

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 539.3

DOI <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-1-1>ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОРЕЗОНАНСНИХ СЕНСОРІВ
В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

В. Р. БІЛОБРОВ, студент

(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Анотація. Сучасне суспільство перебуває у постійному пошуку точних та надійних методів вимірювання різних параметрів, таких як температура, тиск та вологість. Це обумовлено необхідністю точних даних для наукових та інженерних досліджень, а також для забезпечення якісного контролю процесів у промисловості. Одним з ключових елементів в області вимірювань є сенсори та вимірювальні пристрої. Сенсори та вимірювальні пристрої відіграють важливу роль у сучасному світі, забезпечуючи збір та аналіз даних про різні параметри навколишнього середовища. Розробка нових типів сенсорів та удосконалення методів їх калібрування має вирішальне значення для точності та надійності вимірювань. У цій науковій роботі будуть розглянуті основні аспекти застосування п'єзореzonансних сенсорів. П'єзоелектричні перетворювачі та сенсори широко застосовуються в гідроакустиці, електроакустиці, в ультразвуковій, медичній, вимірювальній техніці, в зондувальних наномікроскопах, що сканують, п'єзодвигунах та в інших галузях науки і техніки.

Актуальною є напрямок розвитку керованого по частоті п'єзореzonансного сенсора та пристроїв (генераторів, фільтрів і датчиків) є відмова від варикапу у ланцюгу керування і управління частотою безпосереднім впливом на елементи резонатора. Що робить використання п'єзореzonансних сенсорів для моніторингу та діагностики стану електроприводів важливим. Проведено огляд технології п'єзореzonансних сенсорів, їх переваги, а також практичні приклади автоматизованих систем контролю, що використовують ці сенсори для підвищення надійності та ефективності роботи електроприводів. Динамічне керування такого п'єзореzonансного сенсора можливо забезпечити мікропереміщенням рухомого електроду резонатора за допомогою лінійного електродинамічного приводу (ЛЕДП).

Ключові слова: сенсори, вимірювальні пристрої, лазерне випромінювання, п'єзореzonанс, електропривід, автоматизовані системи, п'єзореzonансна лазерна калориметрія.

Постановка проблеми. Особливе місце п'єзоелектричні перетворювачі займають у гідроакустиці входячи в склад автоматизованих систем контролю електроприводів, будучи, по суті, вухами та очима підводних та надводних кораблів. Як відомо, перетворювач – це пристрій, який перетворює одну фізичну величину або енергію на іншу фізичну величину або енергію, наприклад, теплову енергію – на електричну, силу – на переміщення, тиск – на електричну напругу або струм, електричну напругу одного рівня – на електричну напругу іншого рівня тощо [1].

Датчик (сенсор) – це перетворювач вимірюваної фізичної величини, зазвичай, в електричний сигнал (напруга, струм, частоту, фазу тощо). Іншими словами, датчик (сенсор) – це перетворювач для отримання вимірювальної інформації. При проектуванні п'єзокерамічних перетворювачів зазвичай використовують п'єзоелемент певної форми та розмірів з певного п'єзокерамічного матеріалу з певними електрофізичними властивостями (характеристиками). При цьому традиційно вектор сили F , що діє на п'єзоелемент,

(тиск і т.п.) паралельний вектору поляризації P . Одночасно вектор сили F паралельний вектору електричного поля E вихідного сигналу датчика, тобто перпендикулярний електродам, які нанесені на поверхню п'єзоелемента (рис. 1, а) [2].

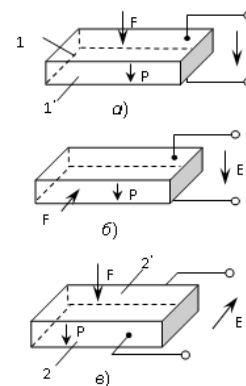


Рис. 1. Тип просторової енергосилової структури п'єзоелемента: а – традиційний; б – поперечний; в – доменно-дисипативний

Це, очевидно, пов'язано з тим, що ці електроди використовують для поляризації п'єзоелемента при виготовленні. Одночасно вони використовуються також для зняття корисного сигналу при вимірюванні фізичних величин (сили, тиску, прискорення та ін.), а також для введення в п'єзоелемент електричної напруги при використанні п'єзоелемента як випромінювача. Такий тип перетворювача відомий та названий традиційним. Для цього випадку для певного п'єзоелемента можна отримати лише один перетворювач з певними характеристиками резонансна частота, чутливість, діапазон робочих частот та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] було запропоновано при проектуванні перетворювачів враховувати взаємне розташування векторів F , P та E . Це розташування векторів було названо просторовою енергосиловою структурою п'єзоелемента (ПЕСП). Рідше використовуються перетворювачі, в яких п'єзоелемент розташовується таким чином, що вектор сили F перпендикулярний вектору поляризації P (рис. 1, б). Такий тип перетворювача було названо поперечним [4].

Дуже цікавим виявився варіант перетворювача, який має вихідний сигнал знімається з електродів 2-2' (рис. 1, в). У цьому випадку вектор E перпендикулярний до вектора P . Такий тип перетворювача був названий (можливо не зовсім вдало) доменно-дисипативним [5]. Фізика процесів, які у цих перетворювачах, вивчена недостатньо. Передбачається, що вплив на їх характеристики можуть мати наступні фактори [6]:

- розсіювання енергії на доменах;
- зміна електричної ємності між електродами;
- виникнення у п'єзоелементі інших типів коливань.

Визначення можливого вкладу кожного з наведених факторів вимагає подальшого вивчення. На рис. 2 показані експериментальні амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) перетворювачів, зображених на рис. 1. Ці перетворювачі були виготовлені з п'єзоелемента з розмірами $9 \times 10 \times 90$ мм із п'єзокераміки ЦТС-19. Вимірювання АЧХ авторами [7], проводились у п'єзотрансформаторному режимі за допомогою приладу для дослідження АЧХ X1-46, а фотографування характеристик проводилося цифровою камерою "Nikon-D90".

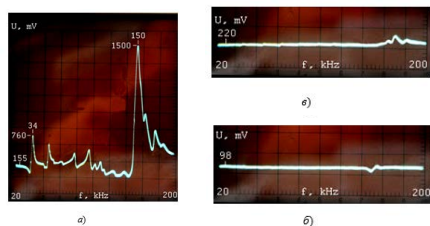


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики перетворювачів, показаних на рис. 1:
а – рис. 1 а; б – рис. 1 б; в – рис. 1 в

На рис. 3 показані перехідні характеристики перетворювачів, показаних на рис. 1. Як видно із рис. 2 і 3 при зміні взаємного розташування векторів P , F і E в просторі динамічні характеристики перетворювачів істотно змінюються. Ця обставина відкриває широкі можливості під час проектування перетворювачів.

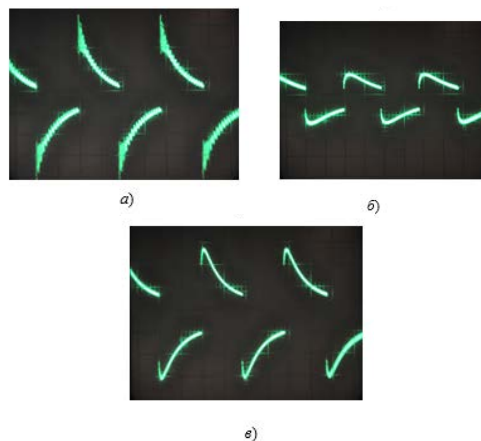


Рис. 3. Перехідні характеристики перетворювачів, показаних на рис. 1: а – рис. 1 а; б – рис. 1 б; в – рис. 1 в

Автори [8] досліджували ефективність перетворення частоти лазерного випромінювання в нелінійно-оптичних кристалах (які є прототипами п'єзорезонансних сенсорів), яке залежить від узгодження фаз взаємодіючих хвиль, що у разі генерації другої гармоніки з першим типом взаємодії визначається рівністю показників заломлення. Порушення його відбувається, зокрема, при зміні середньої температури та виникненні поздовжніх і поперечних температурних градієнтів кристалу. Як правило [9], у робочому діапазоні довжин хвиль лазерного випромінювання нелінійно-оптичні кристали мають невеликі коефіцієнти поглинання. Однак у разі перетворення високих потужностей лазерного випромінювання навіть невелике оптичне поглинання кристалів може призводити до значного неоднорідного розігріву і, як наслідок, до зниження ефективності перетворення. Раніше [10] в радіочастотному діапазоні було виявлено суттєвий вплив іонної провідності LBO на форму лінії п'єзоелектричних резонансів під час розігріву. Однак вплив іонної провідності на коефіцієнт оптичного поглинання кристала LBO в діапазоні інтенсивності $10-100 \text{ MW/cm}^2$ безперервного лазерного випромінювання на довжині хвилі 1070 nm не було виявлений. Що дозволяє ефективно дослідити п'єзорезонансні сенсори.

Формування цілей статті. Дослідити використання п'єзорезонансних сенсорів для моніторингу та діагностики стану електроприводів. Описати практичні приклади автоматизованих систем контролю, що використовують ці сенсори.

Виклад основного матеріалу. Перші п'єзоелементи (наприклад, використані П. Ланжевенном у гідролокаторах) являли собою прямокутні кварцові пластини з так званими металевими накладками [11]. Ці знімні накладки виконували дві функції. По-перше, ними збиралися електричні заряди, що виникають при дії звукового тиску. Для випромінювачів за допомогою накладок підводилася електрична напруга. По-друге, за допомогою накладок знижувалась робоча частота п'єзоелемента. Надалі електроди на кварц і п'єзокераміку стали наноситися спалюванням, напиленням тощо, а п'єзоелементи стали мати два постійні електроди. Такі п'єзоелементи отримали назву п'єзорезонатори [12].

Пізніше з'явилися пристрої з урахуванням п'єзорезонаторов, у яких електроди кожної межі ділилися на частини, що створило дві системи електродів – вхідну і вихідну. Такі пристрої виконували функції трансформаторів напруги чи струму з коефіцієнтом передачі (трансформації) до 1000 і більше [13]. Необхідно відзначити, що функція п'єзотрансформатора не єдина для цих пристроїв. Дійсно, кожна система електродів створює власну коливальну систему, яка відрізняється від параметрів коливальної системи всього п'єзоелемента.

Наприклад, в [14] описаний випромінювач, що є п'єзоелементом з декількома системами електродів. З'єднання цих систем у порядку дає можливість створити випромінювачі з різними діаграмами спрямованості. Не менш цікаві результати можна отримати, якщо підключати до вимірювального приладу або генератора електроди різних систем електродів, наприклад, 1-2' або 1'-2 (рис. 4). Це змінює просторову енергосилову структуру п'єзоелемента, отже, і характеристики перетворювача.

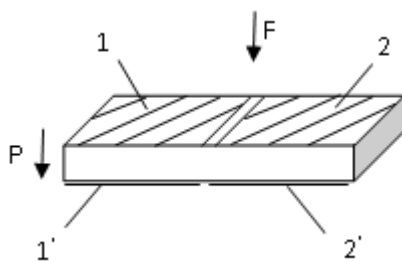


Рис. 4. П'єзоелемент із розділеними електродами

Якщо розділити електроди п'єзоелемента на дві рівні частини, то чутливість датчика заряду зменшиться вдвічі, так як при рівномірному впливі на п'єзоелемент заряд пропорційний площі електродів. Чутливість по напрузі залишиться такою ж, як і для п'єзоелемента з нерозділеними електродами, так як при зменшенні

величини заряду при розподілі електродів зменшується і величина ємності між електродами. Слід зазначити, що просторове розташування електродів один щодо одного та їх комутація призводить не тільки до зміни ємності між електродами та чутливості, але й до зміни динамічних характеристик (АЧХ, імпульсної та перехідної характеристик). Для датчиків можуть використовуватися також п'єзоелементи дискової форми з електродами у вигляді напівдисків, дисків та кілець, п'єзоелементи у формі порожнистих циліндрів та ін. [15].

Температурні п'єзорезонансні сенсори є одними з найпоширеніших типів сенсорів. Для підвищення їх точності та функціональності проводиться дослідження нових матеріалів для виготовлення терморезисторів та термопар, а також розробка інноваційних методів виміру температури. Як відомо, термопара містить два спаї, тому для правильного та точного вимірювання температури на одному (першому) зі спаїв, необхідно підтримувати інший (другий) спай за відомої постійної температури, щоб виміряна ЕРС виявлялася явною функцією температури тільки першого спаю – головного робочого спаю. Так, з метою підтримки в термовимірювальному контурі умов, яких паразитний вплив ЕРС другого («холодного спаю») було б необхідно якось компенсувати у будь-який робочий момент часу напругою (рис. 5).



Рис. 5. Термовимірювальний контур, у якому другий спай занурений у воду з льодом

З метою досягнення правильних умов, автори [16] вдалися до хитрості: помістили другий спай (місце приєднання проводів першого спаю з вимірювальним приладом) у ємність з крижаною водою – у заповнену водою ванну, в якій ще плаває лід. Таким чином отримуємо на другому спаї практично постійну температуру танення льоду. Після чого залишиться відстежувати результуючу напругу на термопарі, обчислювати температуру першого (робочого) спаю, бо другий спай буде в незмінному стані, напруга на ньому буде константою. Ціль в результаті буде досягнута, вплив «холодного спаю» виявиться скомпенсований. Але якщо так робити, то вийде громіздко та незручно (рис. 6).

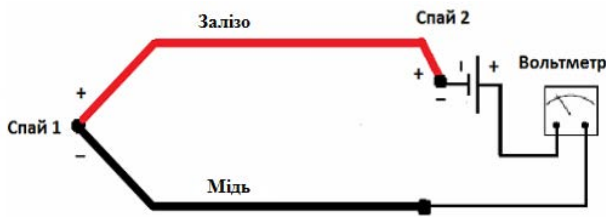


Рис. 6. Термовимірювальний контур, у якому вплив «холодного спаю» скомпенсовано

Найчастіше термопари застосовуються все ж таки в мобільних портативних пристроях, у переносних лабораторних приладах. Варіант, ванна з крижаною водою очевидно не підходить. Інший спосіб є – метод компенсації напруги від температури «холодного спаю», що змінюється: приєднанням послідовно до вимірювального контуру джерела додаткової напруги, ЕРС якого буде мати протилежний напрямок і за величиною буде завжди точно дорівнює ЕРС холодного спаю. У випадку, якщо ЕРС холодного спаю безперервно відстежується шляхом вимірювання його температури іншим способом, ніж термопара, зводячи сумарну напругою паразитної ділянки ланцюга до нуля.



Рис. 7. Термовимірювальний контур з'єднаний із типовою електронікою п'єзореzonансного сенсора

Для цього підійде термістор або термометр опору, з'єднаний з типовою електронікою, яка і автоматично формуватиме компенсуючу напругу необхідної величини. І хоча «холодний спай» не обов'язково може бути буквально холодним, його температура, як правило, не така вже екстремальна, яка може бути у робочому спаї, тому зазвичай підходить навіть термістор.

$$U_{\text{вольтметра}} = U_{\text{спая1}} - U_{\text{спая2}} + U_{\text{компенсації}}$$

Доступні спеціальні електронні компенсуючі модулі «температури танення льоду» для термопар, завдання яких у тому і полягає, щоб подавати точну протилежну напругу у вимірювальний ланцюг. Значення напруги від такого модуля підтримується на такому значенні, щоб точно компенсувати температуру точок приєднання провідників термопари до модуля. Температура точок приєднання (на терміналі) вимірюється термістором або термометром

опору, і точно необхідна напруга автоматично прикладається послідовно до ланцюга.

Електричні п'єзореzonансні датчики тиску застосовуються в багатьох галузях, включаючи авіацію, медицину та промисловість. Розробка мікромеханічних п'єзореzonансних сенсорів із використанням нанотехнологій дозволяє створювати більш компактні та високочутливі датчики тиску. Крім того, дослідження [17] спрямовані на покращення стійкості до впливу агресивних середовищ та високих температур. Будь-який електричний датчик тиску включає: чутливий елемент, який служить передачі впливу на первинний перетворювач, схему обробки сигналу та корпус.

У п'єзореzonансних датчиках тиску працює зворотний п'єзоэффект, при якому п'єзоелектрик деформується під дією напруги, що подається, і що більше напруга, то сильніша деформація. В основі датчика – резонатор у формі пластини з п'єзоелектрика, з двох сторін якої нанесено електроди. При подачі на електроди змінної напруги, матеріал пластини вібрує, згинаючи то в один, то в інший бік, і частота вібрації дорівнює частоті напруги, що подається. Ще один тип електричних датчиків тиску, віддалено схожих на ємнісні – індуктивні чи магнітні датчики. Провідна мембрана, чутлива до тиску, розташована на певній відстані від тонкого – образного магнітопроводу, на середньому керні якого намотана котушка. Між мембраною та магнітопроводом виставлений повітряний зазор.

П'єзореzonансні датчики мають цілу низку переваг у порівнянні з датчиками інших типів. До їх переваг відносяться:

- простота виготовлення, використання недорогих матеріалів для виробництва;
- малі габарити та вага;
- низьке споживання енергії;
- висока чутливість;
- відсутність контактів (у деяких випадках);
- тривалий термін експлуатації;
- потреба дуже малих зусиль для переміщення рухомої частини датчика;
- простота пристосування форми датчика до різних завдань та конструкцій.

До недоліків п'єзореzonансних датчиків слід віднести:

- порівняно невеликий коефіцієнт передачі (перетворення);
- високі вимоги до екранування деталей;
- необхідність роботи на підвищеній (порівняно з 50 Гц) частоті.

Висновок. Розробка нових типів сенсорів, зокрема п'єзореzonансних сенсорів та удосконалення методів калібрування відіграють ключову роль у забезпеченні точності та надійності вимірювань різних параметрів. Ці дослідження мають важливе значення для наукових та інженерних завдань, а також для промислових додатків.

Подальші дослідження та інновації у цій області сприятимуть розвитку сучасних технологій та покращенню якості життя. З урахуванням швидкого розвитку технологій та наукових досягнень, можна очікувати, що майбутнє принесе ще більш точні та надійні п'єзореzonансні сенсори,

інноваційні методи калібрування та ширший спектр застосувань для вимірювальних пристроїв. Ці удосконалення сприятимуть підвищенню ефективності та точності процесів контролю, моніторингу та наукових досліджень, сприяючи розвитку нашого суспільства та промисловості загалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Taranchuk A., Pidchenko S., Skovryha O. Pressure transducer based on the dual-mode piezoresonant sensors with modulated interelectrode gap. Proceedings of IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology, Kiev, Ukraine, 2016, p. 261–263.
2. Sharapov V., Vladisauskas, Bazilo K., Kunitskaya L., Sotula Zh. Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2009. № 4(64). P. 44–50.
3. Z. Hu, J. Hedley, N. Keegan, J. Spoors, B. Gallacher, and C. Mcneil, “One-port electronic detection strategies for improving sensitivity in piezoelectric resonant sensor measurements.” Sensors, 16, 1781 (2016).
4. Pidchenko S., Taranchuk A., Spivak A., Akulynichev A. The technical invariance of piezoresonance devices of the info communication systems. Proceedings of IEEE 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Info Communications Science and Technology, Kharkiv, Ukraine, 2016, p. 71–72.
5. Molanes R. F., Farina J., and Rodriguez-Andina J. J. “Field-Programmable System-on-Chip for high-accuracy frequency measurements in QCM sensors.” Proc. IECON 2013 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 2267 (2013).
6. Sharapov V., Kazys R., Vladisauskas A., Kunitskaya L., Sotula Zh., Tuz V., Bazilo K. Transducers with piezoelements in schemes of electric filters. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2010. № 1(65).
7. Iglesias E., de Frutos J., de Espinosa F.M. Modelado de transductores ultrasónicos piezoeléctricos para fisioterapia. Boletín Soc. Espa Nola Cerámica Vidr. 2015, 54, 231–235.
8. Qiu Y., Gigliotti J., Wallace M., Griggio F., Demore C., Cochran S. Troler-McKinstry, S. Piezoelectric micromachined ultrasound transducer (PMUT) arrays for integrated sensing, actuation and imaging. Sensors 2015, 15, 8020–8041.
9. Khazaei M., Rosendahl L.A., Rezaei A. Online Condition Monitoring of Rotating Machines by Self-Powered Piezoelectric Transducer from Real-Time Experimental Investigations. Sensors 2022, 22, 3395.
10. Zhang Y., Wang L., Qin L., Zhong C. Wideband and wide beam piezoelectric composite spherical cap transducer for underwater acoustics. Ferroelectrics 2021, 583, 295–305.
11. Martins M., Correia V., Cabral J., Lanceros-Mendez S., Rocha J.G. Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications. Sens. Actuators Phys. 2012, 184, 141–148.
12. Pershevska L., Drozdenko O., Drozdenko K., Leiko O. Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer. Technol. Audit. Prod. Reserv. 2021, 3, 50–55.
13. Sun D., Wang S., Hata S., Shimokohbe, A. Axial vibration characteristics of a cylindrical, radially polarized piezoelectric transducer with different electrode patterns. Ultrasonics 2010, 50, 403–410.
14. Sharapov V., Vladisauskas, Filimonov S. Piezoceramic scanners on the basis of planar bimorph piezoelements for scanning probe nanomicroscopes. ISSN 1392-2114, Ultrasound. 2010. № 1(65).
15. Suhir E., Birman V. Effect of temperature on vibrations of physically nonlinear piezoelectric rods. In Proceedings of the 11th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems, THERMINIC 2005, Belgirate Italy, 27–30 September 2005.
16. Piao C., Kim J.O. Vibration characteristics of an ultrasonic transducer of two piezoelectric discs. Ultrasonics 2017, 74, 72–80.
17. Li X., Lyu D., Song Y., Zhang S., Hu P., Jeong H. Simultaneously determining sensitivity and effective geometrical parameters of ultrasonic piezoelectric transducers using a self-reciprocity method. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 2019, 66, 1649–1657.

REFERENCES

1. Taranchuk, A., Pidchenko, S., & Skovryha, O. (2016). Pressure transducer based on the dual-mode piezoresonant sensors with modulated interelectrode gap. Proceedings of IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology, Kiev, Ukraine, p. 261–263.
2. Sharapov, V., Vladisauskas, Bazilo, K., Kunitskaya, L., Sotula, Zh. (2009). Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. ISSN 1392-2114, Ultrasound. № 4(64). P. 44–50.
3. Hu, Z., Hedley, J., Keegan, N., Spoors, J., Gallacher, B., and Mcneil, C. (2016). “One-port electronic detection strategies for improving sensitivity in piezoelectric resonant sensor measurements.” Sensors, 16, 1781.
4. Pidchenko, S., Taranchuk, A., Spivak, A., & Akulynichev, A. (2016). The technical invariance of piezoresonance devices of the info communication systems. Proceedings of IEEE 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Info Communications Science and Technology, Kharkiv, Ukraine, p. 71–72.
5. Molanes, R. F., Farina, J., and Rodriguez-Andina, J. J. (2013). “Field-Programmable System-on-Chip for high-accuracy frequency measurements in QCM sensors.” Proc. IECON 2013 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 2267.

6. Sharapov, V., Kazys, R., Vladisauskas, A., Kunitskaya, L., Sotula, Zh., Tuz, V., & Bazilo, K. (2010). Transducers with piezoelements in schemes of electric filters. ISSN 1392-2114, *Ultrasound*. № 1(65).
7. Iglesias, E., de Frutos, J., de Espinosa, F.M. (2015). Modelado de transductores ultrasónicos piezoeléctricos para fisioterapia. *Boletín Soc. Espa Nola Cerámica Vidr.* 54, 231–235.
8. Qiu, Y., Gigliotti, J., Wallace, M., Griggio, F., Demore, C., Cochran, S., & Trolier-McKinstry, S. (2015). Piezoelectric micromachined ultrasound transducer (PMUT) arrays for integrated sensing, actuation and imaging. *Sensors*, 15, 8020–8041.
9. Khazaei, M., Rosendahl, L.A., & Rezaei, A. (2022). Online Condition Monitoring of Rotating Machines by Self-Powered Piezoelectric Transducer from Real-Time Experimental Investigations. *Sensors* 22, 3395.
10. Zhang, Y., Wang, L., Qin, L., & Zhong, C. (2021). Wideband and wide beam piezoelectric composite spherical cap transducer for underwater acoustics. *Ferroelectrics*, 583, 295–305.
11. Martins, M., Correia, V., Cabral, J., Lanceros-Mendez, S., & Rocha, J.G. (2012). Optimization of piezoelectric ultrasound emitter transducers for underwater communications. *Sens. Actuators Phys.* 184, 141–148.
12. Pershevska, L., Drozdenko, O., Drozdenko, K., & Leiko, O. (2021). Study of the influence of the housing on the cooling efficiency of the piezoceramic electroacoustic Langevin-type transducer. *Technol. Audit. Prod. Reserv.* 3, 50–55.
13. Sun, D., Wang, S., Hata, S., Shimokohbe, A. (2010). Axial vibration characteristics of a cylindrical, radially polarized piezoelectric transducer with different electrode patterns. *Ultrasonics*, 50, 403–410.
14. Sharapov, V., Vladisauskas, & Filimonov, S. (2010). Piezoceramic scanners on the basis of planar bimorph piezoelements for scanning probe nanomicroscopes. ISSN 1392-2114, *Ultrasound*. № 1(65).
15. Suhir, E., & Birman, V. (2005). Effect of temperature on vibrations of physically nonlinear piezoelectric rods. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems, THERMINIC, Belgirate Italy, 27–30 September 2005*.
16. Piao, C., & Kim, J.O. (2017). Vibration characteristics of an ultrasonic transducer of two piezoelectric discs. *Ultrasonics*, 74, 72–80.
17. Li, X., Lyu, D., Song, Y., Zhang, S., Hu, P., & Jeong, H. (2019). Simultaneously determining sensitivity and effective geometrical parameters of ultrasonic piezoelectric transducers using a self-reciprocity method. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 66, 1649–1657.

V. Bilobrov, Student (National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"). *Application of piezoresonance sensors in automated control systems of electric drives*

Abstract. Modern society is constantly searching for accurate and reliable methods of measuring various parameters, such as temperature, pressure and humidity. This is due to the need for accurate data for scientific and engineering research, as well as for ensuring quality control of processes in industry. One of the key elements in the field of measurements are sensors and measuring devices. Sensors and measuring devices play an important role in today's world, providing collection and analysis of data on various parameters of the environment. The development of new types of sensors and the improvement of their calibration methods is crucial for the accuracy and reliability of measurements. In this scientific work, the main aspects of the application of piezoresonant sensors will be considered.

The direction of development of the frequency-controlled piezoresonant sensor and devices (generators, filters and sensors) is the rejection of varicap in the control circuit and frequency control by direct influence on the resonator elements. Which makes the use of piezoresonant sensors for monitoring and diagnosing the condition of electric drives important. An overview of the technology of piezoresonant sensors, their advantages, as well as practical examples of automated control systems that use these sensors to increase the reliability and efficiency of electric drives is conducted. Dynamic control of such a piezoresonant sensor can be ensured by micro-movement of the moving electrode of the resonator using a linear electrodynamic drive (LED).

Key words: sensors, measuring devices, laser radiation, piezoresonance, electric drive, automated systems, piezoresonance laser calorimetry.