

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-4>
УДК 621.382

БАРИЛО НАЗАР

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-9101-3768>
e-mail: nazar.barylo.asp.2025@lpnu.ua

БРИЧ МИКОЛА

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0004-9767-5991>
e-mail: mykola.v.brych@lpnu.ua

ШЛЮСАР ЮРІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0001-7849-4253>
e-mail: yurii.a.shliusar@lpnu.ua

АКОПЯН ВІТАЛІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0002-7130-037X>
e-mail: vitalii.h.akopian@lpnu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ СИГНАЛЬНИХ ТРАКТІВ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті наведено результати моделювання ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів, що використовуються в сигнальних трактах сенсорних пристроїв. Розроблені моделі відтворюють електромеханічні процеси, характерні для п'єзорезонансних структур, та дають змогу оцінити вплив параметрів еквівалентної схеми заміщення на стабільність і точність сигналу.

Ключові слова: ультразвуковий п'єзоелектричний перетворювач, моделювання, еквівалентна схема, сигнальний тракт, аналоговий фронт-енд.

BARYLO NAZAR, BRYCH MYKOLA, SHLIUSAR YURI, AKOPIAN VITALII

Lviv Polytechnic National University

MODELING OF ULTRASONIC PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS FOR SIGNAL PATHS OF SENSOR DEVICES

This paper presents the results of research on modeling ultrasonic piezoelectric transducers used in the signal paths of sensor devices. The study focuses on the development and verification of mathematical models that accurately reproduce the electromechanical resonance processes occurring in piezoelectric structures during operation. Two principal modeling approaches are considered. The first is a parameter-based method, which utilizes the manufacturer's technical specifications to define the electrical and mechanical properties of the transducer. The second approach is based on constructing an equivalent circuit model, where the piezoelectric transducer is represented by a combination of active and reactive components that simulate its resonance behavior.

The study examines the influence of equivalent circuit parameters—resistance, inductance, and capacitance, including parasitic capacitance—on the resonant frequency, quality factor, phase stability, and bandwidth of the sensor system. Frequency-domain and time-domain analyses are conducted to assess the dynamic response and energy efficiency of the transducer under varying operating conditions. The obtained results demonstrate a strong correlation between the developed models and the experimentally observed characteristics of ultrasonic piezoelectric elements, confirming their suitability for both analytical and applied investigations.

The proposed modeling approach allows for the evaluation of degradation effects, temperature drift, and noise influence on the long-term stability of signal conversion. The developed models can be applied in the design and optimization of analog front-end circuits for ultrasonic sensor systems, as well as in the development of self-diagnostic algorithms for adaptive signal conditioning and overall reliability improvement.

Keywords: ultrasonic piezoelectric transducer, modeling, equivalent circuit, signal path, analog front-end.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.11.2025
Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026
Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Захарчук Наталія, Гавловська Наталія

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У статті розглянуто питання підвищення достовірності та відтворюваності результатів в процесі моделювання сигнальних трактів сенсорних пристроїв на п'єзоелектричних перетворювачах. Це завдання має важливе наукове та практичне значення, оскільки неточність у відображенні параметрів п'єзоелементів призводить до похибок у розрахунках добротності, фазових характеристик і стабільності сигналу. Особливу складність становить узгодження параметрів п'єзоелектричного елемента з електронною частиною сигнального тракту, що включає підсилювачі, фільтри та комутаційні вузли. Дослідження спрямоване на розроблення та перевірку моделей, які забезпечують адекватне відтворення резонансних і перехідних процесів у сенсорних системах та підвищують точність їх параметричної оптимізації.

Аналіз досліджень та публікацій

Тематика моделювання сенсорних систем на основі ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів набула значного розвитку у сучасних наукових дослідженнях. Серед провідних напрямів слід відзначити роботи, присвячені створенню високочутливих вимірювальних трактів із компенсацією паразитних параметрів

[1], розробленню гнучких сенсорних структур для робототехнічних застосувань [2], систем самодіагностики [3], а також методам корекції міжканальних завад у масивах п'єзоелектричних сенсорів [4].

Незважаючи на різноманітність підходів, ключовою науковою проблемою залишається узгодження фізичної моделі п'єзоелектричного перетворювача з електронною частиною сигнального тракту, яка визначає точність, стабільність і добротність перетворення сигналів.

В останні роки значна увага приділяється поєднанню аналогових і цифрових модулів у межах програмованих систем на кристалі (Programmable System-on-Chip), які забезпечують реконфігурацію сигнальних трактів і реалізацію алгоритмів самодіагностики [5, 6]. Зокрема, у роботі [5] запропоновано архітектуру аналізу параметрів п'єзоелектричних сенсорів із вбудованими функціями контролю технічного стану, яка узгоджується з підходом до електричного моделювання сигнальних перетворювачів. У дослідженні [6] наведено макромодель п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю, яка дозволяє описати процеси резонансу, вплив активних і реактивних параметрів на якість перетворення енергії та стабільність частоти.

Подальший розвиток методів моделювання ультразвукових п'єзоелектричних структур спрямований на удосконалення аналітичного опису електромеханічних, термічних і шумових ефектів, створення універсальних бібліотек компонентів та оптимізацію параметрів сигнальних трактів сенсорних систем [7–8].

Таким чином, наявні наукові праці підтверджують актуальність і практичну значущість моделювання ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів для побудови точних і стабільних сигнальних трактів сенсорних пристроїв, що визначає основну ідею даної статті.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення та перевірка адекватності моделей ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів для використання у складі сигнальних трактів сенсорних пристроїв; дослідження впливу параметрів еквівалентних електричних схем заміщення на резонансні властивості, добротність і стабільність сигналу; визначення можливостей застосування розроблених моделей для аналізу температурного дрейфу, шумових процесів і деградаційних явищ у сенсорних системах, а також для подальшої оптимізації їх аналогових фронт-ендів.

Виклад основного матеріалу

Функціональність і точність вимірювального перетворення сенсорних пристроїв значною мірою визначаються мікроелектронними компонентами та сигнальними трактами мікросхемотехніки, які забезпечують взаємодію між фізичним (аналоговим) та цифровим середовищами. Такі структури утворюють аналоговий фронт-енд (AFE, Analog Front-End), який перетворює сигнали від первинного сенсора до рівня, придатного для цифрової обробки.

У типовій архітектурі аналогового фронт-енду формуються сенсорні елементи, що реагують на зміни фізичних, хімічних або біологічних параметрів середовища, генератори задавальних імпульсів, які створюють керуючі сигнали для актуаторів, а також підсилювальні каскади на базі операційних підсилювачів із програмованим коефіцієнтом підсилення. До складу AFE також входять стабілізатори живлення, формувачі опорних напруг, фільтри, інтегратори, компаратори, трансїмпедансні підсилювачі та схеми формування часових інтервалів, що визначають часову синхронізацію усіх процесів вимірювання. Усі ці вузли функціонально поєднані в єдиний сигнальний тракт, який перетворює слабкі аналогові сигнали в електричну форму, стійку до завад та придатну для аналізу цифровими засобами.

Особливий інтерес викликають сенсорні системи, побудовані на п'єзоелектричних перетворювачах, які поєднують властивості сенсора і актуатора. У таких пристроях інформативний сигнал формується за принципом вимірювання часу прольоту ультразвукових коливань (Time-of-Flight, ToF) у досліджуваному середовищі. Вимірювана затримка між випроміненим та прийнятим імпульсами відображає зміни фізичних параметрів середовища або геометричних характеристик об'єкта.

У загальному випадку вимірювальна система може містити один, два або більше п'єзоелектричних елементів, що працюють у режимах випромінювання, прийому або їх комбінації. Крім часових параметрів, інформативними можуть бути амплітудна й фазова модуляції сигналів, які виникають внаслідок взаємодії ультразвукових хвиль з об'єктом спостереження.

Порівняння типових архітектур сенсорних систем на п'єзоелектричних перетворювачах (S1, S2, S3), що різняться принципом збудження, типом обробки сигналу та конфігурацією електронного фронт-енду, подано на рис. 1. Показані конфігурації сенсорних систем демонструють різні підходи до організації процесу вимірювання.

У системі S1 функції випромінювання та приймання імпульсів ультразвукових коливань (Ultrasound Pulse, UP) виконує один п'єзоелектричний перетворювач A&S (Actuator & Sensor). Вимірюваний параметр визначається часовою затримкою Δt між моментом випромінювання імпульсу та прийняттям відбитого від об'єкта ОВ ехо-сигналу. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість елементів, однак має обмеження щодо діапазону й точності вимірювання, оскільки перетворювач потребує певного часу на релаксацію після випромінювання сигналу.

Більш поширеним рішенням є система S2, у якій використовуються два незалежні п'єзоелектричні перетворювачі - один для випромінювання (A), інший - для приймання (S). Це усуває часові накладання між імпульсами, забезпечує кращу роздільну здатність та розширює вимірювальний діапазон.

Третій варіант, S3, представляє систему неперервної дії, де інформативним параметром є модуляція

амплітуди та фази ультразвукової хвилі (UPM), що поширюється в досліджуваному просторі (Surround Propagation, SP). Такі системи не вимірюють відстань безпосередньо, а реєструють зміни характеристик середовища - наприклад, появу сторонніх об'єктів або коливання фізичних параметрів, що робить їх придатними для задач охоронної та технологічної сигналізації.

Основними параметрами, які визначають ефективність роботи вимірювальних систем на п'єзоелектричних перетворювачах, є частота, амплітуда та фаза ультразвукових коливань. Через значну тривалість поширення хвиль у просторі фазові методи аналізу не завжди дають стабільні результати, тому найчастіше інформативною величиною виступає часова затримка імпульсу, отриманого після взаємодії з об'єктом або середовищем.

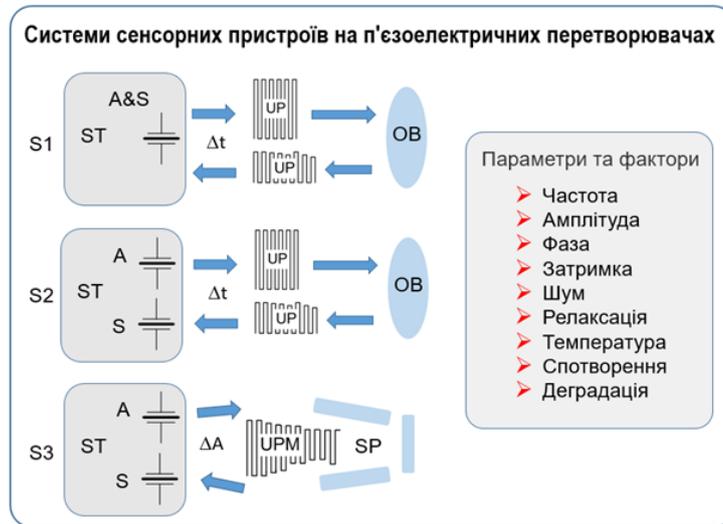


Рис. 1. Системи та параметри сенсорних пристроїв на п'єзоелектричних ультразвукових перетворювачах

Проблема нестабільності функціонування особливо актуальна для сенсорів, що працюють в агресивних середовищах, а також для плівкових і органічних п'єзоелектричних структур або фазованих решіток, де навіть незначні зовнішні зміни спричиняють помітний дрейф параметрів. Характерні осцилограми сигналів, отриманих під час моделювання процесів вимірювального перетворення в сенсорних системах на п'єзоелектричних перетворювачах, подано на рис. 2 а.

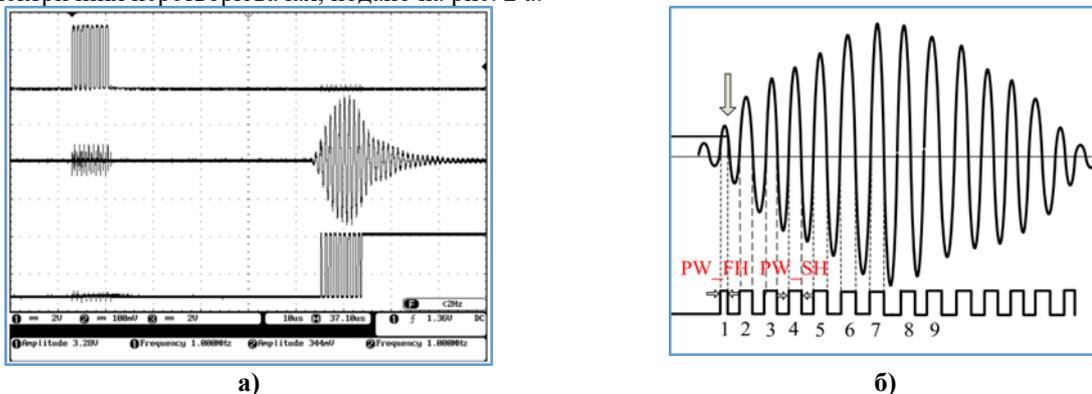


Рис. 2. Сигнали п'єзоелектричного перетворювача: а) – осцилограма; б) - аналіз форми імпульсу

Під час випромінювання електричний імпульс, сформований генератором у сигнальному тракті, перетворюється п'єзоелектричним елементом в ультразвукове коливання, що поширюється у досліджуваному середовищі. Після взаємодії з об'єктом відбитий сигнал повертається до приймача, де відбувається його зворотне перетворення в електричний імпульс. Порівняння часових параметрів випроміненого та прийнятого сигналів дозволяє визначити затримку Δt , а отже – і вимірювану відстань або зміну характеристик середовища.

Аналіз форми імпульсу (рис. 2. б) дає змогу оцінити ефекти релаксації, відлуння, спотворення та затухання, що зумовлюють похибки вимірювання. Саме ці параметри надалі враховуються при побудові SPICE-моделей сигнальних трактів, які відтворюють поведінку п'єзоелектричного перетворювача в електричному еквіваленті. Додаткове моделювання часових залежностей дозволяє простежити взаємозв'язок між формою імпульсу та стабільністю амплітудно-частотних характеристик системи.

SPICE-моделювання сигнальних трактів п'єзоелектричних сенсорів

Серед сучасних систем комп'ютеризованого моделювання SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) є найпоширенішим інструментом для аналізу аналогових і змішаних схем. Програми PSPICE, LTSPICE та MicroCap забезпечують можливість параметричного варіювання компонентів, аналізу амплітудно-

частотних і часових характеристик, а також дослідження режимів перехідних процесів.

Для п'єзоелектричних сенсорів використовуються спеціалізовані SPICE-макромоделі типу XTAL (Crystal Macro), що відтворюють взаємозв'язок електричного та механічного контурів. Розрізняють два основні підходи до побудови таких моделей.

Перший - параметричний, коли всі властивості елемента описуються виробником і використовуються безпосередньо у симуляції. але мало придатні для досліджень, наприклад, впливу деградаційних змін або температурних варіацій.

Другий - еквівалентно-схемний, у якому п'єзоелектричний елемент представляється електричним колом, що містить активні та реактивні компоненти, еквівалентні його резонансним характеристикам (рис. 3. а).

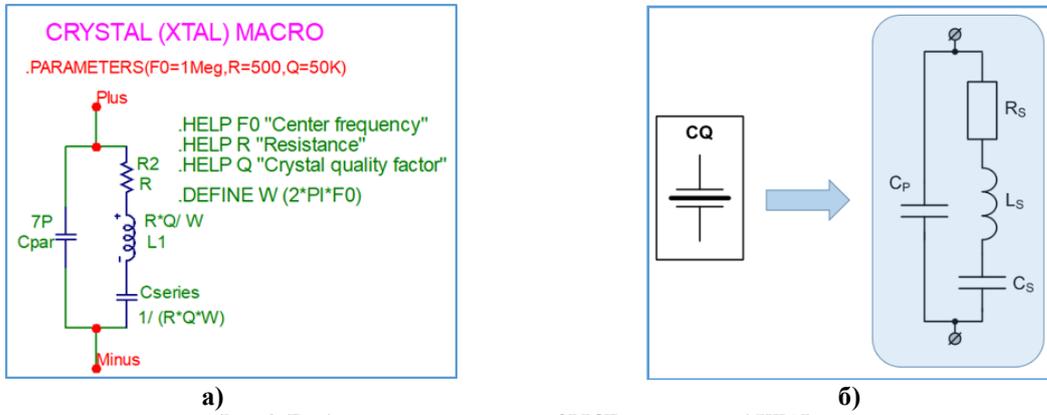


Рис. 3. Еквівалентно-схемний тип SPICE-макромоделі XTAL: а) – схема заміщення; б) – адаптована схема для досліджень

Уніфікована схема заміщення (рис. 3. б) містить послідовно з'єднані елементи - ланку послідовно з'єднаних резистора R_s , індуктивності L_s та конденсатора C_s , що характеризує ефект п'єзоелектричного резонансу, а саме власну резонансну частоту F_0 та добротність Q . Крім того в схему заміщення введено конденсатор C_p , що характеризує електричну ємність базової структури п'єзоелектричних перетворювачів «метал-діелектрик (п'єзоелектрик)-метал». Основні параметри макромоделі визначаються системою співвідношень:

$$\begin{cases} R_s = R_0 \\ L_s = \frac{R_0 \cdot Q}{2\pi \cdot F_0} \\ C_s = \frac{1}{2\pi \cdot F_0 \cdot R_0 \cdot Q} \end{cases}, \quad (1)$$

де F_0 - власна резонансна частота, R_0 - активний опір втрат, Q - добротність.

Розрахунок цих параметрів дозволяє визначити реактивні властивості п'єзоелектричного елемента, ширину смуги пропускання, фазові співвідношення та частотну стабільність. Типові приклади розрахунків, виконаних для робочих частот 40 кГц та 100 кГц, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Приклади розрахунку параметрів схеми заміщення XTAL

Задано			Розрахунок	
F_0	R_0	Q	C_s	L_s
4.00E+04	10	1.00E+03	3.98E-10	3.98E-02
4.00E+04	10	1.00E+04	3.98E-11	3.98E-01
4.00E+04	100	1.00E+04	3.98E-12	3.98E+00
1.00E+06	10	1.00E+03	1.59E-11	1.59E-03
1.00E+06	10	1.00E+04	1.59E-12	1.59E-02
1.00E+06	100	1.00E+04	1.59E-13	1.59E-01
4.00E+04	10	1.00E+03	3.98E-10	3.98E-02
4.00E+04	10	1.00E+04	3.98E-11	3.98E-01
4.00E+04	100	1.00E+04	3.98E-12	3.98E+00
1.00E+06	10	1.00E+03	1.59E-11	1.59E-03

Результати частотного аналізу (рис. 4 та рис. 5) демонструють характерні риси п'єзорезонансу: різке зростання амплітуди поблизу F_0 , зміну фази на π у точці резонансу та залежність ширини спектра від добротності. Варіювання параметрів $C_s = (1 \cdot 10^{-14} \dots 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ф})$ та $C_p = (1 \cdot 10^{-14} \dots 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ф})$ дало змогу провести параметричну ідентифікацію елементів еквівалентної схеми, на основі чого сформовано уточнену SPICE-

модель XTAL-tail із підвищеною чутливістю до змін реактивних компонентів.

У часовій області результати моделювання відображають динаміку перехідних процесів: коливальні затухання, автоколивання й фазові зсуви між струмом та напругою (рис. 6). Ці характеристики безпосередньо визначають стабільність роботи сенсорного тракту, енергетичну ефективність перетворення та схильність до паразитних резонансів.

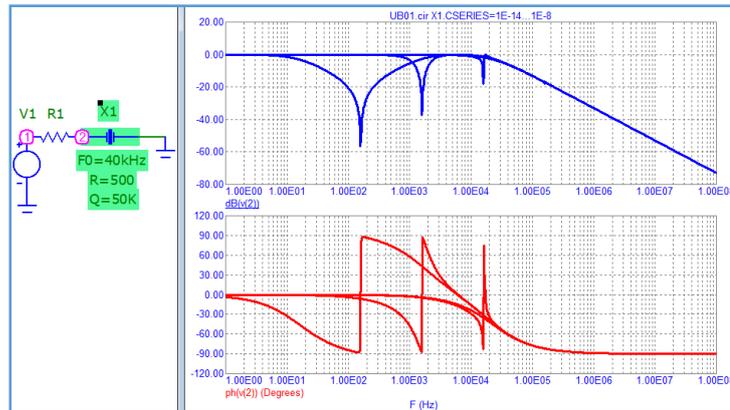


Рис. 4. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) при X1.CSERIES=1E-14...1E-8

Детальний аналіз часових залежностей дозволив виявити перехідні режими, у яких відбувається накопичення енергії в реактивних елементах, що впливає на амплітудно-фазові співвідношення сигналів. Встановлено, що зміна параметрів індуктивності або ємності призводить до зміщення резонансної частоти та збільшення часу встановлення стаціонарного режиму. Такі дані є важливими для вибору оптимальних умов роботи сенсорної системи та забезпечення її температурної і частотної стабільності.

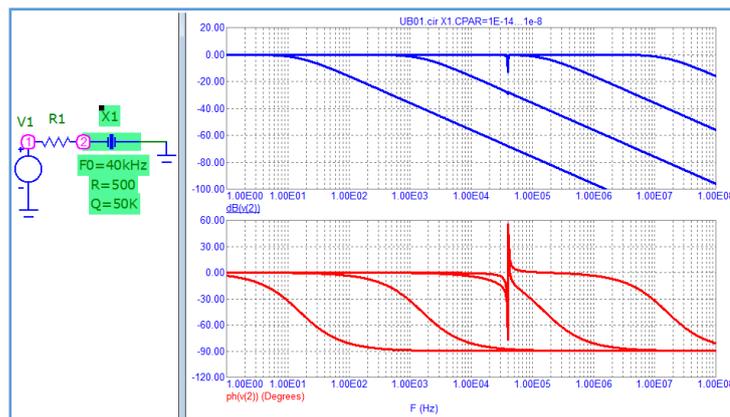


Рис. 5. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) при X1.CPAR=1E-14...1E-8

Таким чином, створена SPICE-модель дозволяє не лише відтворювати резонансні властивості п'єзоелектричного перетворювача, а й визначати основні експлуатаційні характеристики сенсорних систем - добротність, фазову лінійність, стабільність частоти та часові константи релаксації. Ці результати слугують базою для подальшого аналізу впливу шумів, температурного й часово-залежного дрейфу, який складає основу вбудованих систем самодіагностики.

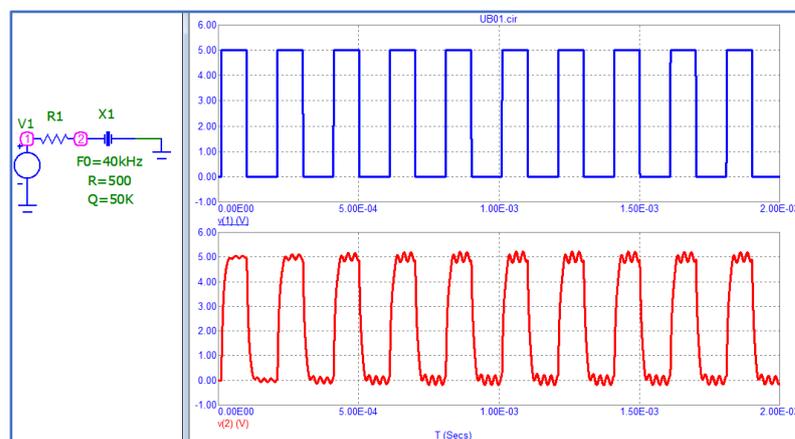


Рис. 6. Схема та результат дослідження перехідних (Transient) процесів

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У результаті моделювання ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів, що застосовуються у сигнальних трактах сенсорних пристроїв, розроблено моделі, які адекватно відтворюють електромеханічні процеси, властиві п'єзорезонансним структурам. Встановлено вплив параметрів еквівалентної схеми заміщення - активного опору, індуктивності, власної та паразитної ємностей - на резонансні характеристики й стабільність сигналу. Показано, що зменшення паразитної ємності підвищує добротність і знижує фазові спотворення, тоді як збільшення власної ємності призводить до звуження резонансної смуги. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем ультразвукової діагностики та структурного моніторингу матеріалів, де необхідна висока стабільність і точність перетворення сигналів.

Література

1. Reverter F. Analysis of Switched-Capacitor and Charge Amplifier Circuits for Piezoelectric Sensors / F. Reverter // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 331. – P. 112983. – DOI: 10.1016/j.sna.2021.112983.
2. Tian Y. Modeling and analysis of ultrasonic piezoelectric transducers using equivalent circuit approach / Y. Tian, H. S. Kim, H. S. Lee // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 331. – P. 112957. – DOI: 10.1016/j.sna.2021.112957.
3. Голяка Р. Вбудована система ультразвукових п'єзоелектричних сенсорів з функцією самодіагностики / Р. Голяка, М. Брич, О. Адам'як, Ю. Шлюсар, Н. Барило // *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. – 2024. – Вип. 4, № 2. – С. 151–161. – DOI: 10.23939/ict2024.02.151.
4. Vladimirov V. SPICE-Based Simulation of Piezoelectric Resonators / V. Vladimirov // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 2022. – Vol. 69 (8). – P. 2408–2416. – DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3179028.
5. Барило Г. І. Застосування програмованих систем на кристалі для аналізу параметрів сигналів п'єзоелектричних сенсорів з вбудованою самодіагностикою / Г. І. Барило, М. В. Брич, Ю. А. Шлюсар, А. В. Зварич, Т. Б. Колодій // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2025. – Вип. 3 (152). – С. 226–232. – DOI: 10.32782/1995-0519.2025.3.33.
6. Барило Г. І. Макромодель п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю / Г. І. Барило, М. В. Брич, Ю. А. Шлюсар, І. Б. Живицький, Г. В. Бойкачов, С. О. Пришляк // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. – 2025. – № 2 (1). – С. 370–377. – DOI: 10.32782/2663-5941/2025.2.1/47.
7. Барило Г. І. Алгоритм моделювання сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорних пристроїв / Г. І. Барило, М. В. Павленко, О. А. Адам'як, О. А. Никон, В. І. Сорока // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2024. – № 6, т. 1 (343). – С. 23–30. – DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-3.
8. Zhao X. Equivalent circuit modeling and performance optimization of piezoelectric ultrasonic transducers / X. Zhao, J. Wang, Y. Li // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – Vol. 22 (18). – P. 17745–17753. – DOI: 10.1109/JSEN.2022.3198457.

References

1. Reverter F. Analysis of Switched-Capacitor and Charge Amplifier Circuits for Piezoelectric Sensors / F. Reverter // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 331. – P. 112983. – DOI: 10.1016/j.sna.2021.112983.
2. Tian Y. Modeling and analysis of ultrasonic piezoelectric transducers using equivalent circuit approach / Y. Tian, H. S. Kim, H. S. Lee // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 331. – P. 112957. – DOI: 10.1016/j.sna.2021.112957.
3. Holiaka R. Vbudovana sistema ultrazvukovykh piezoelektrychnykh sensoriv z funktsiieiu samodiagnostyky / R. Holiaka, M. Brych, O. Adam'yak, Yu. Shliusar, N. Barylo // *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*. – 2024. – Issue 4, No. 2. – P. 151–161. – DOI: 10.23939/ict2024.02.151.
4. Vladimirov V. SPICE-Based Simulation of Piezoelectric Resonators / V. Vladimirov // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. – 2022. – Vol. 69 (8). – P. 2408–2416. – DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3179028.
5. Barylo H. I. Application of programmable systems-on-chip for analyzing the signal parameters of piezoelectric sensors with embedded self-diagnostics / H. I. Barylo, M. V. Brych, Yu. A. Shliusar, A. V. Zvarych, T. B. Kolodii // *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. – 2025. – Issue 3 (152). – P. 226–232.
6. Barylo H. I. Macromodel of a piezoelectric transducer with extended functionality / H. I. Barylo, M. V. Brych, Yu. A. Shliusar, I. B. Zhyvtskyi, H. V. Boikachov, S. O. Pryshliak // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. – 2025. – No. 2 (1). – P. 370–377. – DOI: 10.32782/2663-5941/2025.2.1/47.
7. Barylo H. I. Algorithm for modeling impedance signal converters for sensor devices / H. I. Barylo, M. V. Pavlenko, O. A. Adam'yak, O. A. Nykon, V. I. Soroka // *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. – 2024. – No. 6, Vol. 1 (343). – P. 23–30. – DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-3.
8. Zhao X. Equivalent circuit modeling and performance optimization of piezoelectric ultrasonic transducers / X. Zhao, J. Wang, Y. Li // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – Vol. 22 (18). – P. 17745–17753. – DOI: 10.1109/JSEN.2022.3198457.