

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ТА МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОМЕДИЧНИХ СИГНАЛІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено дослідженню засад часового та спектрального аналізу сигналів на прикладі вузькосмугових електричних біомедичних сигналів. Розглянуто особливості представлення сигналів у часовій і частотній областях та методи визначення їхніх параметрів. Проаналізовано застосування перетворення Фур'є для оцінювання спектральних характеристик і структури біомедичних сигналів.

Ключові слова: біомедичний сигнал, вузькосмуговий сигнал, часовий аналіз, спектральний аналіз.

Abstract

The paper investigates the principles of time-domain and spectral analysis of narrowband electrical biomedical signals. The features of signal representation in the time and frequency domains, methods for determining their main parameters, and signal discretization are studied. The application of discrete and fast Fourier transform techniques for determining spectral characteristics, amplitude-phase parameters, and processing electrocardiographic, electroencephalographic, and electromyographic signals is analyzed.

Keywords: biomedical signals, narrowband signals, time-domain analysis, spectral analysis, discrete Fourier transform, fast Fourier transform, biomedical signal processing.

Вступ

Біомедичні сигнали – сигнали, які у певній формі (електричній, звуковій, оптичній, механічній, біохімічній) відображають природу та перебіг процесів, які відбуваються у живому середовищі.

Особливістю вузькосмугових електричних сигналів є зосередження інформації (енергії сигналу) у визначеному вузькому діапазоні частот. Природні вузькосмугові біомедичні сигнали становлять меншу частку від їхньої загальної чисельності, адже такий сигнал повинен мати близьку до ідеальної гармоніки природу, тобто, формуватися періодичними фізіологічними процесами. Більшість вузькосмугових біомедичних сигналів формуються шляхом застосування певних маніпуляцій, в основному, фільтрації для виокремлення корисного спектру та усунення завад.

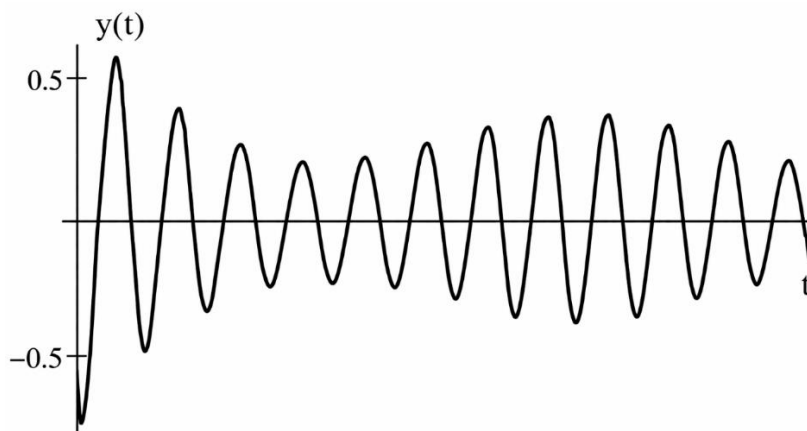


Рис. 1. – Типовий вузькосмуговий біомедичний сигнал

Метою роботи є аналіз принципів часового та спектрального аналізу як методів дослідження вузькосмугових електричних біомедичних сигналів.

Результати дослідження

Часовий аналіз передбачає вивчення зміни сигналу у часі [1] та є головним методом первинної діагностики сигналу. Таким чином можна оцінити амплітуду та форму сигналу, визначити часові характеристики сигналу (тривалість та частота імпульсів), виявити основні спотворення сигналу.

У часовому аналізі вузькосмуговий біомедичний сигнал розглядають як квазігармонічний:

$$x(t) = A(t) \cdot \sin[\omega_0(t) + \varphi(t)] \quad (1.1)$$

де: $x(t)$ – миттєве значення сигналу у момент часу t , A – повільно змінна амплітуда сигналу, ω_0 – центральна кутова частота сигналу, φ – миттєва фаза сигналу, яка повільно змінюється.

Тобто, спектр коливань досліджуваного зосереджений у вузькому діапазоні навколо ω_0 . Таке представлення сигналу використовується в електрокардіографії та електроенцефалографії для опису відповідних біологічних процесів (частота серцевих скорочень є стабільною величиною, а ритми головного мозку формуються у визначених діапазонах) [5].

Якщо досліджуваний вузькосмуговий біомедичний сигнал має форму, прийняту для часового аналізу, цю техніку практично здійснюють наступним чином:

- вимірювання амплітуди сигналу (його огинаючої);
- визначення миттєвої фази сигналу;
- аналіз форми сигналу.

Вимірювання амплітуди сигналу передбачає визначення його огинаючої складової, яка характеризує зміну інтенсивності сигналу у часі. Це виконується шляхом знаходження локальних максимумів сигналу або згладжуванням та фільтрацією. Одержана таким чином амплітуда дозволяє оцінити енергетичні характеристики сигналу, які є відображенням одночасних фізіологічних процесів (наприклад, зміна частоти серцевих скорочень або рівня м'язової активності)

Визначення миттєвої фази сигналу передбачає дослідження параметра $\varphi(t)$, який описує фазове положення сигналу у кожен момент часу [2]. Це виконується шляхом визначення часових зсувів або ж із використанням аналітичного сигналу. Миттєва фаза є ключовим елементом дослідження синхронності біологічних процесів, зокрема, під час формування електроенцефалограми на основі багатьох каналів сигналу.

Аналіз форми сигналу передбачає дослідження елементів часової структури сигналу, їхньої тривалості, амплітуди та взаємного розташування у часі. Це дозволяє виокремлювати піки, інтервали та комплекси сигналу, наприклад, зубці P, T та QRS під час електрокардіографії, ритмічні коливання під час електроенцефалографії.

Спектральний аналіз передбачає перетворення часової області сигналу (зміни сигналу у часі) на частотну (сукупності різночастотних гармонік, які відображають досліджуваний сигнал) [4]

Спектральний аналіз, в основному, здійснюють із використанням перетворення Фур'є [3]. Необхідною попередньою умовою є дискретизація аналогового сигналу:

$$x[n] = x(n \cdot T_s) = x\left(n \cdot \frac{1}{f_s}\right) \quad (2.1)$$

де: T_s – період дискретизації, f_s – частота дискретизації.

Далі дискретизований сигнал переводять від часової області до частотної:

$$f_k = \frac{k \cdot f_s}{N} \quad (2.2)$$

де: f_k – частота k -го спектрального компонента, f_s – частота дискретизації сигналу, k – номер поточного спектрального відліку, N – загальна кількість відліків сигналу.

Виконання сигналу може використовуватися перед застосуванням дискретного перетворення Фур'є для зменшення спектральних спотворень:

$$x_\omega[n] = x[n] \cdot \omega[n] \quad (2.3)$$

де: $x_\omega[n]$ – вікований сигнал, $x[n]$ – вхідний дискретний сигнал, $\omega[n]$ – віконна функція, n – номер поточного часового відліку.

Тоді, дискретне перетворення Фур'є виконується так:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.4)$$

де: $X(k)$ – сигнал у частотній області, $x(n)$ – сигнал у часовій області, n – номер поточного часового відліку, k – номер поточного спектрального відліку, N – загальна кількість відліків.

На практиці дискретне перетворення Фур'є здійснюється зі зменшенням обчислювальної складності (шляхом розбиття обчислень на менші підзадачі та завдяки повторному використанню проміжних результатів), що зветься швидким перетворенням Фур'є.

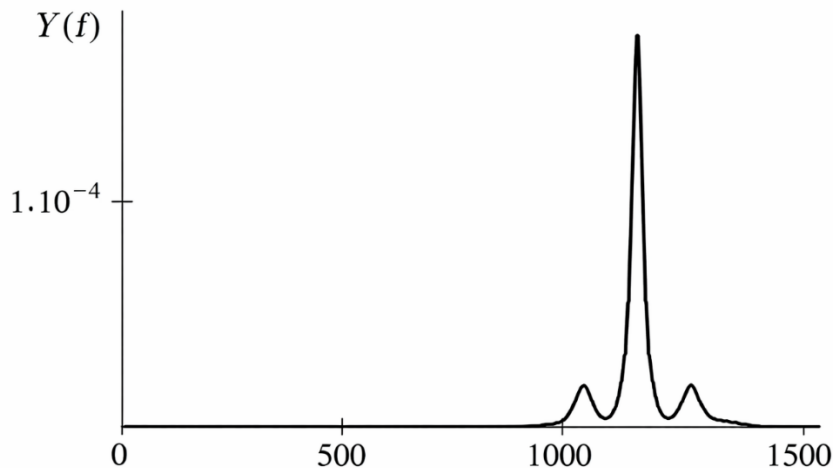


Рис. 2 – Типовий спектр вузькосмугового біомедичного сигналу після застосування перетворення Фур'є

Спектральний аналіз вузькосмугових біомедичних сигналів передбачає визначення таких спектральних характеристик:

- центральної частоти сигналу;
- ширини смуги пропускання;
- спектральної щільності потужності сигналу;
- наявності гармонік та шумів.

Центральна кутова частота вузькосмугового сигналу, зазвичай, є середньою для нього:

$$\omega_0 = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} \quad (2.5)$$

де: ω_{max} – максимальна межа спектру, ω_{min} – мінімальна межа спектру.

Ширина смуги пропускання вузькосмугового сигналу визначає діапазон частот, у межах якого зосереджена основна енергія сигналу:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2.6)$$

де: f_2 – верхня гранична частота сигналу, f_1 – нижня гранична частота сигналу.

Спектральна щільність потужності визначає розподіл енергії сигналу за частотами:

$$S(k) = \frac{1}{N} \cdot |X(k)|^2 \quad (2.7)$$

де: $X(k)$ – сигнал у частотній області, k – номер поточного спектрального відліку, N – загальна кількість відліків, $|X(k)|^2$ – енергія сигналу на частоті k .

Гармоніки сигналу відображають його періодичу сигналу та дозволяють оцінити його структуру. Для вузькосмугових біомедичних сигналів характерною є наявність основної гармоніки та незначної кількості вищих гармонік.

Шуми сигналу – компоненти спектра, які не мають чітко вираженої періодичності. У частотній області вони проявляються як фонові коливання та спотворюють корисний сигнал.

Практична реалізація спектрального аналізу для вузькосмугових біомедичних сигналів відбувається так:

- дискретизація сигналу;
- виконання дискретного або швидкого перетворення Фур'є;
- визначення спектральних характеристик сигналу.

Одержані спектральні характеристики дозволяють визначити основні параметри сигналу, оцінити його якість та визначити наявність завад. У біомедичній апаратурі спектральний аналіз використовується для обробки електрокардіографічних, електроенцефалографічних та електроміографічних сигналів, що дає змогу проводити діагностику відповідних фізіологічних процесів [5].

Висновок

Отже, часовий та спектральний аналіз є методами дослідження вузькосмугових електричних біомедичних сигналів. Часовий аналіз передбачає представлення цього сигналу як гармоніки з повільно змінними амплітудою та миттєвою фазою. Дослідження параметрів такого сигналу у часовій області дозволяє діагностувати біологічні процеси у живому середовищі за допомогою електрокардіографії, електроенцефалографії тощо. Спектральний аналіз передбачає визначення структури та параметрів біомедичного сигналу шляхом аналітичного переходу від часової до частотної області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гнатюк С. О. Методи аналізу та обробки сигналів. Львів : Львівська політехніка, 2018. 256 с.
2. Cohen L. Time-Frequency Analysis. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1995. 299 p.
3. Стрелковська І. В., Паскаленко В. М. Ряди Фур'є. Інтеграл Фур'є: навчальний посібник. – Одеса: Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, 2021.
4. Oppenheim A., Schaffer R. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. 1120 p.
5. Rangayyan R. M. Biomedical Signal Analysis. New York : IEEE Press, 2015. 720 p.

Гончар Богдан Віталійович – студент групи БМІ-22б, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Оксана Іванівна Тютюнник – канд. пед. наук, доцент кафедри вищої математики, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tutunnik.oksana@gmail.com

Bogdan Honchar – student of Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Oksana Tiutiunyk – PhD (Pedagogics), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tutunnik.oksana@gmail.com