

ІМПЕДАНСНИЙ АНАЛІЗ ПРИ П-ПОДІБНОМУ ЗБУДЖЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ФІРМИ INFINEON TECHNOLOGIES AG

Я. Берко¹, А. Цемко¹, М. Мулярчик¹, В. Бігдай², З. Любунь¹

¹ кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна

² Infineon Technologies AG

Використання імпедансної спектроскопії дозволяє визначати тип речовини та їх властивості, що може бути використаним у багатьох галузях науки і техніки: при виробництві та експлуатації літій-іонних акумуляторів, аналізаторів газів та рідин, в біомедичних застосуваннях. Класичний метод визначення імпедансу речовини базується на великій кількості вимірів з використанням гармонічного сигналу різної частоти, що створює певні обмеження у використанні такого методу імпедансної спектроскопії на мікроконтролерах. Використання методів з П-подібним збудженням зможе дозволити визначати імпеданс речовини без використання генератора гармонічного сигналу, що здешевлює імплементацію методу на мікроконтролерах.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, П-подібне збудження, мікроконтролери.

Метою роботи є визначення можливостей вимірювання імпедансної спектроскопії для систем з П-подібним збудженням, виміри для якої проводяться з використанням генератора та осцилографа. Очевидно, що в реальних застосуваннях це рішення буде імплементовано на мікроконтролерах або IoT-девайсах. З цього випливає, що виміри на установці бажано проводити на прямокутному сигналі, який можна буде отримати і на мікроконтролерах. В такому випадку, основним параметром який може вплинути на майбутні виміри є час зростання фронту прямокутного сигналу. В роботі було взято сигнал з характеристиками аналогічними П-подібному сигналу мікроконтролера компанії Infineon – CY8CKIT-062-WIFI-BT (Рис. 1).

Схема установки для вимірювання показана на рис. 2. У точках А і В вимірюються значення напруг відносно землі; U_B – спад напруги на посудині з рідиною. Потрібно зазначити, що у схемі існують ще опори приєднувальних проводів і контактів та ємність стінок посудини/щупів.

На рис. 3 показана вибрана еквівалентна схема заміщення для вимірювальної установки, де R_{Input} – опір для вимірювання напруги, C_{Wall} – сумарна ємність двох стінок посудини, R_{Liquid} та C_{Liquid} – значення опору та ємності що характеризують властивості рідини в посудині[4].

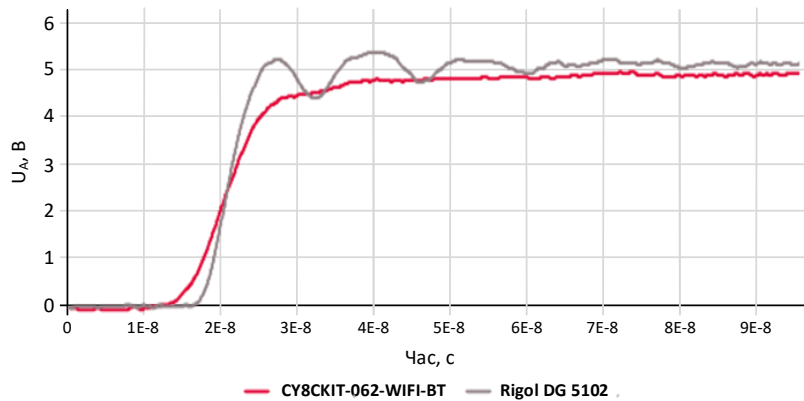


Рис. 1 Приклад П-подібного сигналу знятого з мікроконтролера CY8CKIT-062-WIFI-BT в порівнянні зі сигналом знятим з генератора Rigol DG5102

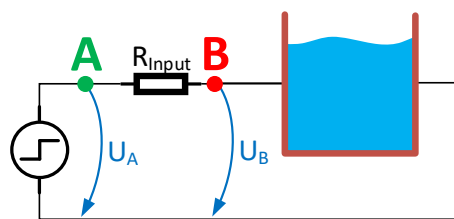


Рис. 2 Схема установки для вимірювання

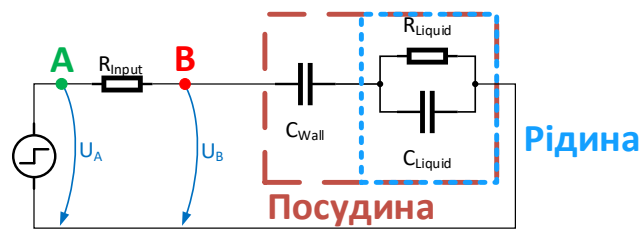


Рис. 3 Схема заміщення установки для вимірювання.

Виміряні значення напруги в точках А та В дають змогу визначити значення струму (тільки миттєве значення, в момент вимірювання, бо в схемі немає режиму за постійним струмом i_0 що протікає через посудину з рідиною. При подачі на вхід П-подібного сигналу для визначення характеристик рідини ми можемо опиратись лише на перехідний процес в колі. Іншими словами, на зміну значень струмів та напруг в часі та інтегралу від струму тобто на величину заряду накопичену в даний момент часу ємностями схеми. Так чи інакше нам потрібно розглядати перехідний процес в колі.

Відповідно до схеми заміщення, зображеної на рис. 2, значення R_{Liquid} та C_{Liquid} можна визначити на основі вимірних напруг наступним чином:

Для еквівалентної схеми за законами Кірхгофа:

$$i_{R_{Input}} = i_{C_{Liquid}} + i_{R_{Liquid}}, \quad (1)$$

$$U_{Liquid} = U_B - U_{C_{Wall}}. \quad (2)$$

Вхідний заряд:

$$Q(t) = \int_0^t i_{R_{Input}}(\tau) d\tau = \frac{1}{R_{Input}} \int_0^t (U_A(\tau) - U_B(\tau)) d\tau = C_{Wall} U_{C_{Wall}}. \quad (3)$$

З (1) маємо:

$$Q(t) = \int_0^t i_{C_{Liquid}}(\tau) d\tau + \int_0^t i_{R_{Liquid}}(\tau) d\tau = C_{Liquid} U_{Liquid} + \frac{1}{R_{Liquid}} \int_0^t U_{Liquid}(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Перепишемо (4) з врахуванням (2) і (3):

$$Q(t) = X(t) C_{Liquid} + Y(t) \frac{1}{R_{Liquid}}, \quad (5)$$

$$\text{де } X(t) = U_B(t) - \frac{Q(t)}{C_{Wall}}, \quad Y(t) = \int_0^t X(\tau) d\tau.$$

Знаючи величини напруг $U_A(t)$ і $U_B(t)$ та інтегралів $\int_0^t U_A(\tau) d\tau$ і $\int_0^t U_B(\tau) d\tau$ для двох різних моментів часу $t = t_1$ та $t = t_2$, можна, при відомих R_{Input} та C_{Wall} , визначити значення $Q_1 = Q(t_1)$, $Q_2 = Q(t_2)$, $X_1 = X(t_1)$, $X_2 = X(t_2)$, $Y_1 = Y(t_1)$, $Y_2 = Y(t_2)$. Тоді, використовуючи (5), будемо мати:

$$C_{Liquid} = \frac{Q_1 Y_2 - Q_2 Y_1}{X_1 Y_2 - X_2 Y_1}, \quad R_{Liquid} = \frac{X_1 Y_2 - X_2 Y_1}{X_1 Q_2 - X_2 Q_1}. \quad (6)$$

У процесі вимірювання буде відома напруга живлення U_A та заряд Q виміряний за допомогою операційного підсилювача. Відповідно до закону Ома, на основі виміряного заряду Q можна отримати значення напруги на резисторі R_{Input} підчас перехідного процесу (напруга на резисторі пропорційна заряду, що проходить через систему). Отримані значення використовуються при чисельному інтегруванні (5) методом лівих прямокутників. Таким чином, можна визначити параметри схеми заміщення - значення опору та ємності досліджуваної рідини.

Натурні експерименти показали, що низькоомні рідини із різним імпедансом демонструють близьку залежність заряду від часу інтегрування (рис. 4).

На рисунку приведені дані дослідження для наступних сумішей¹:

1. Суміш I -слабкий розчин спирту (10%) в питній воді.
 $\epsilon = 77.1, \sigma \approx 66.8 \text{ мСм}\cdot\text{м}$
2. Суміш II -слабкий розчин спирту (10%) в питній воді з додаванням солі.
 $\epsilon \approx 77.1, \sigma \approx 77.2 \text{ мСм}\cdot\text{м}$
3. Суміш III – сильний розчин спирту (80%)
 $\epsilon = 36.1, \sigma \approx 75.7 \text{ мСм}\cdot\text{м}$

Слід зазначити що суміші I та II – з однаковою діелектричною проникністю, але різними провідностями, а суміші II та III — з приблизно однаковою провідністю та різною діелектричною проникністю.

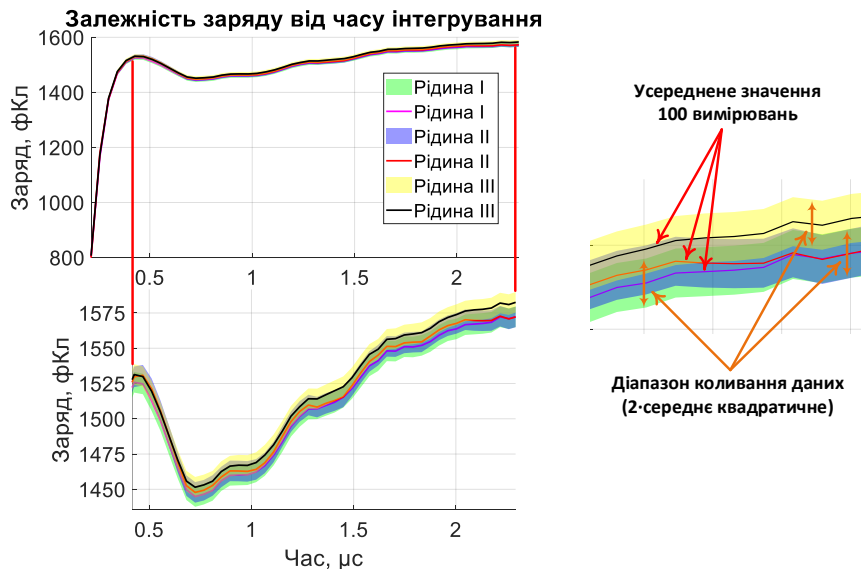


Рис. 4. Залежність заряду від часу інтегрування для набору близьких за параметрами сумішей (низькоомні рідини).

На нашу думку може існувати декілька причин, що не дають можливість провести ідентифікацію таких сумішей:

- при малому значенні активного опору рідини, вплив ємності рідини на перехідний процес несуттєвий і така методика вимірювань неефективна;
- розглянута схема заміщення може не відповідати реальній фізичній моделі у якій можуть бути присутні: електрохімічні реакції (перенесення іонів, тощо), паразитні опори/ємності дротів та з'єднань;

¹ Вимірювання проводилися на скляній ємності з електродами, для цього використовувалися генератор: Rigol DG5102 та осцилограф Rigol MSO5104. Параметри скляної ємності: 150x30x100 мм, товщина стінки = 3 мм. Параметри мідних пластинок: 150x100 мм, відстань між пластинами = 30 мм (6 мм – скло, 24 мм - рідина). Ємність досліджуваної рідини = 300 мл.

- можливо, значення R_{Input} та C_{Wall} не підходять для вимірювання перехідного процесу.

Щоб визначити значення R_{Liquid} та C_{Liquid} потрібно знайти значення R_{Input} та C_{Wall} . Ці величини можна визначити відносно легко виходячи із залежності струмів та напруг перехідного процесу в певні моменти часу:

$$R_{Input} = \frac{U_A}{i_0(t)}, \quad t = 0; i_0 \neq 0 \quad (7)$$

$$C_{Wall} = \frac{Q}{U_{C_{Wall}}}, \quad Q = \int_0^t i_0(t) dt \quad (8)$$

Відповідно до описаного способу обчислення (5) дослідимо залежності перехідного процесу від параметрів R_{Input} та C_{Wall} .

Кількість заряду, який проходить через рідину пропорційна значенню напруги на C_{Wall} . Тому, визначити і відповідно ідентифікувати рідини за значеннями R_{Liquid} та C_{Liquid} можна лише якщо характер зміни напруги на цій ємності відрізняється для різних рідин. Серія графіків, продемонстрованих на рис.5, показує, що невдалий вибір опору R_{Input} не дає змогу розділити характеристики низькоомних рідин.

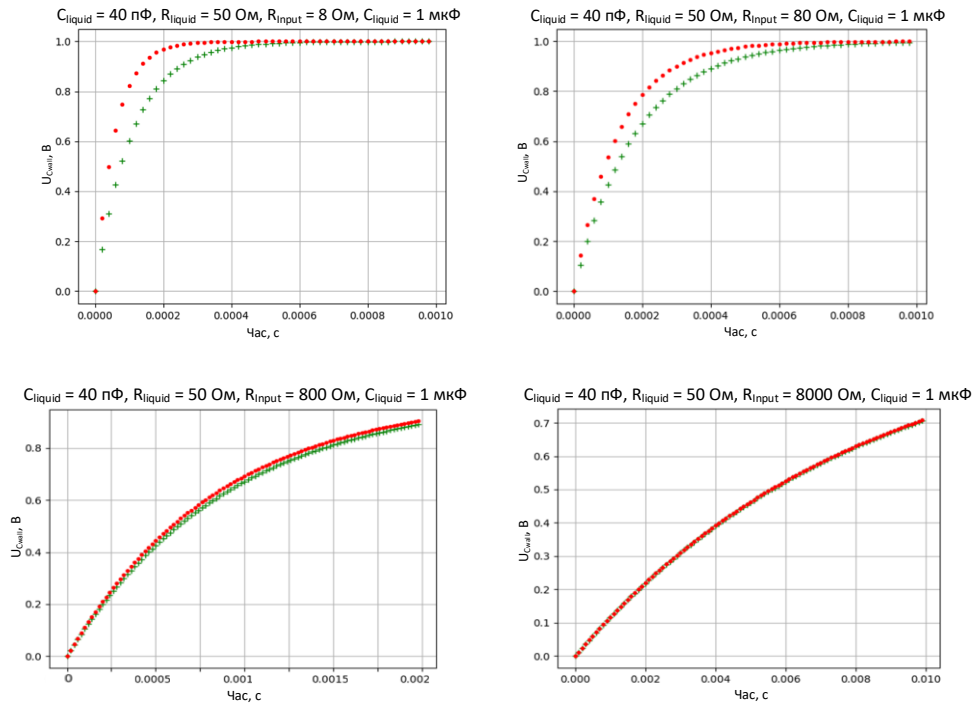


Рис. 5 Порівняння характеру перехідного процесу для двох комбінацій R_{Liquid} та C_{Liquid}

Тепер зафіксуємо значення опору $R_{Input} = 80 \text{ Ohm}$ та розглянемо на порядок менше/більше значення C_{Wall} , як показано на Рис. 6.

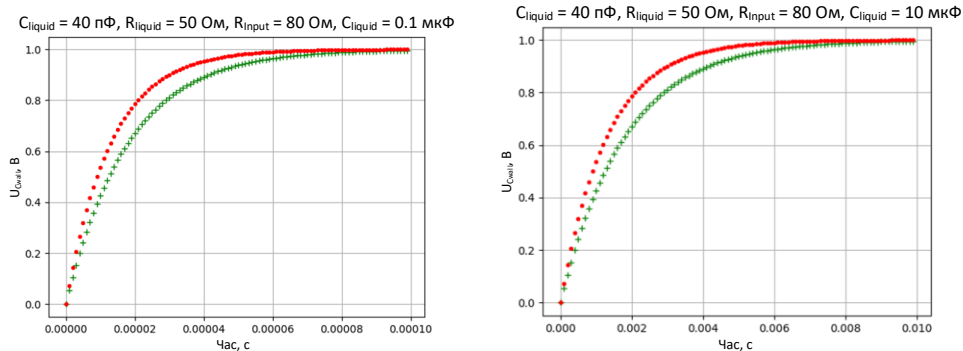


Рис. 6 Порівняння характеру перехідного процесу для двох комбінацій $R_{Liquid} \setminus C_{Liquid}$ для різних значень C_{Wall}

Як видно з рис. 6, зі зміною ємності стінки пропорційно змінюється як тривалість так і характер перехідного процесу.

Тому логічно зробити висновки, що для отримання достатньо різних значень напруг на R_{Input} необхідно проводити виміри при максимально менших значеннях опору R_{Input} та опорів контактів та при максимально можливих значеннях ємностей стінок (електродів приєднаних до стінок) посудини C_{Wall} .

Враховуючи ці дослідження, можна покращити ідентифікацію рідин з використанням генератора П – подібних сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Panasonic Develops Battery Management Technology to Measure Electrochemical Impedance of multi-cell stacked Lithium-Ion Batteries. [Panasonic], 2019. URL: <https://news.panasonic.com/global/press/data/2019/11/en191114-2/en191114-2.html>
- [2] Yunwei Zhang, Qiaochu Tang, Yao Zhang et al. Identifying degradation patterns of lithium-ion batteries from impedance spectroscopy using machine learning / Nature Communication **11**, 2020. – 1706. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15235-7>
- [3] Review—Recent Advances in Electrochemical Impedance Spectroscopy Based Toxic Gas Sensors Using Semiconducting Metal Oxides [V. Balasubramani, S. Chandraleka, T. Subba Rao], 2020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ab77a0>
- [4] Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications Third Edition [Evgenij Barsoukov, J. Ross Macdonald], 2017.

IMPEDANCE SPECTROSCOPY FOR SQUARE WAVES ON INFINEON MICROCONTROLLERS**Ya. Berko¹, A. Tsemko¹, M. Muliarchyk¹, V. Bihday², Z. Liubun¹**

¹ *Radio Physics and Computer Technologies Department,
Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine*

² *Infineon Technologies AG,*

Impedance spectroscopy is used to differentiate materials and define their properties. Impedance spectroscopy can be used in applications for lithium-ion batteries, gas, and liquid detectors, etc. The classical method of impedance spectroscopy is based on a large number of measurements of sinusoidal signals with different frequencies. IP for sinusoidal signal generation and measurement in microcontrollers is more expensive compared to square wave signals. Using the square wave signal impedance spectroscopy method on the microcontrollers require only one measurement, then several measurements on different sinusoidal signals. It reduces the number of calculations on the chip. The fewer calculations provide the ability to use this method for low-latency and low-energy products. The method of square wave impedance spectroscopy can be used in inexpensive mass-market applications. The key challenge for square wave impedance spectroscopy is to determine the correct scheme of the experimental system. The capacitance value of the container wall should be accurately measured and calculated. The method requires the constant known value of wall capacitance. For high accuracy measurements, input resistor and oscilloscope probes should have the least possible values of resistance, and the value of container wall capacitance should be the highest possible. It can be achieved by increasing the area of electrodes used on the container walls. After determining the measured curves and calculating the transition process of the system, it is possible to classify the liquids in the experimental container, with some limitations. Liquids with low values of conductivity have approximately similar transient process curves, which makes it more complicated to classify liquids by the transition curves. One way, to improve measured data is by using different integration times.

Key words: impedance spectroscopy, square wave, microcontrollers.

*Стаття: надійшла до редакції 02.02.2022,
прийнята до друку 11.04.2022*