

СИНТЕЗ МАКРОМОДЕЛІ СИМУЛЯТОРА ВІРТУАЛЬНИХ СИГНАЛІВ АДАПТИВНОЇ АКУСТИКИ

Михайло Мельник, Роман Голяка, Андрій Керницький, Роман Винарович, Михайло Шварц

Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра систем автоматизованого проектування, Львів, Україна

E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

E-mail: Roman.L.Holiaka@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-7720-0372

E-mail: Andriy.B.Kernytskyi@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8188-559X

E-mail: Roman.I.Vynarovych@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

E-mail: Mykhailo.Y.Shvarts@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-5567-442X

© М. Мельник, Р. Голяка, А. Керницький, Р. Винарович, М. Шварц 2025

Робота присвячена розробленню макромоделі симулятора віртуальних сигналів адаптивної акустики Data@Sim на основі методу формальної аналогії. Представлено структуру моделювання електроакустичних процесів у задачах адаптивної акустики та підходи до уніфікації досліджень електричних та акустичних сигналів. Запропоновано алгоритм синтезу віртуальних сигналів, що враховує часові параметри поширення та загасання звукових хвиль, шумові та інтерференційні ефекти. Реалізація моделі здійснена у середовищі SPICE та дозволяє проводити верифікацію вимірювальних перетворень, що використовуються у системах акустометрії. Проведений аналіз показав ефективність запропонованого підходу для моделювання звукового середовища та оптимізації методів цифрового опрацювання акустичних сигналів.

Ключові слова – адаптивна акустика, моделювання, формальна аналогія, SPICE, віртуальні сигнали, цифрове опрацювання.

Постановка проблеми

Процес створення адаптивних акустичних пристроїв (Vary, 2024) і відповідних систем автоматизованого проектування (САПР) передбачає реалізацію послідовної сукупності взаємопов'язаних етапів, що охоплюють як технічні, так і методологічні аспекти. На початковій стадії цього процесу здійснюється вибір інструментів і підходів до моделювання сигнальних трактів, які лежать в основі функціонування систем адаптивної акустики. Об'єктами такого моделювання є електричні та акустичні сигнали (Martin, 2012), що функціонують у відповідних трактах.

У цьому контексті постає потреба у поєднанні підходів до аналізу як електричних, так і акустичних сигналів, що, своєю чергою, веде до формулювання задачі побудови єдиної електроакустичної моделі. Такий підхід дає змогу цілісно описати функціонування системи та реалізувати комплексне проектування в межах САПР.

Ця проблема суттєво розширюється в задачах моделювання акустичного імпедансу, величина якого є інформативним параметром комплексної взаємодії звукової хвилі з об'єктами приміщень, зокрема, розсіювачами та поглиначами звукової енергії, пів- та чверть-хвильовими резонаторами тощо. Сучасним методом дослідження такої взаємодії є вимірювання комплексних значень інтенсивності звуку та акустичного опору на основі MEMS структур (Gueireiro, 2017).

На наступному етапі здійснюється комплексне дослідження сигнальних трактів систем адаптивної акустики (He, 2020). Такі дослідження базуються на методі формальної аналогії (Mayo, 2015) та проводяться в три етапи.

Початковий етап дослідження полягає у виборі методів та моделей, що забезпечують функціональний аналіз сигнальних трактів. Його результатом є не лише оцінка працездатності запропонованих структур вимірювальних перетворювачів, а й створення симуляційного інструменту (імітаційного генератора сигналів), що забезпечує віртуальне відтворення динаміки процесів вимірювання. У рамках другого етапу здійснюється розроблення методу оптимізації вимірювального перетворення, заснованого на балансі між часовою роздільною здатністю та захищеністю сигналу від завад. Наступний, третій етап, спрямований на синтез та параметричне дослідження схем сигнальних трактів із конкретною прив'язкою до елементної бази – таких як підсилювачі, фільтри, аналого-цифрові перетворювачі та інші ключові вузли електронних кіл.

Дана робота присвячена проблематиці комплексного моделювання електроакустичних процесів в задачах адаптивної акустики з подальшим розвитком методу формальної аналогії (Da Silva, 2022). Необхідність використання методу формальної аналогії «акустика - електрика» обумовлена задачами розроблення комплексних моделей засобів акустики та сигнального перетворення вбудованих систем акустометрії. Велика різноманітність засобів і схем вимірювальних перетворювачів, що використовуються в інформаційно-комп'ютерних системах акустичного аналізу, зумовлює необхідність уніфікації платформи для проведення комплексних модельних досліджень.

Для вирішення цієї проблеми в статті представлено результати розроблення структури та послідовність синтезу макромоделі симулятора віртуальних сигналів адаптивної акустики Data@Sim, що реалізована методом формальної аналогії на стандартизованій програмній платформі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика розроблення та використання адаптивних методів в акустиці представлена в наукових публікаціях, що висвітлюють: адаптивний гармонічний контроль придушення завад (Chandrasekar, 2006); придушення акустичного шуму безсенсорної адаптивної сервосистеми (Kawamura, 2018); активний контроль шуму в режимі реального часу багатотонального та акустичного шуму з декомпозицією сигналу та паралельними гібридними адаптивними алгоритмами (Krishna Vemuri, 2014); метод адаптивного придушення шуму акустичного сигналу синхронного гідравлічного двигуна на основі вдосконаленого методу суперпозиції дислокації (Dayong, 2020).

Використання методів формальної аналогії (Li, 2005) направлені на вирішення задач модельних досліджень з орієнтацією на розроблення формальних моделей та програмного забезпечення (Sarpiri, 2023). Прикладами наукових публікацій, в яких розвиваються цей метод, є формальна модель програмного забезпечення (Cox, 2001), проблема надійності цифрової системи з врахуванням обмеження проектування: урок формальних методів (Mayo, 2015), вивчення інтелектуальних просторів за допомогою «всеосяжної» обчислювальної аналогії (Graves, 2015).

У межах цієї роботи метод формальної аналогії реалізовано із використанням стандартизованого програмного середовища SPICE, яке забезпечує уніфікований підхід до моделювання електронних схем. Основним призначенням SPICE моделювання є сигнальні кола на електронних компонентах (O'Rourke, 2024). Проблематиці SPICE моделей в задачах дослідження звукових хвиль та акустики присвячені роботи, що висвітлюють, зокрема, інтегрований підхід до моделювання поширення звуку та електроніки (Viegas, 2022); оцінку еквівалентної схеми SPICE моделі для моделювання сенсорів поверхневих акустичних хвиль (Jesus, 2021); експериментальну перевірку SPICE моделі дифракційних ефектів в системі Pulse-Echo (Aouzale, 2009); SPICE моделювання імпульсного електроакустичного сигналу (Galloy, 2014).

Відтак, проведений аналіз останніх наукових робіт показує значну актуальність тематики адаптивних методів акустики та розкриває основні тенденції подальшого розвитку модельних досліджень в цій галузі.

Формулювання цілі статті

Симулятор сигналів Data@Sim, як випливає з його назви, призначений для генерації масивів даних, які використовуються для тестування та вдосконалення алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (FFT), а також частотної селекції, із застосуванням математичних бібліотек середовища MatLab. На рис. 1 наведено діаграму потоків даних (Data Flow Diagram), що ілюструє взаємозв'язки між ключовими етапами досліджень і процесами розроблення систем акустометрії з використанням розробленого симулятора.

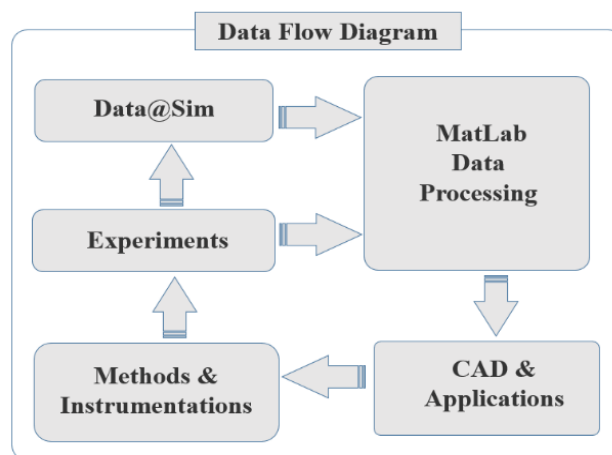


Рис. 1 Діаграма потоків даних симулятора сигналів Data@Sim

Базою для проведення експериментів (Experiments), результатом яких є отримання фізично достовірних даних, виступають методи та технічні засоби вимірювальної техніки (Methods & Instrumentations). Ці дані використовуються як для безпосереднього цифрового опрацювання із застосуванням функцій MatLab (MatLab Data Processing), так і для верифікації та уточнення математичних моделей, реалізованих у середовищі симуляції. Синтез і застосування віртуально сформованих сигналів відіграють ключову роль у процесі проектування засобів акустометрії. Така необхідність зумовлена низкою чинників, зокрема, потребою у стандартизації тестових сценаріїв, зниженням залежності від фізичних прототипів на ранніх етапах розроблення, а також забезпеченням масштабованості досліджень у віртуальному середовищі.

По-перше, для ефективної корекції акустичних характеристик приміщень необхідно створювати віртуальні акустичні моделі, які дають змогу не лише здійснювати підбір геометричних параметрів і складових елементів внутрішнього простору, але й визначати оптимальне розташування джерел звуку. Застосування таких моделей передбачає генерацію великих обсягів даних, отримання яких експериментальним шляхом у більшості випадків є неможливим через фізичні або ресурсні обмеження. До чинників, що ускладнюють проведення реальних досліджень, належить не тільки масштабність оброблюваних даних, а й недоступність повторюваних вимірювань у ряді практичних ситуацій.

По-друге, під час проведення експериментів, особливо в умовах приміщень із високим рівнем фонових шумів (Background Noise), у сигналі часто присутні значні артефакти, які ускладнюють аналіз. Виявлення та компенсація таких артефактів є складним завданням і потребує розширеного інструментарію цифрового опрацювання сигналів. Водночас удосконалення цих методів можливе лише за наявності репрезентативних масивів даних, до яких належать як опорні сигнали (для встановлення вихідних умов), так і сигнали із включенням різноманітних інтерференцій і завад.

По-третє, масове створення синтетичних даних є необхідною умовою для впровадження сучасних підходів, зокрема методів штучного інтелекту та нейронних мереж. На поточному етапі розвитку комп'ютерних технологій застосування таких підходів є надзвичайно актуальним, що обумовлює потребу у проведенні досліджень у сфері машинного навчання й навчання глибоких моделей, а отже – вимагає значної кількості навчальних та тестових даних.

З огляду на викладене, в рамках даної роботи при розробленні засобів дослідження акустичних характеристик приміщень поставлено задачі як подальшого розвитку САПР акустометрії (CAD & Applications), так і удосконалення симулятора синтетичних сигналів (Data@Sim) з урахуванням широкого спектра паразитних ефектів і спотворень. Компонентна модель симулятора Data@Sim, яка відображає потоки даних під час синтезу акустичних сигналів (Data Simulation Flow Diagram), наведена на рис. 2. Розроблення Data@Sim здійснювалася з урахуванням більшості фізичних аспектів поширення звукових хвиль у замкнених просторах, що дає змогу максимально точно імітувати реальні акустичні умови. Приклад осцилограм, отриманих у процесі дослідження сигналів із наявністю характерних артефактів, подано на рис. 3.

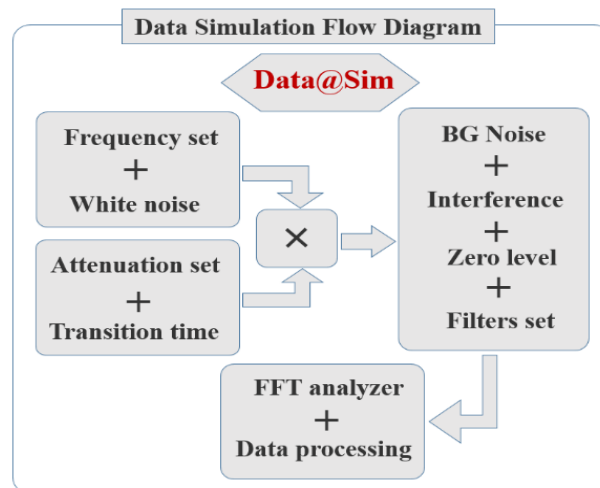


Рис. 2 Компонентна модель симулятора Data@Sim

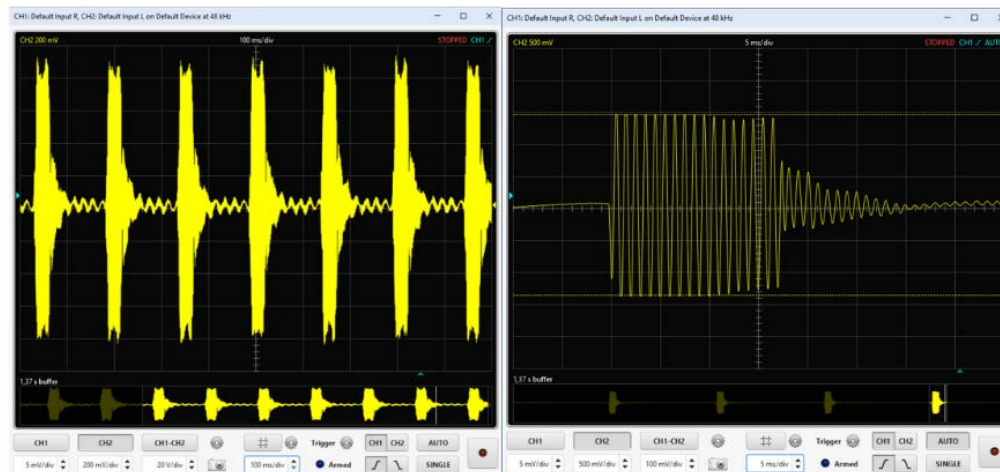


Рис. 3. Приклад осцилограм акустичних сигналів з наявністю артефактів

Вхідними параметрами, що визначають синтез даних є:

- Frequency set – сукупність характеристикних частот звукового спектру, які використовуються як опорні під час виконання частотного аналізу акустичних сигналів;
- White noise – амплітудна характеристика білого шуму, що застосовується як збуджувальний вплив у процесах частотного аналізу, моделювання затухання та реверберацій;
- Transition time — характерний час встановлення звукових коливань, пов'язаний з інерційними властивостями активаторів, зокрема гучномовців;
- Attenuation set — параметри, що описують ступінь загасання звукових хвиль та тривалість процесів затухання в межах замкнутого простору;

- BG (Background) Noise — рівень акустичних і електричних завад, що виникають у трактах прийому (мікрофони, підсилювачі, АЦП тощо);
- Interference — сигнальні інтерференції, спричинені впливом зовнішніх завад, як акустичних (сторонні джерела шуму), так і електромагнітних (мережеві перешкоди, вплив силової електроніки, радіочастот);
- Zero level — вихідний рівень сигналу та роздільна здатність перетворення, що визначаються ефективністю селекції, розрядністю АЦП (16/24/32 біти) та параметрами нормування згідно з цифровим представленням;
- Filters set — параметри смуги пропускання та селективності цифрових або гібридних фільтрів змішаного сигнального тракту;
- FFT analyzer — програмна або модельна реалізація алгоритмів частотного аналізу, зокрема швидкого перетворення Фур'є (FFT) для виділення інформативних спектральних компонентів сигналу;
- Data processing — специфікації наступних етапів опрацювання сигналів, у тому числі із застосуванням адаптивної фільтрації та селекції.

У межах запропонованого підходу до моделювання, взаємозв'язки між параметрами сигналів описуються через адитивні (+) та мультиплікативні ($\times$) функції (рис. 2). Так, Frequency set та White noise формують адитивну групу параметрів збудження, у деяких методиках синтезу допускається їх сумісне використання (наприклад, накладення гармоніки на спектр білого шуму). Аналогічно, Transition time та Attenuation set поєднуються адитивно, оскільки обидва параметри визначають часово-енергетичну структуру затухаючого сигналу. У свою чергу, вихідна амплітуда сигналу формується за допомогою мультиплікативної взаємодії згаданих параметрів першої та другої груп. Зокрема, значення амплітуди на виході синтезатора є результатом множення параметрів спектру збудження на перехідну функцію, що описує встановлення й затухання акустичних коливань у часі. Аналогічними адитивними залежностями характеризують процеси завершального формування віртуальних сигналів - BG Noise, Interference, Zero level, Filters set.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо структуру, принципи побудови та параметри моделювання віртуальних сигналів, що реалізуються в симуляторі Data@Sim. Зокрема, проведемо дослідження входних характеристик задаючих сигналів, серед яких першу групу становить набір основних частот звукового діапазону (Frequency set) та властивості білого шуму (White noise). Їх генерація здійснюється за допомогою універсального джерела напруги Voltage Source (Vs), SPICE-макромодель якого підтримує різні типи сигналів –Pulse, Sin, Exp, PWM, SFFM, а також формування випадкових шумових послідовностей (Noise) (рис. 4).

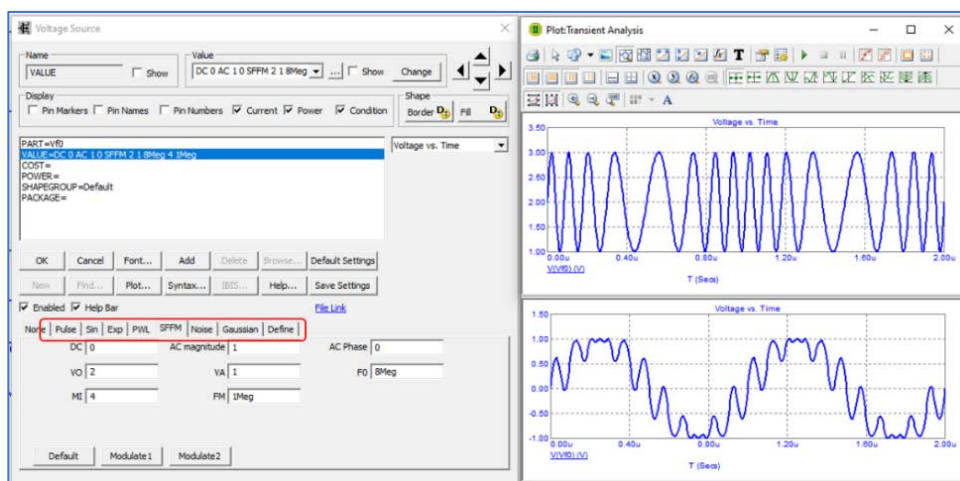


Рис. 4. Інтерфейс налаштувань SPICE-моделі джерела напруги (Voltage Source)

Параметри другої групи, які описують встановлення звукових коливань (Transition time), їх згасання (Attenuation set) та відбиття (реверберацію), реалізуються за допомогою схем заміщення (рис. 5, рис. 6). Такі схеми містять джерело початкового збудження V_p , матрицю МТ, що складається з компонентів часової фільтрації, та сумуючий елемент Xsum.

У складі матриці МТ передбачено лінії затримки X_t , атенуатори X_a , реактивні RC-ланцюги, які відіграють ключову роль у часовій трансформації сигналів. Зокрема, реактивні компоненти виконують функції:

- диференціювання імпульсних збуджень, що відповідає моделюванню процесу згасання звукових коливань,
- інтегрування сигналу, яке описує інерційність збудження у відповідності до фізичних властивостей середовища.

Кількість та конфігурація елементів матриці МТ визначаються характером дослідження, зокрема, кількістю поверхонь, що беруть участь у відбитті хвильових фронтів.

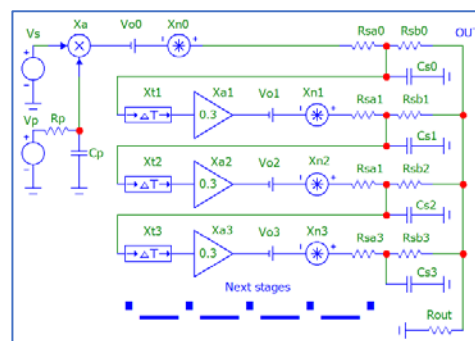


Рис. 5. Модельна схема встановлення та реверберації звукових хвиль

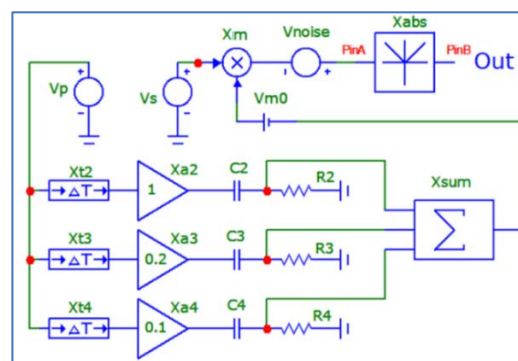


Рис. 6. Макромодель згасання звукових коливань

Мультиплікативна взаємодія між параметрами першої та другої груп реалізується за допомогою помножувальних елементів X_a та X_m , які відповідають за узгодження спектральних і часових характеристик сигналів. На вихідний сигнал після перемноження накладаються завадові компоненти, зокрема фоновий шум у вимірювальних трактах (BG Noise) та вплив інтерференцій (Interference). Формування цих компонентів у моделі здійснюється за допомогою джерел X_{n0} та V_{noise} .

З метою спрощення подальшого опрацювання, зокрема логарифмічного представлення сигналів, на виході схеми використовується SPICE-макромодель ABS Macro, яка забезпечує обчислення модульного значення сигналу. Початковий рівень сигналу (Zero level), а також роздільна здатність його представлення, що залежать від розрядності АЦП і нормувальних коефіцієнтів згідно з обраною цифровою системою числення, задаються через джерела V_{o0} та V_{m0} . Їх наявність у структурі є принциповою, оскільки відсутність ненульового початкового рівня може призвести до появи нульових значень, які є некоректними для подання сигналів у логарифмічному масштабі, наприклад у децибелах (dB). З цієї ж причини у структурі синтезатора передбачено компонент X_{abs} , який забезпечує перетворення сигналу у модульну форму перед подачею на вихід Out.

Приклади графічного відображення сигналів, що ілюструють етапи формування та результати їх синтезу, наведено на рис. 7 – рис. 12. Для зручності візуального аналізу в представлених прикладах розглядається обмежений набір відбитих акустичних хвиль, зокрема, три складові хвильових фронтів.

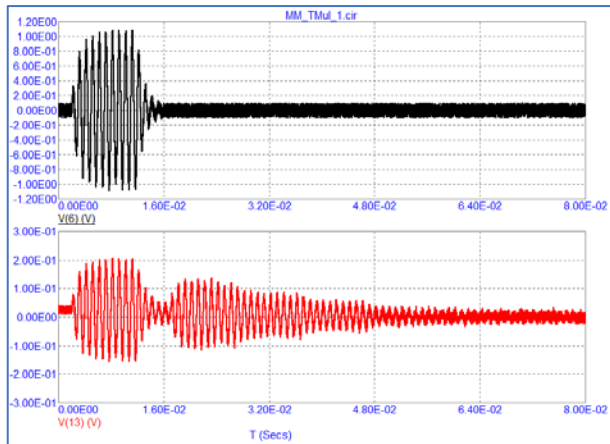


Рис. 7. Сигнали в процесі їх формування (Stage 1)

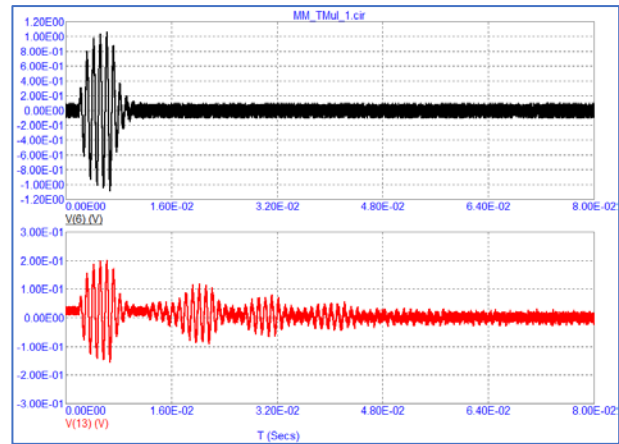


Рис. 8. Сигнали в процесі їх формування (Stage 2)

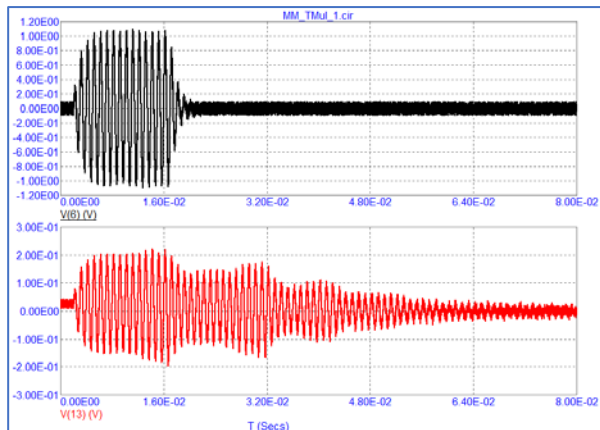


Рис. 9. Сигнали в процесі їх формування (Stage 3)

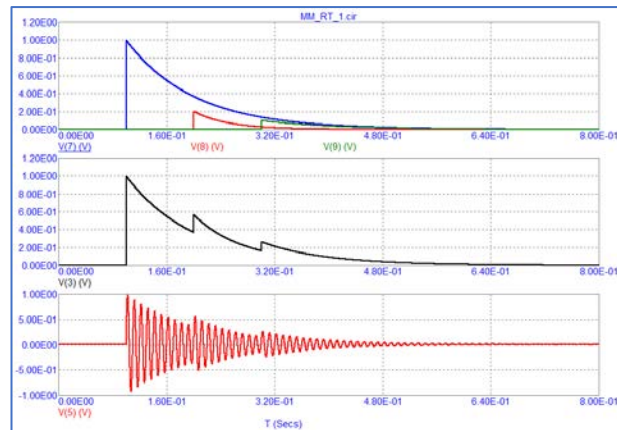


Рис. 10. Сигнали в процесі їх формування (Stage 4)

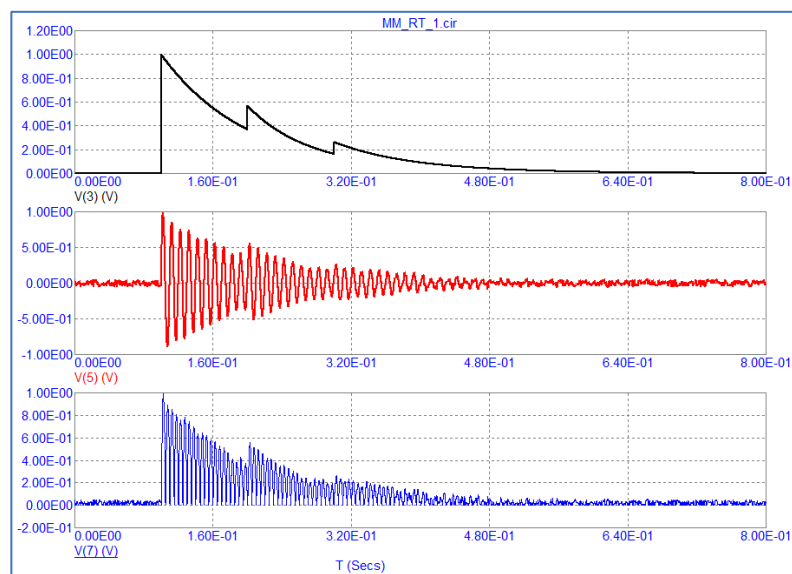


Рис. 11. Сигнали в процесі їх формування (Stage 5)

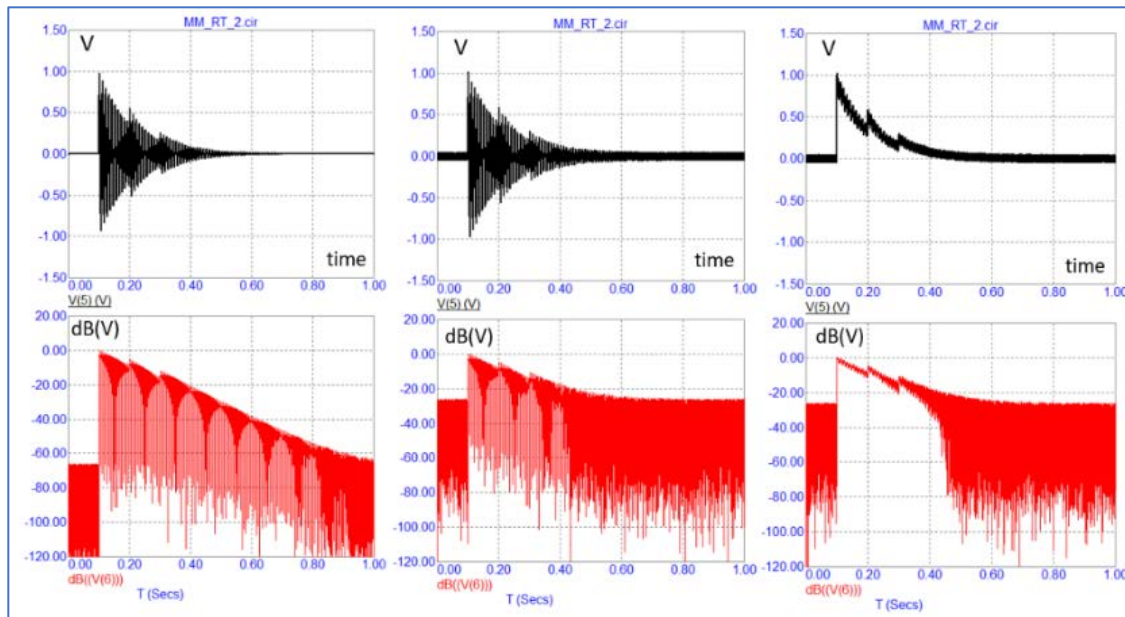


Рис. 12. Приклади синтезованих сигналів у різних режимах моделювання (var.1, var.2, var.3)

Розглянемо принцип побудови схеми заміщення моделі Data@Sim, призначеної для формування частотних характеристик синтезованих (імітаційних) сигналів. Слід зауважити, що реалізація частотно-селективних фільтрів є достатньо стандартною інженерною задачею, тож наведемо лише два типових приклади.

У першому варіанті (рис. 13) застосовується послідовна архітектура, що базується на каскадному з'єднанні фільтрів. У другому варіанті (рис. 14) реалізовано паралельну структуру, в якій сигнали формуються на основі сумування частотних компонентів, з використанням SPICE-макромоделі джерела Function Source (тип Formula voltage).

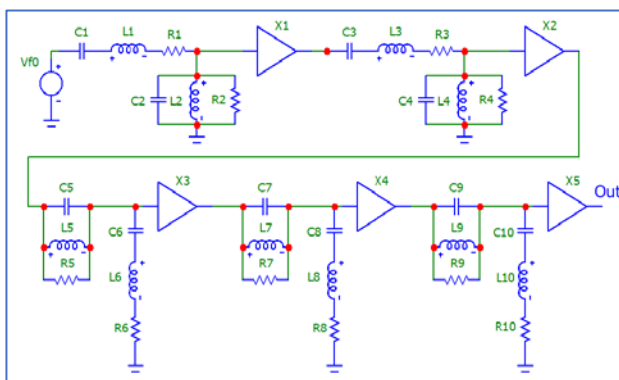


Рис. 13. Формування АЧХ у моделі Data@Sim: послідовна структура фільтрів (var. 1)

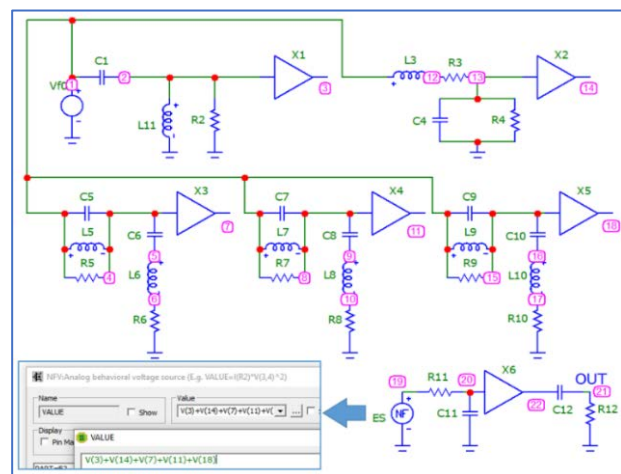


Рис. 14. Формування АЧХ у моделі Data@Sim: паралельна структура фільтрів (var. 2)

З практичної точки зору, реалізація другого підходу є значно зручнішою як на етапі початкового налаштування параметрів фільтрів, так і під час верифікації та корекції частотної моделі в рамках Data@Sim. Ілюстрацію прикладів побудови АЧХ, а також демонстрацію резонансних ефектів, характерних для систем акустометрії, наведено на рис. 15. Завершуючи короткий виклад методики та етапів формування моделі симулятора Data@Sim, на рис. 16 представлено фрагмент текстового файлу з масивом даних Waveform Values, який використовується для подальшого аналізу або виводу на цифрові пристрої.

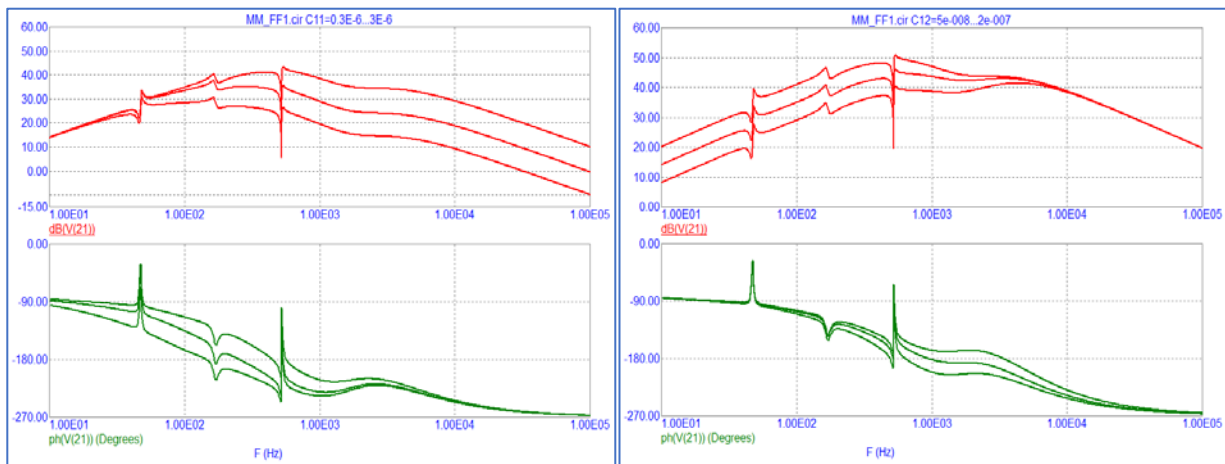


Рис. 15. Приклади АЧХ в процесі корекції

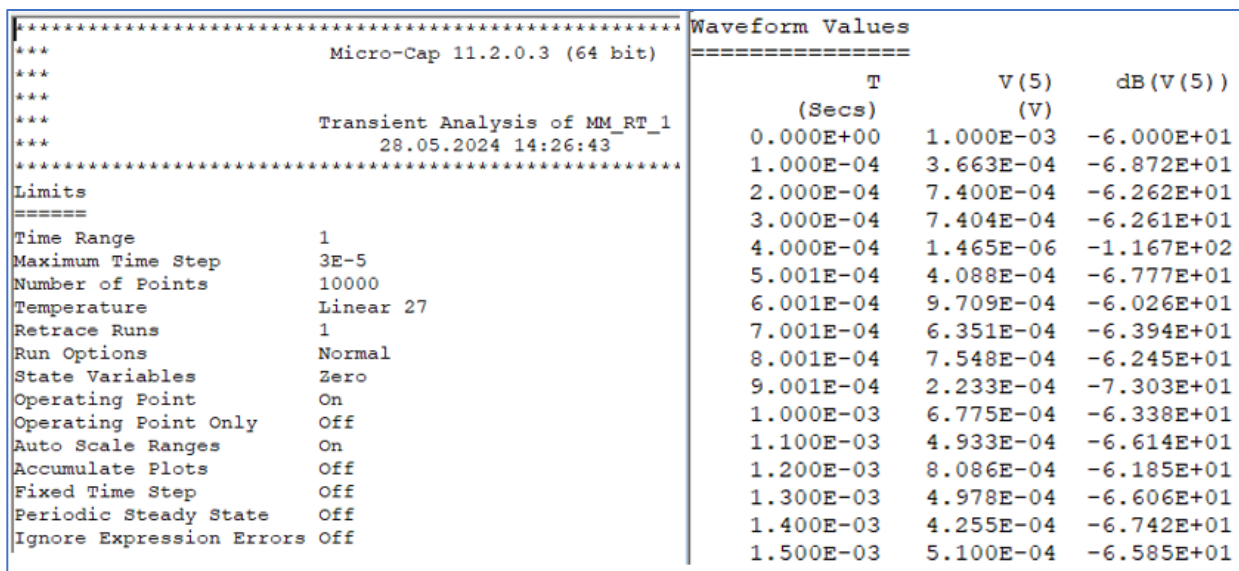


Рис. 16. Демонстрація процедури виведення числових значень сигналів із симулятора Data@Sim

Висновки

У межах представленого дослідження проаналізовано підходи до комплексного моделювання електроакустичних процесів, характерних для задач адаптивної акустики, на основі застосування методу формальної аналогії. Розроблено та представлено структуру SPICE-макромоделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim, а також систематизовано ключові параметри, які визначають особливості його роботи та обчислювальні характеристики. Виконано аналіз процесу синтезу акустичних сигналів, що дозволяє відтворювати їх фізичні характеристики з високою точністю.

Розроблена модель дозволяє проводити чисельні експерименти з дослідження характеристик адаптивної акустики, оцінювати вплив шумових та інтерференційних ефектів, а також оптимізувати алгоритми цифрового опрацювання сигналів. Використання стандартизованої платформи SPICE значно спрощує інтеграцію розробленого симулятора у процеси проектування та тестування акустичних систем.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів аналізу та моделювання звукового середовища, що сприятиме подальшому розвитку систем автоматизованого проектування у сфері адаптивної акустики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aouzale, N., Chitnalah, A., & Jakjoud, H. (2009). Experimental validation of SPICE modeling diffraction effects in a pulse–echo ultrasonic system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 56(12), 911–915. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2009.2035276>
2. Chandrasekar, J., Liu, L., Patt, D., Friedmann, P. P., & Bernstein, D. S. (2006). Adaptive harmonic steady-state control for disturbance rejection. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(6), 993–1007. <https://doi.org/10.1109/TCST.2006.880185>
3. Cox, P. T., & Song, B. (2001). A formal model for component-based software. *Proceedings IEEE Symposia on Human-Centric Computing Languages and Environments*, 304–311. <https://doi.org/10.1109/HCC.2001.995278>
4. Da Silva, C. E., Medeiros, L., Justino, Y., & Gomes, E. L. (2022). A Box Analogy Technique (BoAT) for agile-based modelling of business processes. *2022 IEEE 30th International Requirements Engineering Conference (RE)*, 231–242. <https://doi.org/10.1109/RE54965.2022.00029>
5. Dayong, N., Hongyu, S., Aoyu, X., Yongjun, G., Hongwei, D., & Jiaoyi, H. (2020). Adaptive noise reduction method of synchronous hydraulic motor acoustic signal based on improved dislocation superposition method. *IEEE Access*, 8, 37161–37172. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975562>
6. Galloy, L., Berquez, L., Baudoin, F., & Payan, D. (2014). PSpice modeling of the pulsed electro-acoustic signal. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(3), 1143–1153. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.6832259>
7. Graves, C. A., Negrón, T. P., Chestnut II, M., & Popoola, G. (2015). Studying smart spaces using an "embiquitous" computing analogy. *IEEE Pervasive Computing*, 14(2), 64–68. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2015.41>
8. Guerreiro, J., Reid, A., Jackson, J. C., & Windmill, J. F. C. (2017). Towards the development of a frequency agile MEMS acoustic sensor system. *IEEE Sensors*, 120, 1–3. <https://doi.org/10.1109/icsens.2017.8234395>
9. He, H., Chen, J., Benesty, J., & Yu, Y. (2020). Robust Frequency-Domain Recursive Least M-Estimate Adaptive Filter For Acoustic System Identification. *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 471–475. <https://doi.org/10.1109/icassp40776.2020.9054296>
10. Jesus, R. C. O., Carvalho, E. A. N., Tamarin, O., Freire, R. C. S., & Dejous, C. (2021). Evaluation of an equivalent circuit model for simulation of surface acoustic wave sensors. *2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INSCIT49950.2021.9557258>
11. Kawamura, N., & Hasegawa, M. (2018). Suppression of acoustic noise of position sensorless adaptive positioning servo system based on DyCE principle. *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 907–912. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445353>
12. Krishna Vemuri, S. H., Ganguly, A., & Panahi, I. (2014). Real-time active noise control of multi-tones and MRI acoustic noise in fMRI bore with signal decomposition and parallel hybrid RLS-NLMS adaptive algorithms. *2014 IEEE Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/DCAS.2014.6965339>
13. Li, J., Nichols, D., & Terry, A. (2005). Analogy, deduction and learning. *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 294a–294a. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2005.96>
14. Martin, R., & Kolossa, D. (2012). Voice Activity Detection, Noise Estimation, and Adaptive Filters for Acoustic Signal Enhancement. 51–85. <https://doi.org/10.1002/9781118392683.ch4>
15. Mayo, J. R., Armstrong, R. C., & Hulette, G. C. (2015). Digital system robustness via design constraints: The lesson of formal methods. *OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information)*, 109–114. <https://doi.org/10.1109/syscon.2015.7116737>
16. O'Rourke, R. (2024). Opamp models and resistive circuits. In *First and second order circuits and equations: Technical background and insights* (pp. 39–43). IEEE. <https://doi.org/10.1002/9781119913566.ch3>
17. Sarpiri, M. N., Aghaei, M. S., & Gandomani, T. J. (2023). Towards better software development effort estimation with analogy-based approach and nature-based algorithms. *2023 International Conference on Information Technology (ICIT)*, 114–117. <https://doi.org/10.1109/ICIT58056.2023.10225939>
18. Vary, P., & Martin, R. (2024). Acoustic echo control. In *Digital speech transmission and enhancement* (pp. 457–515). IEEE. <https://doi.org/10.1002/9781119060970.ch14>
19. Viegas, R., Pozzatti, D., Zabel, F., & Silva, A. J. (2022). Integrated approach for modeling acoustic propagation and projectors/hydrophones electronics. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977091>

**SYNTHESIS OF A MACROMODEL FOR A VIRTUAL SIGNAL SIMULATOR
OF ADAPTIVE ACOUSTICS**

Mykhaylo Melnyk, Roman Holyaka, Andriy Kernytsky, Roman Vynarovych, Mykhailo Shvarts

Lviv Polytechnic National University,
Department of Computer Design Systems, Lviv, Ukraine

E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

E-mail: Roman.L.Holiaka@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-7720-0372

E-mail: Andriy.B.Kernytsky@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8188-559X

E-mail: Roman.I.Vynarovych@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

E-mail: Mykhailo.Y.Shvarts@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-5567-442X

© Melnyk M., Holyaka R., Kernytsky A., Vynarovych R., Shvarts M.

This work is dedicated to the development of a macromodel for the virtual signal simulator of adaptive acoustics, Data@Sim, based on the formal analogy method. The structure of modeling electro-acoustic processes in adaptive acoustics tasks and approaches to the unification of research on electrical and acoustic signals are presented. An algorithm for synthesizing virtual signals that accounts for temporal parameters of sound wave propagation and attenuation, as well as noise and interference effects, is proposed. The model is implemented in the SPICE environment and enables verification of measurement transformations used in acoustic metrology systems. The conducted analysis demonstrates the effectiveness of the proposed approach for modeling the acoustic environment and optimizing digital processing methods for acoustic signals.

Keywords - adaptive acoustics, modeling, formal analogy, SPICE, virtual signals, digital processing.