

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

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

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Черкаси – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Чорноморському національному університеті імені Петра Могили Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мусієнко Максим Павлович,
Чорноморський національний
університет імені Петра Могили,
професор кафедри комп'ютерної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ситніков Валерій Степанович,
Одеський національний політехнічний
університет, завідувач кафедри
комп'ютерних систем;

кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Юлія Юріївна,
Черкаський державний технологічний
університет, завідувач кафедри
приладобудування, мехатроніки та
комп'ютеризованих технологій.

Захист відбудеться 31 травня 2019 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 73.052.04 при Черкаському державному технологічному університеті за адресою: 18006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

Автореферат розісланий 30 квітня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради К 73.052.04



Е. В. Фауре

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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., Єрмолів 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., Оное 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 Subomania.

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність 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. 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

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. 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). Як відомо, 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 \mathbf{P} та \mathbf{E} , для досягнення максимального рівня вихідного сигналу.

Вплив доменно-дисипативного ефекту на властивості перетворення механічних величин в електричні ґрунтується на анізотропії п'єзокераміки і пов'язаний із впливом доменної структури ПП на рух носіїв заряду.

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 δ між векторами \mathbf{P} і \mathbf{E} , визначалися основні величини, що характеризують властивості п'єзокераміки. Так, отримана залежність значення п'єзомодуля d_{31} від кута δ і механічних напруг для біморфних ПП має вигляд:

$$d_{31} = d_{31}^{(0)} - \frac{2}{\pi^2} \int_0^{\frac{1}{4} \sin(\delta)} d\delta \cdot (X_1 \cos^2(\delta) + Y_1) \sqrt{\sin^2(\delta) - \cos^2(\delta)} \times \arcsin \sqrt{\frac{\cos^2(\delta) - \sigma_p}{1 - \cos^2(\delta)}},$$

де $\sigma_p = \sigma_c / \sigma$, σ – механічна напруга на біморфному ПП; σ_c – критична механічна напруга домену; X_1 та Y_1 – коефіцієнти, що визначаються відповідними значеннями п'єзомодулів.

Залежності п'єзомодулів d_{31} і d_{33} від кута δ і механічних напруг для двох основних випадків впливу на ПП показані на рис. 1.

Як видно з рис. 1, 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'єзокераміки за рахунок врахування конструктивних та фізичних параметрів біморфних п'єзоелементів, що дозволяє проектувати п'єзоперетворювачі зі збільшеним рівнем вихідного сигналу.

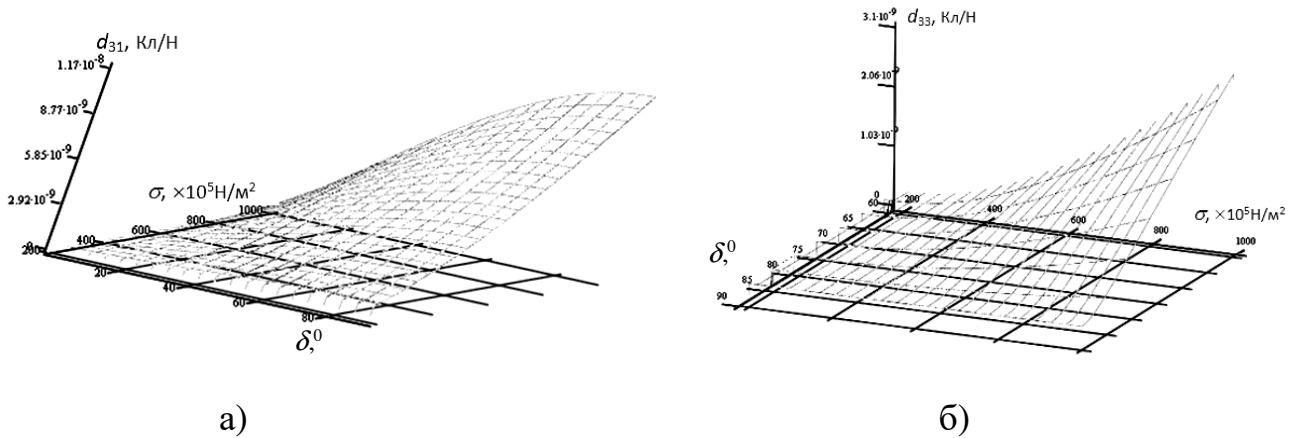


Рис. 1. Залежність значень п'єзomodулів d_{33} (а) і d_{31} (б) від кута δ та механічних напруг в ПП

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 не ефективно для біморфних ПП. Використання схемотехнічного 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.

Одна з функціональних моделей асиметричного біморфного доменно-дисипативного п'єзоперетворювача при його консольному закріпленні (при умові виконання металевих пластин з однакового матеріалу) показана на рис. 2.

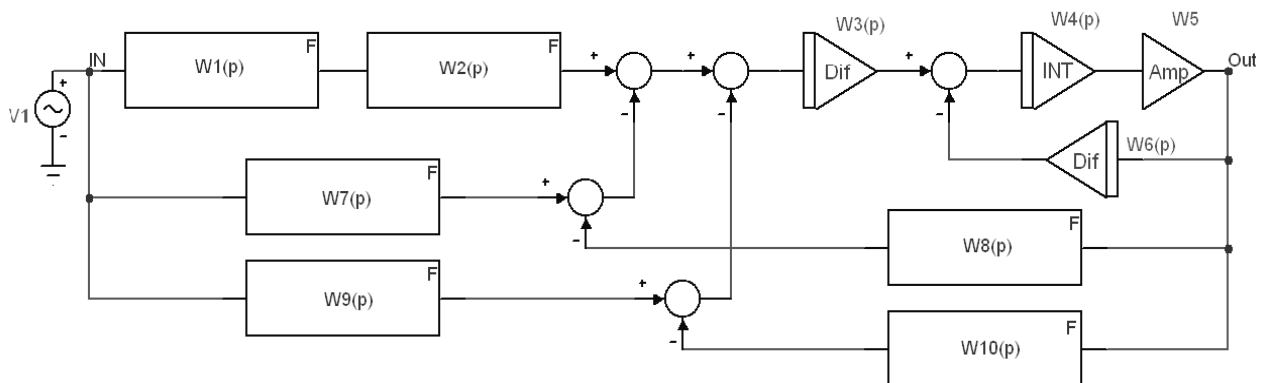


Рис. 2. Функціональна модель асиметричного біморфного доменно-дисипативного п'єзоперетворювача при його консольному закріпленні

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.

Передавальна функція має вигляд:

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

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.

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. На рис. 3 комп'ютерна система представлена у вигляді моделі «сірого ящика».

На вхід системи подаються 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 попередньо накопиченої енергії ($W_{НАК}$), енергії, що генерується п'єзоперетворювачами ($W_{ПП}$), енергоспоживання електронних компонент пристрою ($W_{КОМ}$) та

енергоспоживання мікропроцесорів (W_{CPU}). Крім того, на вхід системи подаються часові проміжки виконання завдань – t_Z .

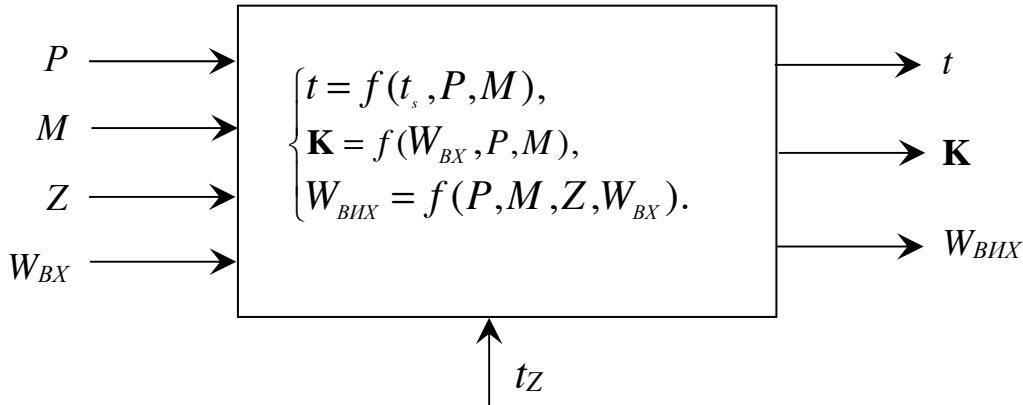


Рис. 3. Подання системи у вигляді моделі «сірого ящика»

На виході системи спостерігаються величини: t – час роботи IoT пристрою; \mathbf{K} – матриця з'єднань п'єзоперетворювачів з модулями; W_{BHX} – енергоспоживання системи.

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

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

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 работоздатності IoT пристрою для кожного його j -го окремого модуля повинна виконуватися умова:

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

Тоді енергоефективність системи буде максимальною при виконанні умови:

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

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:

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

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 IoT з максимальною енергоефективністю має вигляд:

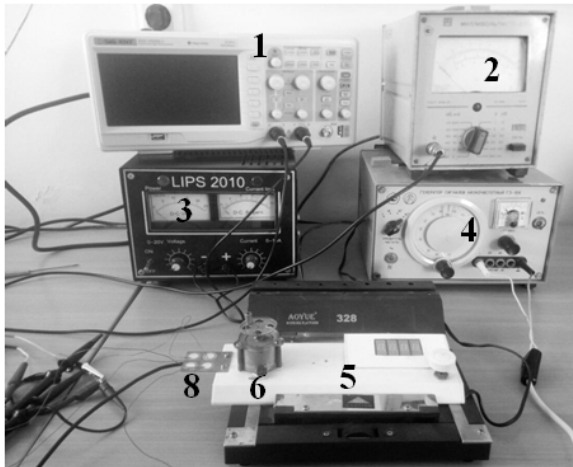
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{III}^i \geq \sum_{j=1}^m W_{KOM}^j + \sum_{j=1}^m W_{CPU}^j, \\ W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{III}^i \cdot k_{ij} - (W_{KOM}^j + W_{CPU}^j) \geq 0, \\ \sum_{j=1}^m W_{HAK}^j + \sum_{i=1}^p W_{III}^i \cdot k_{ij} \rightarrow \min, \\ \sum_{j=1}^m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

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 ППІ в якості джерела додаткової енергії, а також необхідну кількість ППІ та їх підключення до відповідних модулів.

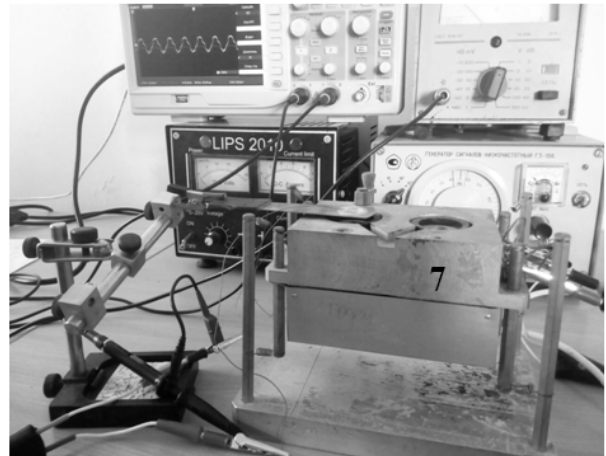
Таким чином, отримано третій науковий результат роботи, а саме отримала подальший розвиток математична модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, за рахунок врахування енергії, яка генерується п'єзокерамічними перетворювачами, що дозволяє будувати IoT пристрої 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 (рис. 4, а) та акустичних (рис. 4, б) 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.



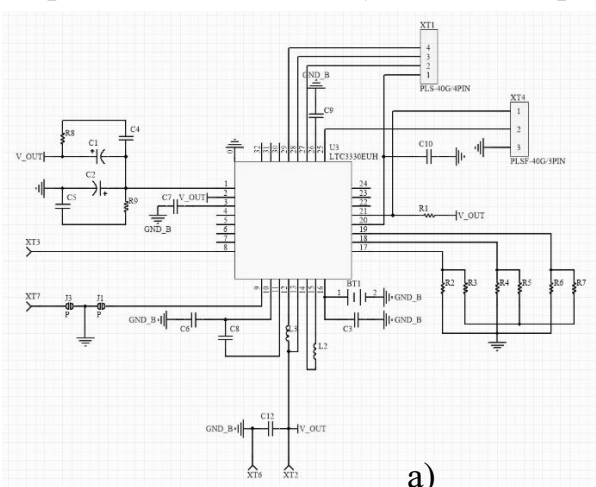
а)



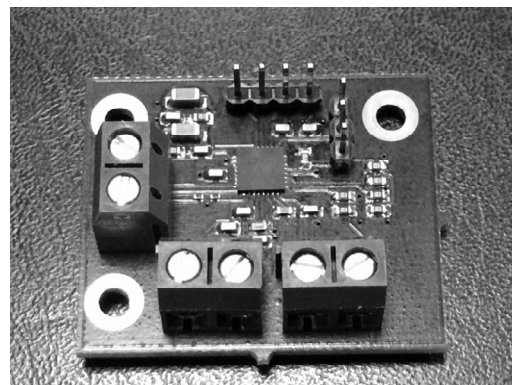
б)

Рис. 4. Загальний вигляд установки для дослідження асиметричних біморфних доменно-дисипативних п'єзокерамічних перетворювачів при вібраційному (а) та акустичному (б) впливі на п'єзоперетворювачі: 1 – осцилограф SDS1052DL+; 2 – мілівольтметр ВЗ-38; 3 – джерело живлення Lips2010; 4 – генератор ГЗ-106; 5 – експериментальна платформа АОУУЕ328; 6 – двигун AMS1141М від Elecrow з асиметричним навантаженням на валу; 7 – пульсофон; 8 – досліджувані асиметричні біморфні п'єзоперетворювачі

Для накопичення енергії було спроектовано та виготовлено плату випрямляча на базі чипу LTC3330 (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Схема та виготовлена плата накопичувача енергії на основі чипу LTC3330 Linear Technology

Один з результатів експерименту із визначення кількості та розміщення асиметричних біморфних п'єзоелементів на консольній пластині показаний на рис. 6.

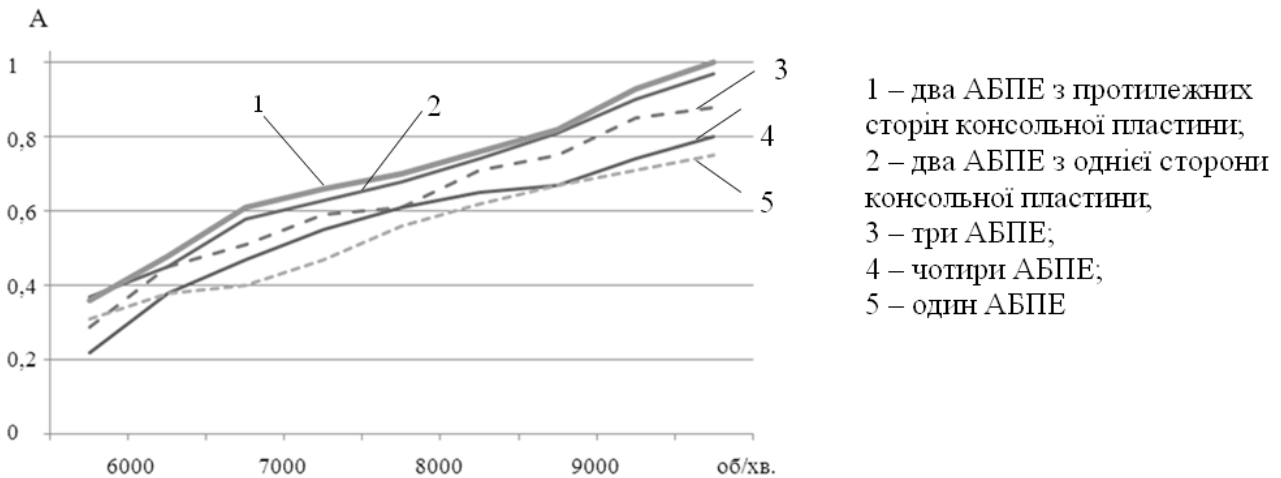


Рис. 6. Залежність нормованих значень вихідної напруги п'єзоперетворювачів в залежності від частоти обертання мотора при різних підключеннях асиметричних біморфних п'єзоелементів (АБПЕ)

В експерименті в якості АБПЕ використані п'єзоелементи 7ВВ-12-9 фірми Murata Manufacturing Co., що складаються з металевих пластини з латуні діаметром 12 мм та товщиною 0,1 мм із закріпленими на них п'єзоелементами діаметром 9 мм та товщиною 0,12 мм. В якості консольної пластини використана оцинкована сталевна пластина марки 08пс/Зсп розмірами 35x20x0,4 мм. В результаті експерименту виявлено, що найбільший рівень вихідного сигналу має перетворювач з двома АБПЕ на протилежних гранях консольної пластини.

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'єзомагнітних тахометрів, які довели можливість застосування п'єзоперетворювачів для отримання високих рівнів вихідної напруги (рис. 7).

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.

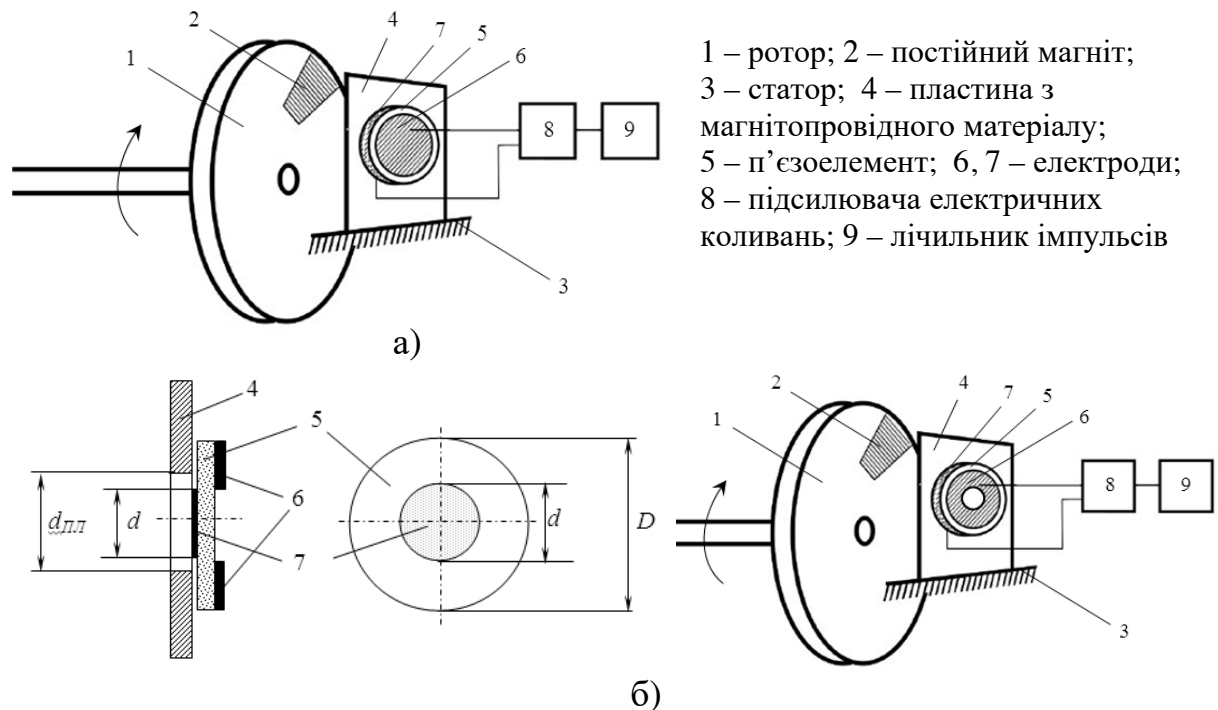


Рис. 7. Конструкції п'єзомагнітних тахометрів за патентом 132568 (а) та патентом 132569 (б)

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.

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 металевої 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, дати 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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., Бакарджиев 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. **(Index Copernicus)**

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. **(Index Copernicus)**

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. **(Index Copernicus)**

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. **(Index Copernicus)**

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. **(Scopus)**

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

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. (**Index Copernicus**)

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. (**Index Copernicus**)

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 Microsar 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.

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.

В роботі отримано аналітичний опис параметрів п'єзокераміки з урахуванням орієнтаційних ефектів доменів у п'єзокераміки за рахунок врахування конструктивних та фізичних параметрів біморфних п'єзоелементів. 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. Розроблено математичну модель функціонування комп'ютерної системи в умовах обмеженого енергозабезпечення, яка враховує енергію, що генерується п'єзокерамічними перетворювачами. Розроблено та досліджено зразки IoT пристроїв на базі п'єзокерамічних перетворювачів.

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

АННОТАЦИЯ

Корецкая А. О. Модели и средства построения энергоэффективных IoT устройств на базе пьезокерамических преобразователей. – На правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – Компьютерные системы и компоненты. – Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, 2019.

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научно-практической задачи повышения энергоэффективности IoT устройств за счет разработки моделей и средств построения энергоэффективных IoT устройств на базе пьезокерамических преобразователей.

В работе получено аналитическое описание параметров пьезокерамики с учетом ориентационных эффектов доменов в пьезокерамике за счет учета конструктивных и физических параметров биморфных пьезоэлементов. Впервые получены функциональные модели консольных биморфных доменно-дисипативных пьезопреобразователей, что позволяет рассчитывать линейные размеры пьезоэлементов и пластин при проектировании пьезопреобразователей с максимальным уровнем выходного сигнала. Разработана математическая модель функционирования компьютерной системы в условиях ограниченного энергоснабжения, которая учитывает энергию, генерируемую пьезокерамическими преобразователями. Разработаны и исследованы образцы IoT устройств на базе пьезокерамических преобразователей.

Ключевые слова: IoT устройства, энергоэффективность, автономное питание, консольные асимметричные биморфные доменно-дисипативные пьезопреобразователи.

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.

A conducted analysis of existing models and tools for building IoT devices with power from autonomous voltage sources found their main shortcomings and ways to further improve. It is shown that the use of piezoceramic transducers as sources of additional power is a promising direction for further development. The main ways of increasing the energy efficiency of IoT devices based on piezoceramic transducers are identified.

An improved analytical description of the parameters of piezoelectric ceramics, taking into account the orientation effects of domains in piezoceramics, made it possible to determine the shapes of bimorph piezoelectric elements, their electrodes, and the necessary mechanical voltage to increase the output power of IoT devices based on piezoceramic transducers.

Developed and investigated functional models of cantilever bimorph domain-dissipative piezotransducers allowed to calculate the linear dimensions of piezoelectric elements, as well as metal and cantilever plates to obtain the maximum output signal of the piezotransducer, and therefore, an increase in the operating time of the IoT device when it is self-powered.

The developed mathematical model of the functioning of IoT devices in conditions of limited power supply allows determining the possibility and time of autonomous operation of such devices using the piezotransducers developed in operation.

An experimental study of the developed IoT device samples based on the console domain-dissipative asymmetric bimorph piezoceramic transducers proposed in the work showed that the positions obtained in the work allow extending the battery operating time of the IoT devices up to 10%, making it possible to transfer signal information during an emergency event, and also reduce the cost of IoT devices by up to 15%.

Two designs of IoT devices have been developed and patented on the example of piezo-magnetic tachometers, in which the theoretical concepts proposed in the work are implemented.

The practical value of the work is to expand the scientific and technical base for designing IoT devices based on piezoceramic transducers and to bring the obtained scientific results in specific models and IoT devices, implemented, in particular, during the development of IoT Smart Toys by the Cubomania startup and in the educational process of two universities: Petro Mohyla Black Sea National University (Nikolaev) and at The Bogdan Khmelnytsky National University of Cherkasy.

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