

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/47>**Барило Г. І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Брич М. В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Шлюсар Ю. А.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Живицький І. Б.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Бойкачов Г. В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Пришляк С. О.**

Національний університет «Львівська політехніка»

### МАКРОМОДЕЛЬ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З РОЗШИРЕНОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЮ

У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти побудови схемотехнічних макромодель п'єзоелектричних перетворювачів, які широко використовуються у сенсорних пристроях для задач ультразвукової діагностики, контролю середовища, безконтактного вимірювання та систем структурного моніторингу. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку сенсорних технологій, що базуються на п'єзоелектричних елементах, і виділено основні фактори дестабілізації їх функціонування: температурні флуктуації, часову деградацію, релаксаційні процеси, зволоження, механічні впливи, радіаційне навантаження, а також широкий спектр шумових завад, які ускладнюють точну інтерпретацію результатів. Показано, що класичні SPICE-моделі, зокрема ті, які побудовані на основі ідеалізованих параметрів резонансних контурів, не забезпечують належної адекватності у моделюванні реального функціонування сенсорів в умовах довготривалого навантаження та складного середовища. Запропоновано нову SPICE-сумісну макромодель п'єзоелектричного перетворювача *Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel*, яка враховує вплив зовнішніх і внутрішніх чинників на процес формування вимірювального сигналу. Структурно модель містить два функціональні блоки: *Signal Formation Unit*, який моделює процеси спотворення, амплітудної модуляції, релаксації, температурного дрейфу, шумів і затримок; та *Equivalent Circuit Unit*, що відтворює резонансні властивості перетворювача, зокрема добротність, внутрішню ємність і частотну характеристику. У моделі використано вбудовані компоненти сучасних SPICE-систем: *Amplitude Modulator Macro*, *Noise Source Macro*, *Delay T*, температурні коефіцієнти *TC1*, *TC2*, *TCE*, а також універсальне джерело струму *NFI* з формульною специфікацією. Це дозволяє реалізувати точне й адаптивне моделювання фізичних процесів, які відбуваються при поширенні та реєстрації ультразвукових хвиль у складних умовах. Результати дослідження можуть бути використані при створенні надійних сенсорних систем для роботи в агресивному середовищі, систем охоронного призначення, автономних вимірювальних пристроїв з функціями самодіагностики, а також у галузях біомедичних технологій, промислової автоматизації та екологічного моніторингу.

**Ключові слова:** п'єзоелектричний перетворювач, сенсорні пристрої, SPICE, макромодель, модуляція, температурна нестабільність.

**Постановка проблеми.** П'єзоелектричні перетворювачі є ключовими елементами сучасних сенсорних систем, що застосовуються в ультразвуковій діагностиці, моніторингу об'єктів, безконтактному вимірюванні та контролі параметрів середовища. Їх функціональність значною мірою залежить від точності, стабільності та достовірності перетворення фізичних величин у вимірювані електричні сигнали. Однак такі структури є чутливими до зовнішніх дестабілізуючих чинників – температурних коливань, вологості, вібрацій, електромагнітних завад і процесів старіння. Ці впливи не лише знижують точність перетворення, а й ускладнюють довготривале використання сенсорів у складних умовах.

У процесі побудови перетворювачів ефективним засобом дослідження їх властивостей є схемотехнічне моделювання, яке дозволяє відтворити роботу сенсорних елементів з урахуванням реальних умов експлуатації. Зокрема, моделі мають враховувати вплив зовнішнього середовища на параметри сигналу та функціональні характеристики пристрою. Існуючі SPICE-моделі здебільшого описують ідеалізовані умови, що обмежує їх застосування у практиці. Тому актуальним є створення універсальної схемотехнічної макромоделі, здатної імітувати дестабілізуючі фактори, зокрема температурний та часовий дрейф, релаксаційні ефекти, шуми й деградаційні процеси, для забезпечення верифікації та оптимізації сенсорних систем з п'єзоелектричними елементами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючий інтерес до моделювання п'єзоелектричних сенсорів, що поєднують традиційні функції перетворення сигналу з розширеними можливостями – самодіагностикою, адаптацією до змін зовнішнього середовища, підвищеною стабільністю та енергоефективністю. Зокрема, у роботах [1–4] розглянуто підходи до побудови моделей, здатних відтворювати складну динаміку електромеханічного зворотного зв'язку в п'єзоструктурах, з урахуванням нелінійності, температурного дрейфу та механічних впливів.

У дослідженнях [5–7] увагу зосереджено на реалізації самодіагностичних функцій у сенсорних вузлах, зокрема через моніторинг імпедансних характеристик, використання діагностичних сигналів та алгоритмів виявлення відмов. Водночас автори робіт [8–10] наголошують на необхідності інтеграції таких моделей у цифрові сенсорні системи з обмеженими ресурсами, що зумов-

лює актуальність схемотехнічних макромоделей з мінімальною обчислювальною складністю.

У власних роботах [11, 12] авторами обґрунтовано підходи до моделювання та схемотехнічної реалізації імпедансних перетворювачів для сенсорних пристроїв, що враховують комплексний вплив дестабілізуючих чинників, а також запропоновано двомодовий драйвер для п'єзоелектричних випромінювачів. Зазначені результати стали основою для побудови нової макромоделі з розширеною функціональністю.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення схемотехнічної SPICE-макромоделі п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю, яка забезпечує можливість врахування дестабілізуючих впливів та реалізацію вбудованої самодіагностики в сенсорних пристроях.

**Виклад основного матеріалу.** Основою більшості задач, пов'язаних із дослідженням, системно-параметричним аналізом та оптимізацією схем сигнальних трактів, є побудова відповідних математичних моделей. На сьогодні найбільш поширеним інструментом комп'ютерного моделювання електронних схем є програмні платформи сімейства SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), зокрема PSpice, LTspice, Micro-Cap та інші.

З огляду на системно-параметричний аналіз сенсорних пристроїв, принципово важливим є забезпечення узгодженості моделювання як первинних перетворювачів (чутливих елементів сенсорів), так і сигнальних трактів, що реалізують широкий спектр вимірювальних функцій.

У сучасних реалізаціях SPICE-систем уже реалізовано бібліотеки моделей окремих типів первинних перетворювачів, зокрема терморезисторів, фотодіодів, сенсорів магнітного поля на основі ефекту Холла тощо. У контексті тематики даного дослідження особливу увагу приділено розробці спеціалізованих SPICE-макромоделей п'єзоелектричних перетворювачів, зокрема типу XTAL (Crystal Macro).

Типова схема заміщення XTAL такої макромоделі (рис. 1) містить 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».

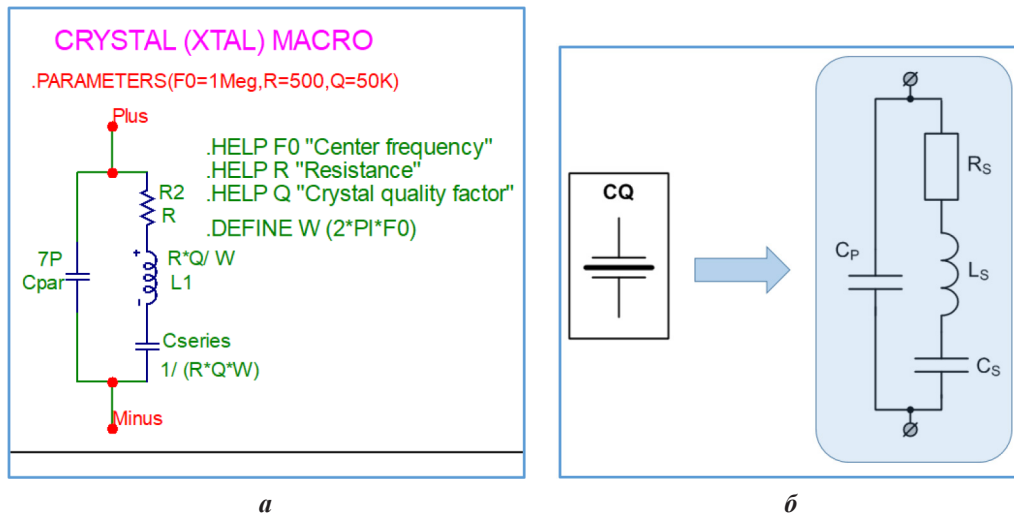


Рис. 1. Макромодель XTAL SPICE: а – схема заміщення; б – еквівалентна схема

Разом із тим, вирішення задач, поставлених у межах даної роботи, вимагає аналізу більш глибоких фізичних процесів, що відбуваються в сенсорних системах на основі п'єзоелектричних перетворювачів. Це, зокрема, обумовлено наявністю низки дестабілізуючих факторів, серед яких – температурний і часовий дрейф, шуми, старіння матеріалів та інші джерела впливу.

Відповідно до сформульованих вимог здійснено синтез схеми заміщення SPICE-моделі з розширеною функціональністю, яка забезпечує можливість урахування комплексу дестабілізуючих чинників, що впливають на процес формування сигналів у сенсорних системах.

Розроблена SPICE-макромодель (рис. 2) п'єзоелектричного перетворювача (Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel) включає два основні функціональні блоки:

- блок формування сигналу (Signal Formation Unit), який відповідає за моделювання факторів спотворення та деградації сигналу (Distortion & Degradation) на основі розширеного набору впливів;
- еквівалентну схему (Equivalent Circuit Unit), яка відтворює базові параметри – резонансну частоту та добротність (Frequency & Q-Factor) – з використанням схеми заміщення п'єзоелектричних перетворювачів, поданої на рис. 1.

Першим із набору впливів у блоці формування сигналу є амплітуда (Amplitude) сигналу. Її зміна (модуляція) зумовлена характеристиками п'єзоелектричних перетворювачів, які виконують функції випромінювання та приймання імпульсів ультразвукових коливань у ланцюжку перетворення «електричний струм → ультразвукове коливання → електричний струм». Додатково враховуються параметри затухання сигналу, які

виникають у процесі поширення ультразвукових хвиль у середовищі та при їх відбитті від об'єктів у цьому середовищі.

Для модельного представлення процесу амплітудної модуляції в розробленій SPICE-макромоделі використано вбудований бібліотечний функціональний компонент сучасних версій SPICE – Amplitude Modulator Macro (AM), який виконує гармонічну модуляцію несучого сигналу.

Основними параметрами цього бібліотечного елемента є (рис. 3):

- FS (Frequency of the carrier signal) – частота несучого сигналу;
- VPEAK (Magnitude of the carrier signal) – амплітуда несучого сигналу;

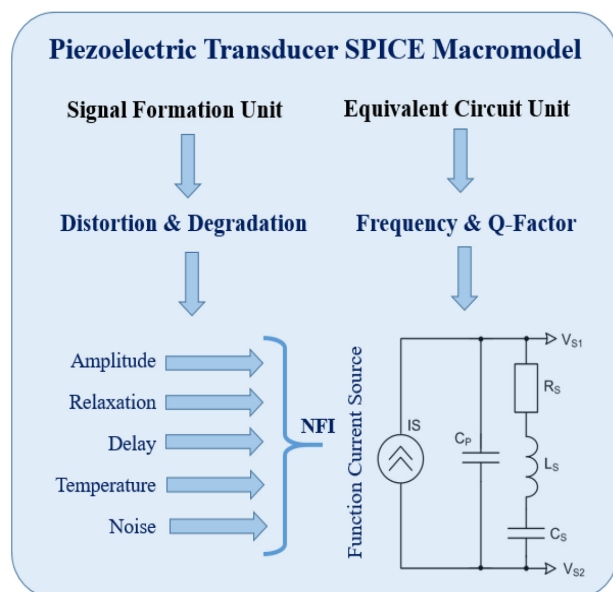


Рис. 2. Структура SPICE моделі п'єзоелектричних перетворювачів з розширеною функціональністю

- MODINDEX (Modulation index) – індекс модуляції;
- Type modulation – тип модуляції: SM (sine modulation) або CM (cosine modulation).

На вхід модулятора АМ подається сигнал, параметри якого визначають інформативне складову модуляції. Такий підхід дозволяє імітувати зміни, що зумовлені зовнішніми фізичними впливами на сенсорну систему.

Приклад результатів формування амплітудно-модульованих сигналів для двох типів модуляції (макромодель XU1) наведено на рис. 4.

Другим важливим фактором є релаксація (Relaxation), яка визначає динаміку наростання та спаду сигналу. У середовищі SPICE доцільно представляти процес релаксації за допомогою інтегрувальної RC-ланки, характеристичний час якої визначає час встановлення сигналу у п'єзоелектричному перетворювачі.

У межах такого підходу напруга на інтегрувальному конденсаторі використовується як керуючий сигнал для згаданого вище амплітудного модулятора. Приклад формування сигналу з вико-

ристанням поєднання інтегрувальної ланки ( $Rq$ ,  $Cq$ ) та модулятора (XU1) наведено на рис. 5.

Третій фактор – затримка (Delay) поширення ультразвукового коливання в середовищі ToF (Time-of-Flight) може бути представленою модельним SPICE компонентом Delay DT. Результати моделювання затримки на основі наведеного компоненту Delay DT представлено на рис. 6.

Четвертим впливовим фактором є температура (Temperature) та її вплив на параметри сигнального тракту. У середовищі SPICE цей вплив моделюється за допомогою стандартних температурних коефіцієнтів, зокрема:

- TC1 – лінійний температурний коефіцієнт,
- TC2 – квадратичний температурний коефіцієнт,
- TCE – експоненціальний температурний коефіцієнт.

Для виконання температурного аналізу застосовується режим DC ANALYSIS / TEMP, у межах якого можна дослідити зміну параметрів електронних компонентів залежно від температури.

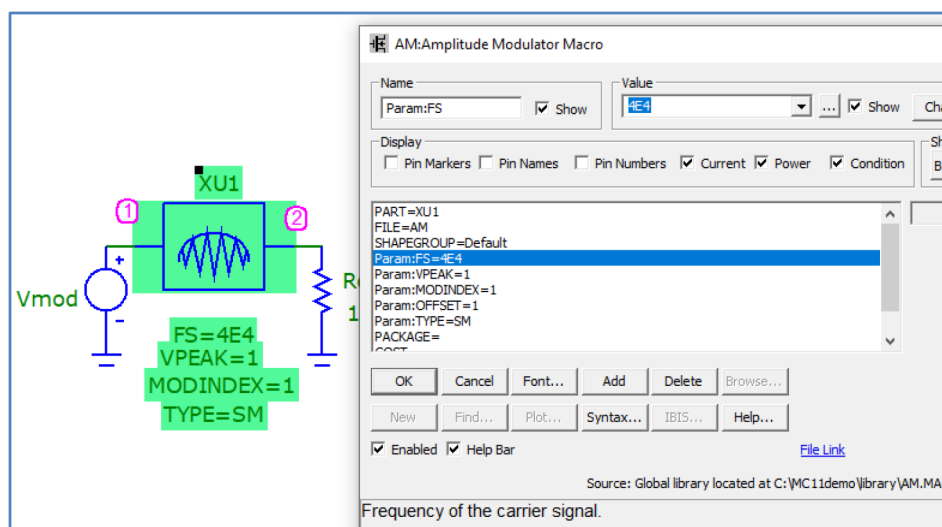


Рис. 3. Специфікація компоненту Amplitude Modulator Macro

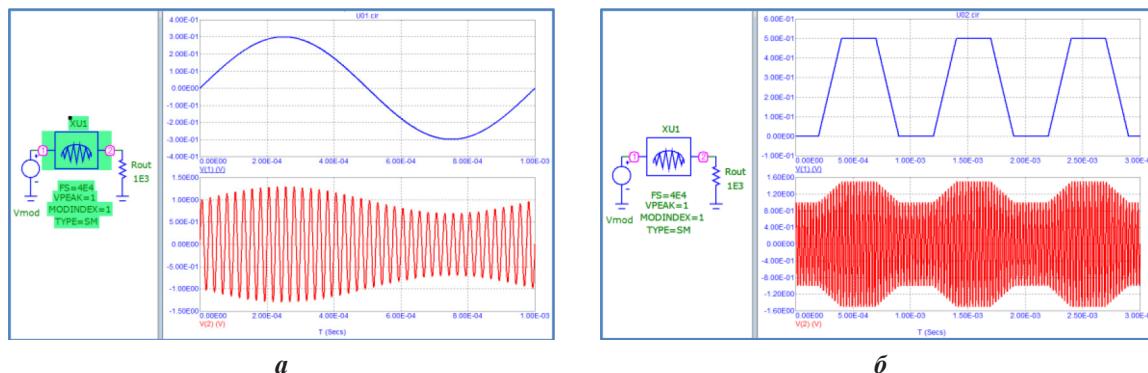


Рис. 4. Результат формування АМ сигналу: а – синусоїдального; б – трапецієподібного

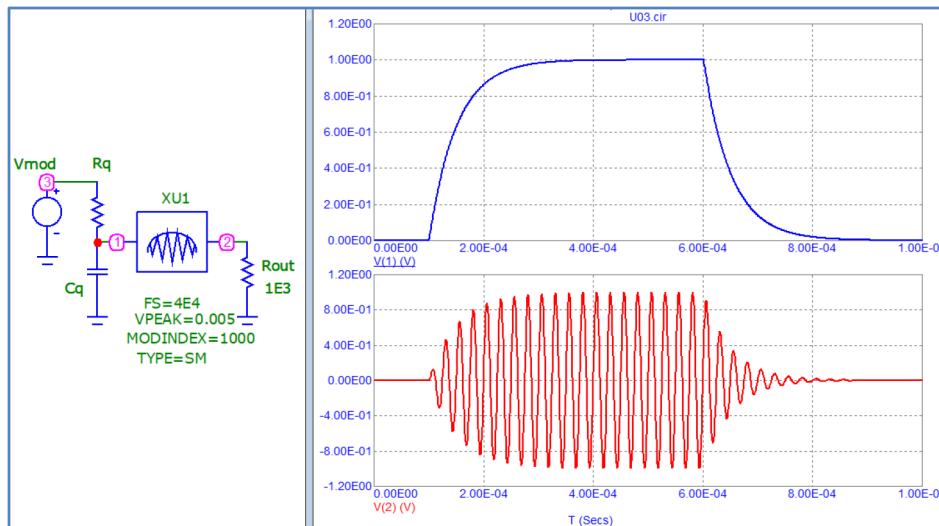


Рис. 5. Результат формування сигналу з врахуванням релаксації

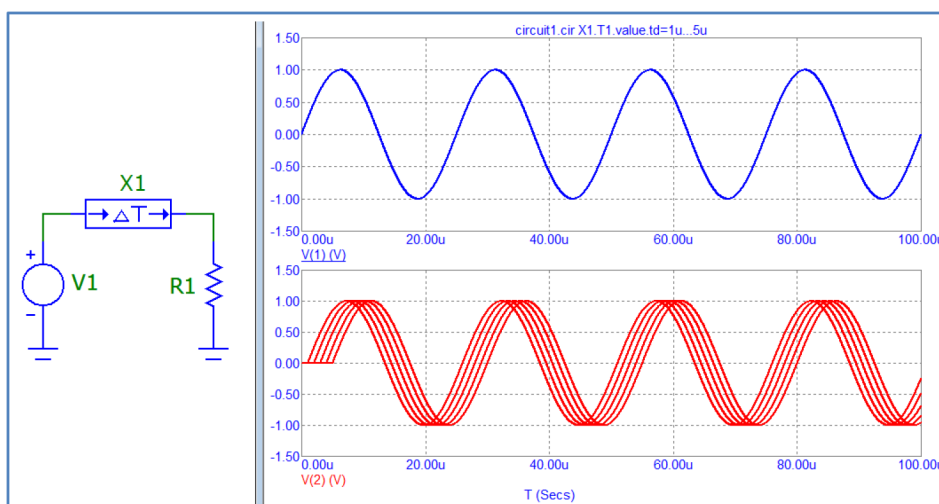


Рис. 6. Результат формування сигналу з компонентом Delay DT

Приклад результатів моделювання для елементарного резистивного компоненту наведено на рис. 7.

П'ятим фактором є шум (Noise), який моделюється за допомогою макромоделі джерела шуму – Noise Source Macro. Основними параметрами цього компоненту є:

- TS – часові характеристики,
- VS – амплітуда напруги білого шуму (white noise).

Залежно від необхідної глибини аналізу шумових складових у сигнальних колах, кількість джерел шуму у схемі може змінюватися: від одного (для елементарного випадку) до довільної кількості, що дозволяє моделювати кольоровий шум (colored noise). Вікно параметрів цієї моделі наведено на рис. 8.

Зв'язок між компонентами модуля Signal Formation Unit (який відповідає за моделювання

спотворень і деградації сигналу – Distortion & Degradation) та Equivalent Circuit Unit (який формує базові параметри – Frequency & Q-Factor) реалізується за допомогою функціонального джерела струму формульного типу – NFI (Function Formula Type Current Source). Вікно параметрів цього джерела наведено на рис. 9.

Цей тип джерела характеризується високою універсальністю та адаптивністю у задачах моделювання складних сенсорних систем. Його використання дозволяє ефективно поєднувати електронні компоненти в межах SPICE-моделі, де перехідні процеси описуються математичним апаратом, заснованим на законах Кірхгофа.

Формування сигналу у входних колах сенсорів здійснюється на основі функціонального зв'язку між фізичними процесами в оточуючому середовищі (у даному випадку – процесами поширення ультразвукових коливань) та електричними про-



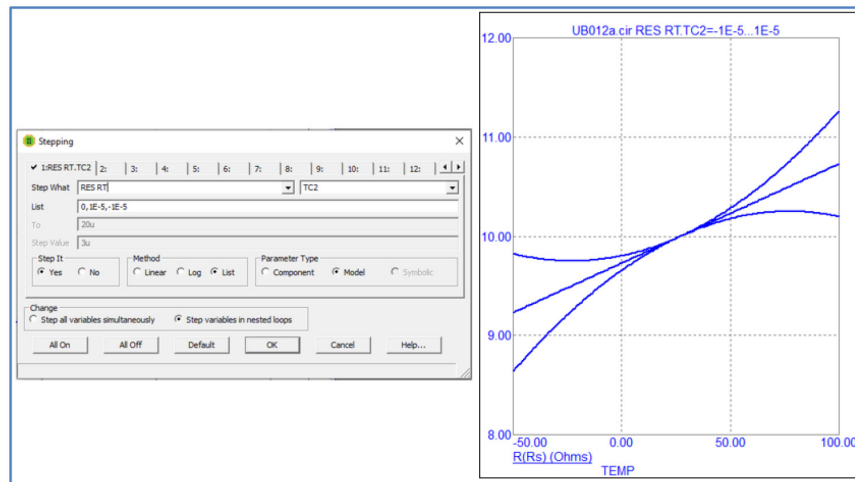


Рис. 7. Специфікація та результат моделювання при температурному аналізі

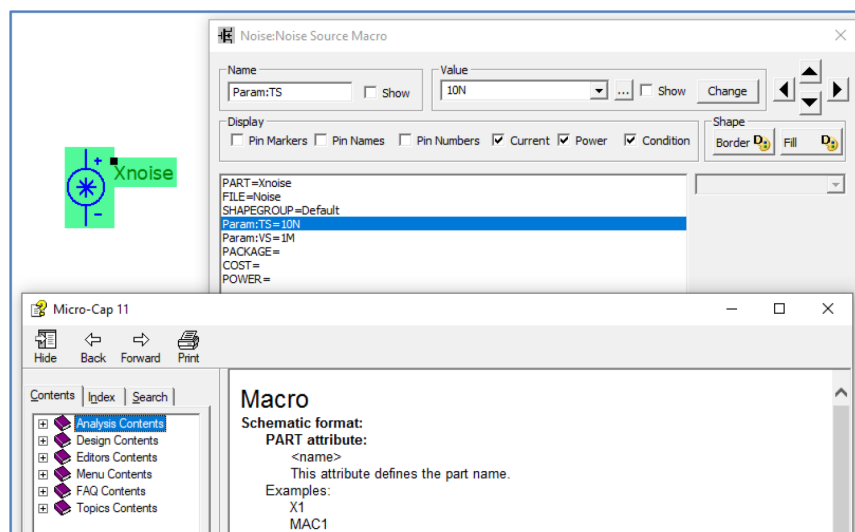


Рис. 8. Вікно специфікації джерела шуму Noise Source Macro

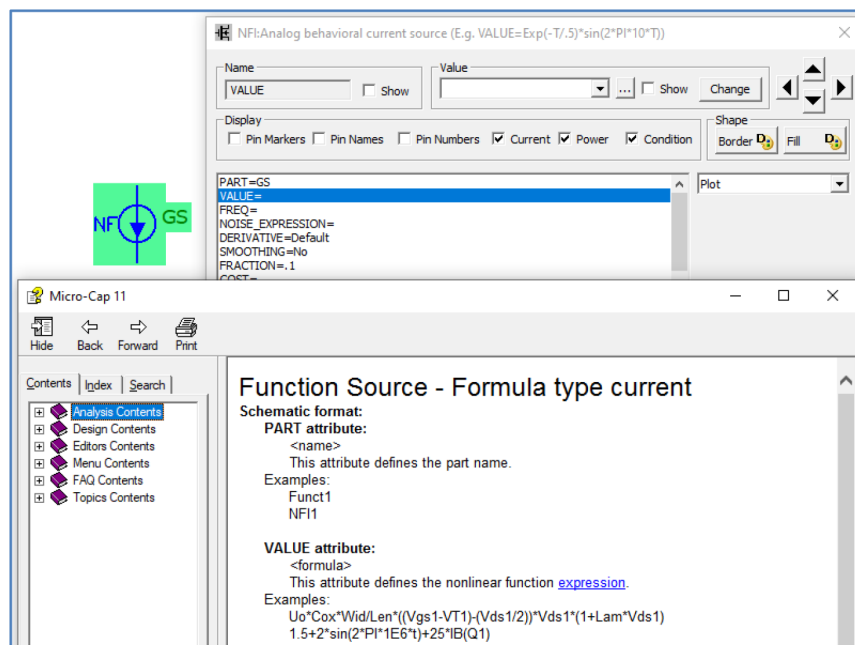


Рис. 9. Вікно специфікації джерела NFI

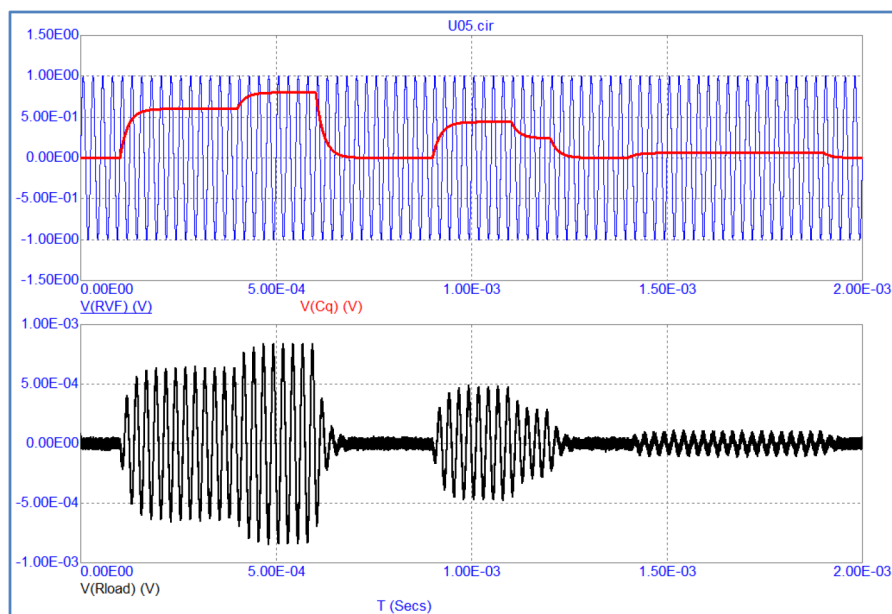


Рис. 10. Приклад варіанту синтезу сигналів з ефектом відбиття

цесами в сигнальних трактах аналогового фронтенду сенсорного пристрою.

Новизна запропонованого підходу до формування зв'язку між компонентами блоку формування сигналів та блоку еквівалентної схеми полягає у використанні передавальної функції типу  $V \rightarrow I \rightarrow V$  («напруга  $\rightarrow$  струм  $\rightarrow$  напруга»). Такий підхід передбачає перехід від інформативних параметрів, представлених у вигляді напруги, до проміжного струмового представлення, що дозволяє здійснити передавання інформації зі схеми блоку формування сигналів до блоку еквівалентної схеми без порушення резонансних властивостей п'єзoeлектричного перетворювача.

Застосування даної макромоделі дозволяє проводити комплексні дослідження, результати яких використовуються для параметричної оптимізації структурних елементів сигнальних перетворювачів. Приклад такого моделювання в процесі дослідження відбиття ультразвукових хвиль, представлено на рис. 10.

**Висновки.** У даному дослідженні сформульовані базові підходи синтезу SPICE макромоделі (Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel) сигнальних трактів п'єзoeлектричних перетворювачів з врахуванням факторів дестабілізуючих процесів формування їх сигналів. Така макромодель містить два основні функціональні компоненти – блок формування сигналу (Signal Formation Unit), який формує ефекти спотворення та деградації з використанням розширеного набору факторів впливу, та еквівалентну схему (Equivalent Circuit Uni), яка формує базові параметри власної резонансної частоти та добротності з використанням схеми заміщення п'єзoeлектричних перетворювачів. Новизною запропонованого рішення формування зв'язку між цими компонентами є специфікація передавальної функції з перетворенням  $V \rightarrow I \rightarrow V$  «напруга – струм – напруга», яка здійснюється функціональним джерелом струму формульного типу NFI (Function Formula Type Current Source).

#### Список літератури:

1. Yao S., Zhang Y., Li Y., Wang Y., Zhang J. A small diameter ultrasonic water meter with self-diagnosis function and self-adaptive technology. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 80703–80715. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085300>
2. Kang L., Feeney A., Dixon S. The high-frequency flexural ultrasonic transducer for transmitting and receiving ultrasound in air. IEEE Sensors Journal. 2020. P. 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2981667>
3. Lee S., Choi W., Lee D. Securing ultrasonic sensors against signal injection attacks based on a mathematical model. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932843>
4. Roy R., Hazarika N., Bezboruah T. Ultrasonic sensor-based weight measurement using extension spring. IEEE Sensors Letters. 2023. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSENS.2023.3307113>

5. Horsley D., Lu Y., Tang H.-Y., Jiang X., Boser B., Tsai J., Ng E., Daneman M. Ultrasonic fingerprint sensor based on a PMUT array bonded to CMOS circuitry. *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (ULTSYM)*. 2016. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2016.7728817>
6. Tong Z., et al. A flexible ultrasonic sensor based on piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (pMUTs). *2021 International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT) (Xi'an, China, 2021)*. Xi'an, 2021. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPT52650.2021.9567942>
7. Addabbo T., Fort A., Mecocci A., Parrino S., Pozzebon A., Vignoli V. A LoRa-based IoT sensor node for waste management based on a customized ultrasonic transceiver. *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8705980>
8. Klambauer R., Bergmann A. A new principle for an ultrasonic flow sensor for harsh environment. *IEEE Sensors Conference (SENSORS) (Glasgow, UK, 2017)*. Glasgow, 2017. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234394>
9. Kesuma H., et al. Ultrasonic wireless sensor network for human habitation in deep space mission. *2019 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*. 2019. P. 122–127. DOI: <https://doi.org/10.1109/WiSEE.2019.8920364>
10. Holst C.-A., Lohweg V. A redundancy metric based on the framework of possibility theory for technical systems. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212080>
11. Барило Г.І., Сорока В.С., Никон О.О., Адам'як О.М., Шлюсар Ю.І. Моделювання двомодового драйвера п'єзоелектричних випромінювачів. *Вісник КрНУ імені Остроградського*. 2024. № 5(14). С. 98–104. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.14>
12. Барило Г.І., Павленко М.Є., Адам'як О.М., Никон О.О., Сорока В.С. Алгоритм моделювання сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорних пристроїв. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2024. Т. 343, № 6(1). С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-3>

**Barylo H. I., Brych M. V., Shliuser Yu. A., Zhyvtskyi I. B., Boikachov H. V., Pryshliak S. O.**

#### **MACROMODEL OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH EXTENDED FUNCTIONALITY**

*The article considers both theoretical and practical aspects of designing circuit-level SPICE-compatible macromodels for piezoelectric transducers, which are widely used in sensor systems for ultrasonic diagnostics, contactless measurement, environmental control, and structural health monitoring applications. The paper analyzes modern trends in piezoelectric-based sensing technologies and identifies key destabilizing influences affecting their long-term performance, including temperature fluctuations, aging effects, material degradation, relaxation dynamics, humidity exposure, mechanical vibrations, and a wide range of noise interferences. It is demonstrated that conventional SPICE models – primarily based on ideal resonance circuit parameters – are not capable of adequately simulating the real-world operation of piezoelectric transducers under prolonged usage and harsh environmental conditions. A novel and adaptive macromodel, Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel, is proposed, which accounts for signal instability and environmental disturbances during signal formation. The model consists of two principal functional blocks: the Signal Formation Unit, simulating distortion effects, amplitude modulation, relaxation, signal delays, thermal drift, and noise; and the Equivalent Circuit Unit, which captures the transducer's resonance behavior, quality factor, capacitance, and frequency response. The implementation uses state-of-the-art SPICE components including Amplitude Modulator Macro, Noise Source Macro, Delay T, temperature coefficients (TC1, TC2, TCE), and the highly flexible NFI formula-based current source. Such structure ensures high-fidelity simulation of ultrasonic wave propagation and interaction in complex environments. The proposed model serves as a foundation for robust sensor system design with self-diagnostic capabilities, applicable to security systems, biomedical devices, autonomous environmental monitors, and industrial automation solutions, where signal reliability, adaptability, and system longevity are of critical importance.*

**Key words:** piezoelectric transducer, sensor devices, SPICE, macromodel, modulation, temperature instability.