що електрод п'езоелемента розміщується всередині цього отвору, причому d < d<sub>отв</sub> < D.



Фіг. 1



Фіг. 2

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01006, Україна  
ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ - 42, 01601



## Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Мусієнко М. П. Рухомі моніторингові мережі критичного застосування: проблеми створення та напрями розвитку / М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, І. С. Бурлаченко, О. О. Денісов, О. О. Корецька, Ж. О. Белозьоров // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 254, Т. 266. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. – С. 112–118. **(Index Copernicus)**
2. Мусієнко М. П. Метод розміщення сповіщувачів провідно-безпровідної системи пожежної сигналізації всередині будівлі / М. П. Мусієнко, С. В. Куценко, Р. О. Бакарджієв, О. О. Корецька // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 275, Т. 287. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. – С. 139–144. **(Index Copernicus)**
3. Мусієнко М. П. Розподілення навантаження між багатоядерними обчислювачами для задач енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж / М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, В. Ю. Савінов, О. О. Корецька // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 295, Т. 307. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2016. – С. 42–49. **(Index Copernicus)**
4. Мусієнко М. П. Консольні п'єзоелектричні накопичувачі вібрації для IoT пристроїв / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 296, Т. 308. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2017. – С. 139–145. **(Index Copernicus)**
5. Zhuravska I. M. Efficiency improvement of using unmanned aerial vehicles by distribution of tasks between the cores of the computing processor / Zhuravska I., Borovlova S., Kostyria M., Koretska O. // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 6, No. 6 (38). – P. 4–13. **(Index Copernicus)**
6. Zhuravska I. M. Surtel Wojciech, et al. Self-powered information measuring wireless networks using the distribution of tasks within multicore processors / I. M. Zhuravska, M. P. Musiyenko, O. O. Koretska // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2017. – Vol. 10445 : Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. № 1044527. – P. 1–13. **(Scopus)**
7. Томенко М. Г. Підвищення надійності систем раннього визначення аварійності складних технологічних виробництв за допомогою безпровідних автономних п'єзотранспондерів / М. Г. Томенко, О. О. Корецька // ЧНУ Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 305, Т. 317. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. – С. 122–126. **(Index Copernicus)**
8. Томенко М. Г. Використання консольних п'єзокерамічних ідентифікаторів у вібродіагностиці при визначенні аварійних ситуацій потенційно небезпечних виробництв / М. Г. Томенко, О. О. Корецька // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2018, № 4. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 68–72.
9. Корецька О. О. Математичні та функціональні моделі енергоефективних IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів / О. О. Корецька // Наукові праці: Науково-методичний журнал. Серія «Комп'ютерні технології». – Вип. 312, Т. 323. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. – С. 74–79. **(Index Copernicus)**
10. Корецька О. О. Моделювання датчиків за допомогою open source програмних засобів / О. О. Корецька // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Free and Open Source Software - 2015», 24-27 листопада 2015. – Харків: Харківський національний університет будівництва та архітектури. – 2015. – С. 93.

11. Корецька О. О. До питання побудови поліметричних інформаційно-вимірювальних систем із живленням від енергії вимірювального сигналу / О. О. Корецька // Матеріали XVIII Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання – 2015», 12-20 листопада 2015. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2015. – С. 115–116.
12. Корецька О. О. Методи та засоби підвищення вихідної напруги датчиків, що працюють від енергії вимірювального сигналу / О. О. Корецька // Матеріали XIX Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання - 2016», 14-18 листопада 2016. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2016. – С. 91–93.
13. Корецька О. О. Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення / М. П. Мусієнко, І. М. Журавська, О. О. Корецька // Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2016», 11-14 жовтня 2016. – Вінниця: ВНТУ. – 2016. – С. 79–81.
14. Корецька О. О. Використання програмного забезпечення Microcap для моделювання режимів роботи поліметричних датчиків / О. О. Корецька // Матеріали VIII Всеукр. науково-практична конференція «Free and Open Source Software», 22-24 листопада 2016. – Харків: Харківський національний університет будівництва та архітектури. – 2016. – С. 49.
15. Корецька О. О. Выбор беспроводных технологий для информационно-измерительных систем / О. О. Корецька // Матеріали VI Міжнародна науково-практична конференція «Датчики, прилади та системи – 2017». – Черкаси: Видавець Третьяков О., – 2017. – С. 49–51.
16. Корецька О. О. Аналіз та вибір основних складових побудови безпроводних інформаційно-вимірювальних систем з саможивлюючими первинними перетворювачами / О. О. Корецька // Матеріали XX Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання - 2017», 13-17 листопада 2017. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2017. – С. 42–43.
17. Корецька О. О. Розробка енерго-ефективних IoT пристроїв з живленням від п'єзоелементів / О. О. Корецька // Матеріали Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум-2018: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі», 7-10 червня 2018. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2018. – С. 96.
18. Мусієнко М. П. Накопичувачі енергії вібрації IoT-пристроїв на основі консольних п'єзоелементів / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька // Матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., «Інтернет – Освіта – Наука – 2018», 22-25 травня 2018. – Вінниця: ВНТУ. – 2018. – С. 93–94.
19. Мусієнко М. П. Підвищення чутливості датчиків п'єзомагнітних тахометрів / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Датчики, прилади та системи – 2018», 17-21 вересня 2018. – Черкаси: видавець Гордієнко Є. І., – 2018. – С. 9–12.
20. Корецька О. О. Доменно-дисипативні п'єзоперетворювачі в конструкціях п'єзомагнітних тахометрів / О. О. Корецька // Матеріали XXI Всеукр. наук.-метод. конф «Могилянські читання - 2018», 12-17 листопада 2018. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2018. – С. 100–101
21. Пат. на корисну модель 132568 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812372; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.
22. Пат. на корисну модель 132569 Україна, МПК (2006.01) G01P 3/48. П'єзомагнітний тахометр / М. П. Мусієнко, О. О. Корецька. № u201812373; заявл. 13.12.2018. Опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.