

05.14.01 „Энергетические системы и комплексы” / Ерёмин О. И. – Н. Новгород, 2007. – 20 с.

4. Левицький С. М. Математична модель пристрою керування трансформатором поперечного регулювання напруги / С. М. Левицький // Тези доповідей X міжнародної наукової конференції «Контроль і управління в складних системах». – Вінниця. – 2010. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до каталогу : [http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/ukr/abstracts\\_UA.html](http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/ukr/abstracts_UA.html).

5. Францкевич Г. И. Нейросетевые и генетические модели и методы анализа данных / Г. И. Францкевич, А. А. Букарев, В. П. Костюк. // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2001. – № 4 (8). – С. 25–41.

6. Голубин А. В. Определение параметров генетического алгоритма с помощью программного комплекса "Gensearch" / А. В. Голубин. // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2004. – № 3 (19). – С. 42–47.

Надійшла 23.11.2010 р.

УДК 621.321

О.С. ПИВОВАР, Я.О. БОЖОК  
Хмельницький національний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ ПРОВІДНИКІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ БАГАТОШАРОВИХ ПЕЧАТНИХ ПЛАТ

*У статті розглядаються топологічні елементи фізичної реалізації печатних провідників високошвидкісних інтерфейсів в аспектах побудови шарової структури, диференційних ліній передач та вибору типу перехідних отворів. Визначено оптимальну структуру шарів. Запропоновано методику отримання оптимальної геометрії диференційної лінії передачі за заданим диференційним хвилевим опором. Проаналізовано можливості використання різних типів отворів в умовах швидкісної передачі сигналів.*

*In the article examined topological elements of physical realization of PCB traces of high-speed interfaces in the aspects of construction of the layered structure, differential transmission lines and choice of via type. The optimal structure of layers is certain. The methods of receipt of optimal geometry of differential line are offered after the set differential impedance. Possibilities of the use of different types of vias are analyzed in the conditions of high-speed transmission of signals.*

Ключові слова: багатошарова печатна плата, диференційна лінія передачі, диференційний опір.

### Вступ

Застосування печатної технології під час складання радіоелектронних вузлів домінує в сучасному виробництві радіоелектронної та цифрової апаратури. Більше того, виходячи із печатної технології розробляються корпусні елементи напівпровідникових інтегральних схем, резисторів, конденсаторів тощо. Постійно зростаючий рівень вимог швидкості та обсягу обробки інформації потребує збільшення носійних та тактових частот, а це вимагає удосконалення якісних характеристик компонентних комутацій як на внутрішньо платному, так і міжплатному і міжблочному рівнях. Прикладами таких ліній передачі є фізична реалізація універсальної послідовної шини IEEE-1394 (FireWire), інтерфейсів SATA (Serial ATA) і PCI Express тощо. Такі і подібні інтерфейси є наслідками переходу з паралельної архітектури на швидкісну послідовну архітектуру, що забезпечує високу пропускну здатність і надзвичайно великий потенціал за маштабованістю, але висуває надзвичайно високі конструкторські та технологічні вимоги до конструкції компонентних комутацій. Тому дослідження, спрямовані на удосконалення печатних плат як основних комутаційних елементів для систем максимальної швидкодії, залишаються актуальним завданням.

### Основна частина

Високошвидкісними інтерфейсами, зазвичай, називають інтерфейси із бітовим інтервалом по одиночній лінії менше 1 нс. Для їх фізичної реалізації печатна плата має бути багатошаровою, але забезпечувати мінімально необхідну кількість шарів, потрібних для формування найбільш стабільних і завадозахищених ліній зв'язку у вигляді смужкових диференційних ліній передачі. Кількість шарів печатної плати дуже сильно визначається іншими вимогами окрім вимог побудови високошвидкісних інтерфейсів, наприклад, кількістю напруг живлення, щільністю інших зв'язків, типом корпусів компонент і комутаційного устаткування тощо.

Визначимося із мінімальною кількістю шарів плати. Сучасні плати, виходячи із вимог мікромініатюризації, мають планарні елементи, що розташовуються на обох боках плати, таким чином, для встановлення планарних компонент потрібно 2 шари. Зваживши на те, що на платах будуть присутні високошвидкісні інтерфейси, ці два шари мають виконуватись у вигляді мікросмужкових ліній передачі заданого хвилевого опору, отже необхідно формувати ще 2 потенційних шари для утворення мікросмужкових ліній з обох боків встановлення компонент. Використавши обидві поверхні потенційного шару як екрани смужкової лінії і розташували між ними ще один шар провідників можливо отримати мінімально можливу шарову структуру для передавання даних високошвидкісними інтерфейсами із 5 шарів.

З точки зору виробництва утворити плату із непарної кількості шарів можливо, але не технологічно.

Зазвичай, використовують парну кількість шарів. Найчастіше, 6, 8, 10, 12-шарові плати, використавши відповідно 2, 3, 4 пластини двостороннього фольгованого склотекстоліту (CORE) із наскрізними, глухими або мікроотворами. Отже, мінімальною кількістю шарів для плат із високошвидкісними інтерфейсами є плата із 6 шарами, що знайшла найбільш широке використання. В САПР HyperLynx інтегровано середовище проектування шарової структури, в якому можливо оптимізувати плату з точки зору шарової структури і окремих параметрів провідного рисунку. Для подальшого моделювання і оптимізації використовуємо типову структуру шарів плати обчислювальних засобів із високошвидкісними інтерфейсами, представлена на рис. 1.

Усі лінії передачі високошвидкісних інтерфейсів є диференційними, і як вже вказувалось, їх намагаються переважно робити у вигляді смужкових ліній зв'язку із взаємодією парціальних провідників за меншим боком прямокутного перетину завдяки підвищеній заводо захищеності, стабільності параметрів і технологічності утворення провідників.

	Visible	Color	Pour Draw Style	Layer Name	Type	Usage	Thickness um	Er	Test Width um	Z0 ohm
1					Dielectric	Solder Mask	20	3.7		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Red	Solid	TOP	Metal	Signal	42	<Auto>	152.4	49.8
3					Dielectric	Substrate	100	4.3		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Orange	Solid	VCC	Metal	Plane	18	<Auto>	152.4	73
5					Dielectric	Substrate	150	4.3		
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Yellow	Solid	01	Metal	Signal	18	<Auto>	152.4	53.9
7					Dielectric	Substrate	300	4.3		
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Green	Solid	02	Metal	Signal	18	<Auto>	152.4	53.9
9					Dielectric	Substrate	150	4.2		
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Cyan	Solid	GND	Metal	Plane	18	<Auto>	152.4	73
11					Dielectric	Substrate	100	4.2		
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Blue	Solid	BOTTOM	Metal	Signal	42	<Auto>	152.4	50.2
13				=	Dielectric	Solder Mask	20	3.7		

Рис. 1. Структура шарів плати для проведення моделювання у середовищі HyperLynx 2008

Частина лінії зв'язку такої диференційної передавальної структури від драйвера до приймача проходить на зовнішніх шарах печатної плати. Отже, додатковою вимогою інтегральної цілісності сигналів є дотримання однакового заданого диференційного хвильового опору (найчастіше 100 Ом) вздовж лінії для мікросмужкової та смужкової лінії передачі (рис. 2).

Під час розробки сучасних плат, трасувальник отримує параметри ліній передачі у вигляді ширини провідників та зазорів між ними, а також розташування шарів, які змінювати забороняється. Занадто малі зазори між провідниками диференційної лінії призводять до різкої зміни диференційного опору внаслідок технологічних відхилень виробництва, а занадто великі не дозволяють використати всі переваги диференційної передачі сигналів, тому параметри слід обирати оптимальними, використовуючи вбудований у САПР калькулятор хвильового диференційного опору, який за заданою структурою плати обраховує діаграму "ширина провідника – зазор" для дотримання сталості диференційного опору (рис. 2).

Оптимальному розташуванню провідників диференційної лінії відповідає зона зламу характеристик графіка (рис. 2). Зазвичай, намагаються дотриматись як у мікросмужковій та смужковій лініях передачі однакової ширини провідника печатного рисунка, тому пропонується така методика оптимізації зазорів:

- 1) Здаються структурою печатної плати.
- 2) Обраховуються хвильові опори провідників як окремих недеференційних ліній.
- 3) Вибирається товщина діелектрика та ширина провідника, яку дозволяє реалізувати технологічне устаткування з умовою перевищення половини значення пошукуваного диференційного опору до 3-6%. Наприклад, якщо необхідно реалізувати диференційну лінію 100 Ом, то хвильовий опір поодинокого провідника має бути близько 53 Ом.

- 4) Будують діаграми (рис. 2) стабільного диференційного опору для диференційної лінії, що утворена такими провідниками.

- 5) Якщо встановлена раніше ширина провідників відповідає розташуванню в оптимальній зоні (зоні зламу характеристики, рис. 2), то використовують значення зазорів між провідниками, які вказано на діаграмах; якщо значення ширини провідника знаходять за межами оптимальних зон, то змінюють параметри шарової структури (товщину діелектрика, діелектричну проникненість і т.п.) та знову повторюють розрахунок.

В результаті оптимізації також мають враховуватись технологічні вимоги дискретності кроку лінійних розмірів, припустимих матеріалів та точності виготовлення елементів провідного рисунку. Основними перевагами методики оптимізації є:

- 1) Можливість локального розділення провідників диференційної лінії зв'язку без значної зміни диференційного опору для прокладання трас у складних місцях.
- 2) Більший ступінь рівномірності хвильового опору вздовж лінії, що забезпечує кращі показники інтегральної цілісності сигналів.
- 3) Зменшена номенклатура значень ширини провідників на усій печатній платі.

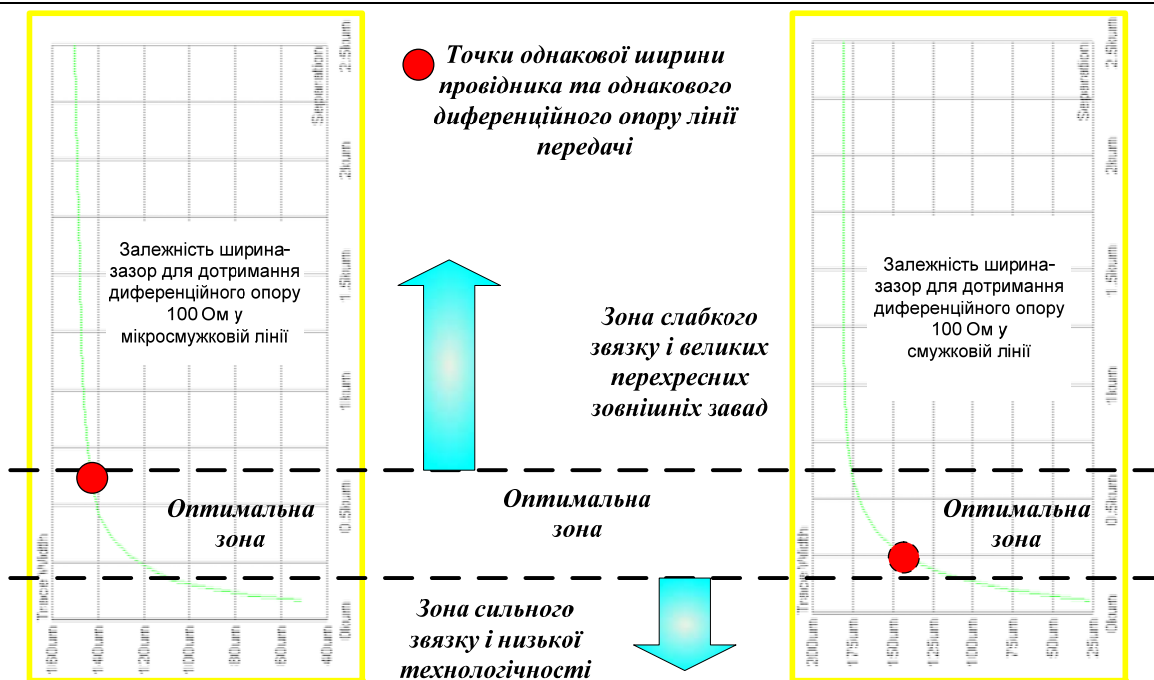


Рис.2. Діаграма сталого диференційного опору мікросмужкової (ліворуч) та смужкової лінії передачі (праворуч)

Таким чином, топологія типової лінії передачі високошвидкісного інтерфейсу складається із декількох диференційних ліній передачі:

- диференційної мікросмужкової лінії, вихід драйвера – перехідний отвір до внутрішнього шару плати;
- диференційної смужкової лінії передачі, що зв'язує два перехідні отвори, розташовані у безпосередній близькості від драйвера та приймача;
- диференційної мікросмужкової лінії передачі перехідний отвір – контактний майданчик термінатора;
- диференційної мікросмужкової лінії передачі контактний майданчик термінатора – вивід приймача.

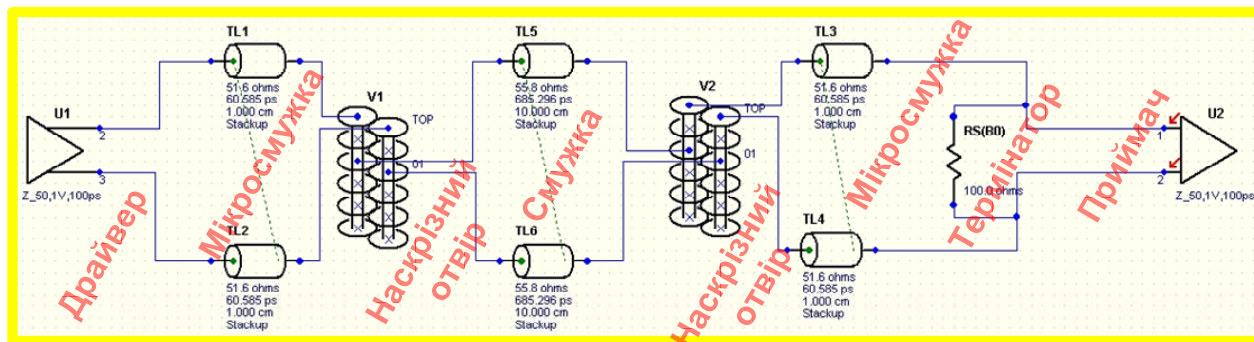
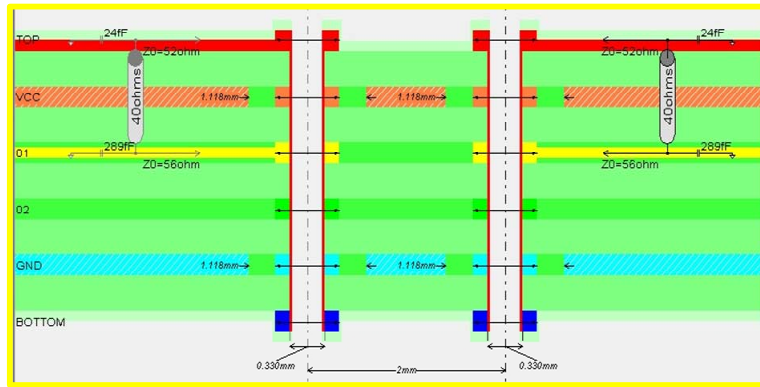


Рис.3. Схема емуляції диференційної лінії високошвидкісного інтерфейсу у середовищі HyperLynx 2008

У випадках використання внутрішнього термінатора (ODT-термінатор), що передбачено у багатьох ІС великого ступеня інтеграції сукупна лінія передачі спрощується, але залишається такий технологічний елемент як перехідний отвір. Інтуїтивно зрозуміло, що глухий перехідний отвір має кращі характеристики, але наскільки кращі, щоб замінювати наскрізні отвори? Для проведення моделювання використано САПР HyperLynx 2008 у режимі симуляції принципів схем LineSym (рис.3,4).

Параметри ліній передач відповідають шаровій структурі представленій на рис.1 та геометрії провідників, визначених за рис.2. Під час моделювання введено наступні припущення та обмеження:

- вважається, що приймач (U2) устатковано ODT термінатором;
- вважатимемо передавач (U1) ідеальним ключовим елементом, що створює трапецеїдальні імпульси;
- вихідний опір передавача і вхідний опір приймача ідеально узгоджено із лінією передачі (встановлена послідовно-паралельна термінація);
- всі параметри збуджуючих стимулів обрано виходячи із найбільш поширеного послідовного інтерфейсу PCI-Express (рис. 4, праворуч).



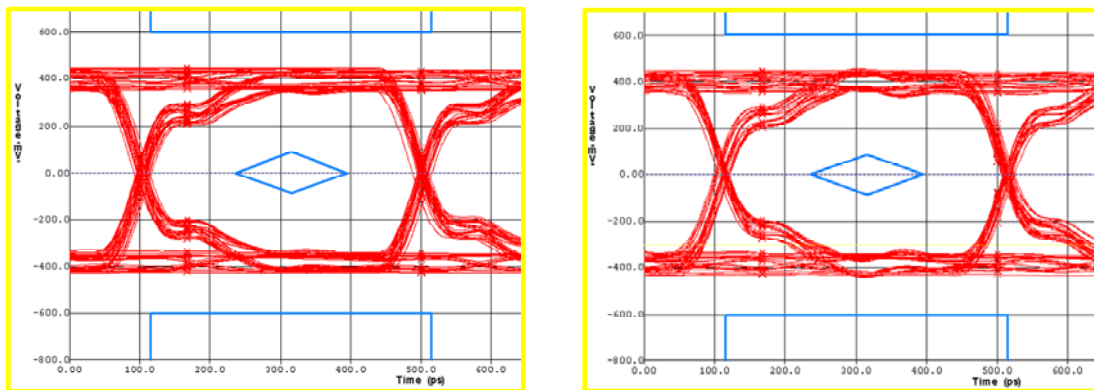
Бітовий інтервал	400 пс
Довжина фронту	100 пс +/- 1%
Вих. опір драйвера	50 Ом
Вхідний опір приймача	100 кОм
Вх./вих. ємність	1пф
Вх./вих. індуктивність	1нГ
Напруга живлення	1 В
Тестовий стимул	8b/10b PCI-e

Рис.4. Структура міжшарової наскрізної перетинки (ліворуч) та параметри тестового стимулу (праворуч) диференційної лінії високошвидкісного інтерфейсу у середовищі HyperLynx 2008

Зважаючи на багатофакторний характер впливу перехідних отворів на інтегральну цілісність сигналу за критерій наступного моделювання також треба брати деякий інтегральний показник. В таких випадках найбільш часто використовується ОКО-діаграма та її мінімаксні характеристики, в першу чергу, ширина та висота розкриву ОКА, або площа розкриву. Вимірювальні засоби САПР HyperLynx 2008 дозволяють точно оцінити ці значення.

Крім моделей ліній передачі слід також задатись моделями отворів. Для створення моделей використані типові значення геометричних параметрів отворів і контактних майданчиків, які використовуються для ліній PCI-Express материнських плат ПЕОМ (рис. 4, ліворуч).

Слід зазначити, що структура шарів 6-шарової печатної плати передбачає прокладання диференційних смужкових ліній лише в одному із у 3 або 4 шарів, залежно від того, на якому боці плати знаходяться драйвер та приймач. Якщо розташувати драйвер та приймач на різних боках плати, то можуть виникнути проблеми із протіканням зворотних струмів через шунтуючі конденсатори завдяки замиканню силових ліній електричного поля також і на потенційні шари.



Параметр	Глухі	Наскрізні
ОКО-ширина	383 пс	374 пс
ОКО- висота	730 мВ	690 мВ
ОКО- розкрив	+8%	0
ОКО- амплітуда	820 мВ	843 мВ
Розмах джитеру	25 пс	23 пс
Хвилевий опір отвору	39 Ом	40 Ом
Ємність отвору	0,092 пФ	0,313 пФ
Відносна затримка	0	+6пс

Рис. 5. ОКО-діаграми для ліній передачі із глухими (ліворуч) та наскрізними (центр) отворами та їх параметри відповідно (праворуч)

Результати моделювання є ОКО-діаграми та їх параметри, представлені на рис.5. Основним параметром, що спотворює характеристики ОКО-діаграми лінії передачі із наскрізними отворами порівняно із лінією передачі із глухими отворами є збільшена приблизно у 5 разів ємність міжшарової перетинки. Тим не менш ця ємність лишається приблизно у стільки ж саме разів меншою за ємності виводів і контактних майданчиків. Таким чином, в реальних умовах проектування, застосування менш технологічних глухих отворів замість більш дешевих наскрізних отворів доцільно лише у надшільних спеціальних проєктах печатних плат із високою протяжністю провідників та зменшеним бітовим інтервалом, де вплив будь-якої частини лінії передачі на якість роботи інтерфейсу може бути критичним.

Крім абсолютних параметрів впливу міжшарових перетинок на окрему диференційну лінію передачі слід також завжди приділяти увагу відносним системним параметрам передавання сигналів. В першу чергу, зважити на додаткову затримку сигналу, що може вплинути роботу інтерфейсів із групою високошвидкісних ліній передачі, фізична реалізація яких складається із декількох ліній, узгоджених між собою за довжиною, а вплив міжшарових перетинок може порушити це узгодження.

### Висновки

1. Визначено, що мінімальна структура багатшарової печатної плати в умовах використання високошвидкісних інтерфейсів і оптимальної технології виготовлення складається із шести шарів металізації, подібну структуру плати рекомендовано використовувати для емуляції роботи високошвидкісних інтерфейсів у середовищах САПР.

2. Запропоновано методіку визначення параметрів слабкозв'язаної диференційної лінії передачі, що полягає в ітераційній процедурі визначення залежності диференційного опору за допомогою САПР HyperLynx 2008 та перевірки результатів за допомогою щільності силових ліній поля перетину лінії передачі.

3. За допомогою САПР HyperLynx 2008 проаналізовано вплив наскрізних та глухих отворів на якість передачі сигналів високошвидкісних інтерфейсів. Визначено, що основним фактором впливу є суттєве (близько 5 разів) збільшення ємності міжшарової перетинки, що призводить до додаткової затримки у декілька піко секунд.

### Література

1. Джонсон Говрад В. Мартин. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии / Джонсон Говрад В., Грэхем, Мартин. [пер. с англ.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006, - 624с.:ил. – Парал. тит. англ.
2. Джонсон Говрад В. Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии / Джонсон Говрад В. [пер. с англ.]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005, - 1024с.:ил. – Парал. тит. англ.

Надійшла 26.11.2010 р.

УДК 681.327

М.О. ПРОКОПОВА, Т.І. КОЗЛОВСЬКА, А.М. КОЗАК, К.І. КРАВЦОВ

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФУР'Є ПЕРЕТВОРЕННЯ

*У даній роботі розглянуто основні властивості та принципи Фур'є-перетворення, розроблений алгоритм та програмне забезпечення на основі швидкого перетворення Фур'є, а також промодельовано метод визначення відхилення від норми фотоплетизмографічного сигналу на основі нормального Гаусівського розподілу.*

*Basic properties and principles of Fourier-transformation are considered in this article, is developed algorithm and program on the base of fast Fourier transformation, and was simulated the method of determination of deviation from the norm of photoplethysmographic signal, on the base of normal Gaussian distribution.*

Ключові слова: фур'є-перетворення.

### Вступ

На даному етапі розвитку сучасної медицини постає проблема розв'язання діагностичних задач, задач компресії, архівації та передачі інформації про досліджуваний біосигнал, а також підвищення його якості. Більшість сигналів, що зустрічаються на практиці (фотоплетизмограма, електрокардіограма, фонокардіограма, реограма, сфігмограма та ін.) представлені в часовій області [1, 2]. Тобто сигнал є функцією часу і ми отримуємо його в амплітудно-часовій формі. Але для більшості випадків обробки сигналів такий вигляд є не завжди інформативним, оскільки дуже часто найбільш важлива інформація прихована в частотній області сигналу. Частотний спектр є сукупністю частотних (спектральних) компонент і відображає наявність тих чи інших частот в сигналі. Тому до сигналів застосовуються математичні