

УДК 621.317

Ю.О. Крихтін

Військова частина А0785

КРИТЕРІЇ СИНТЕЗУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ З НОРМОВАНИМ СПЕКТРОМ

Наведено основні вимоги до сигналів з нормованим спектром (СНС) та до калібраторів (мір) СНС. Узагальнено відомості щодо найбільш розповсюджених видів СНС, а також подано їх класифікацію.

вимірювальний сигнал з нормованим спектром, критерії синтезу, класифікація

Вступ

Постановка задачі. Процес вимірювання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) селективних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), а також ідентифікації лінійних динамічних систем (ЛДС) в частотній області ґрунтується на застосуванні вимірювальних сигналів, спектр яких складається з однієї або декількох гармонік нормованих (заданих) амплітуд [1, 2]. Постановка задачі синтезу таких СНС потребує визначення конкретних критеріїв їх оптимальності, адже особливості досліджуваних систем, методика вимірювань, властивості апаратури, яка приймає участь у вимірюваннях, вплив зовнішніх факторів тощо накладають певні обмеження на деякі параметри сигналу. Так, наприклад, існують обмеження на амплітуду тестових впливів, обумовлені тим, що досліджувана система має певний динамічний діапазон, і в тому разі, коли амплітуда СНС перевищує допустимий рівень вхідних сигналів ЛДС, така система може вийти з лінійного режиму роботи [3].

Аналіз останніх публікацій. У ряді робіт, таких, як [1, 4 – 7], наведено окремі критерії синтезу СНС. Основними з них є виділення максимальної потужності в діапазоні частот аналізу та досягнення мінімального значення коефіцієнта амплітуди сигналу. Практичне застосування СНС, оптимального за обома даними критеріями, приводить до максимізації відношення сигнал/шум, а отже, до підвищення завадозахищеності та зменшення похибки вимірювань. Проте недостатньо висвітленими є вимоги щодо апаратурної реалізації калібраторів (мір) вимірювальних сигналів.

Крім того, з урахуванням огляду галузей застосування різноманітних видів СНС [8] доцільно розробити класифікацію сигналів, в основі якої буде покладено характер спектра та форма СНС.

Отже, **метою статті** є узагальнення відомостей про особливості застосування, переваги та недоліки різноманітних сигналів з нормованим спектром, а також подання розширеної класифікації СНС та основних вимог до них.

Основна частина

Форма та спектральний склад вимірювальних сигналів обумовлюються призначенням калібраторів та повинні задаватися в кожному конкретному випадку застосування СНС. Тому аналіз різноманітних вимірювальних сигналів, що можуть застосовуватися для метрологічного обслуговування та ідентифікації лінійних систем, доцільно проводити оцінкою відповідності їх певному набору критеріїв.

З цією метою розглянемо сигнали з нормованим спектром для вимірювання АЧХ досліджуваних лінійних динамічних систем та наведемо класифікацію критеріїв оптимальності таких сигналів (рис. 1).

Відповідно до рис. 1, окрім очевидних критеріїв, таких, як точність відтворення амплітуд гармонік, максимум корисної потужності сигналу тощо, є вимога до нерівномірності амплітуд спектральних складових на частотах аналізу. При цьому варто зазначити, що дана вимога є бажаною, оскільки в такому разі спектр вихідного сигналу буде пропорційним до АЧХ досліджуваної системи.

Найбільшої ваги цей критерій набуває під час проведення візуального частотного аналізу, наприклад, при визначенні АЧХ аналізаторів спектра, тобто коли відлік проводиться за показами на екрані приладу. І навпаки, до нерівномірності не висувають жорстких вимог, якщо вихідний сигнал об'єкта контролю подається на аналого-цифровий перетворювач, та подальшу його обробку здійснює обчислювальний пристрій.

Найбільш актуальними серед вимог до апаратурної реалізації калібатора СНС є простота схематичних рішень, мінімальні масогабаритні показники, універсальність, а також спряження калібатора з персональним комп'ютером та створення діалогового інтерфейсу „оператор – калібратор”, що забезпечує зручність у користуванні калібрувальною апаратурою, підвищує оперативність визначення характеристик лінійних динамічних систем та зменшує час на перебудову параметрів калібатора.



Рис. 1. Критерії синтезу сигналів з нормованим спектром для вимірювання АЧХ ЛДС

Класифікація СНС, що синтезуються існуючими калібраторами та можуть застосовуватися

для визначення АЧХ лінійних систем, подана на рис. 2.

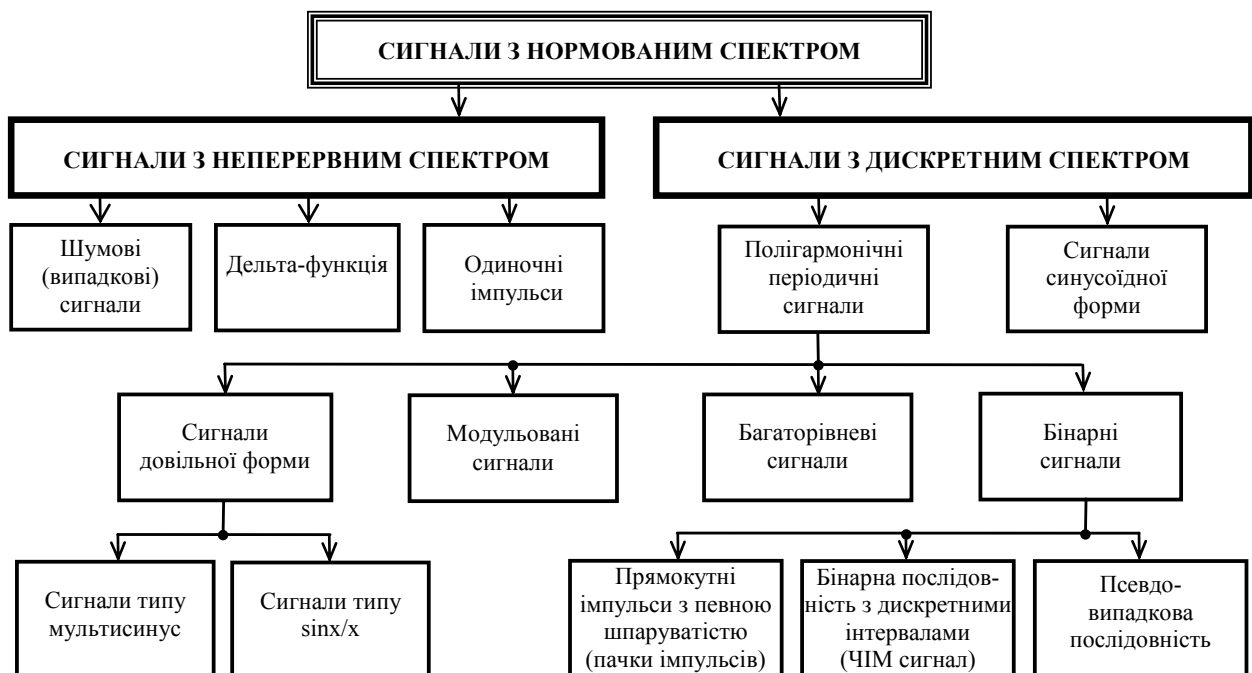


Рис. 2. Класифікація сигналів з нормованим спектром

Відомо, що комплексний коефіцієнт передачі будь-якої ЛДС пов'язаний з її імпульсною характеристикою перетворенням Фур'є, тому в задачах частотної ідентифікації ЛДС деякого поширення серед сигналів з неперервним спектром набули сигнали

типу дельта-функції та одиначного стрибка [4, 7, 9]. Проте ефективність практичного використання таких СНС обмежується достатньо великою чутливістю їх до завад. Крім того, під час синтезу сигналу типу дельта-функція, що є, фактично, математичною

ідеалізацією, виникають складнощі, пов'язані з неможливістю його технічної реалізації в чистому вигляді. Останній факт може привести до недопустимих похибок оцінювання параметрів ЛДС.

Випадкові СНС типу "білий шум", що мають прямокутну АЧХ, також не позбавлені певних недоліків: подібні СНС мають низький показник "відношення сигнал/шум" та їх застосування потребує значного часу усереднення результатів, що призводить до зниження оперативності вимірювань.

Виходячи з цих обставин, найбільший інтерес в галузі метрологічного обслуговування ЗВТ та ідентифікації ЛДС викликають калібратори періодичних вимірювальних сигналів, які мають дискретний характер амплітудно-частотного спектра. У порівнянні з іншими видами сигналів вони мають підвищену завадозахищеність, більший коефіцієнт використання потужності, більш високу точність відтворення амплітуд спектральних складових і позбавлені певних труднощів при формуванні. До того ж, дотриманням певних умов при цифровому спектральному аналізі періодичних вимірювальних СНС, а саме: обмеженням смуги частот сигналу перед дискретизацією та вибіркою миттєвих значень на протязі цілого числа періодів, можливо значно знизити похибки через так звані накладання та витік спектральних компонентів, притаманних швидкому перетворенню Фур'є будь-яких СНС.

Аналіз сигналів з дискретним характером амплітудно-частотного спектра показав, що серед них найбільшого розвитку отримали сигнали синусоїдної (квазісинусоїдної) форми [2, 8, 10]. Відомі недоліки їх практичного застосування, обумовлені великою трудомісткістю калібрувальних робіт і складністю точної та автоматичної перебудови параметрів калібратора синусоїдної напруги, не задовольняють сучасні вимоги щодо якості та оперативності проведення метрологічного обслуговування ЛДС.

Саме тому значну увагу під час аналізу сигналів з нормованим спектром доцільно приділити розгляду полігармонічних СНС, спектральний склад яких у кожен момент часу представлений більш ніж однією гармонікою [2]. До СНС даної групи належать модульовані сигнали, багаторівневі СНС, сигнали бінарної та довільної форм.

Серед модульованих СНС для вимірювання АЧХ можуть використовуватися амплітудно-модульовані та частотно-модульовані сигнали з гармонічною модуляцією, лінійно-частотно-модульовані та СНС з імпульсною амплітудною модуляцією [3, 9, 11, 12]. Основним недоліком методів синтезу амплітудно- та частотно-модульованих коливань є те, що для отримання відносної похибки відтворення спектра порядку 1 % необхідно використовувати зразкові установки для перевірки вимірювачів амплітудної та частотної модуляції, а це не зав-

жди можливо. Тому застосування модульованих вимірювальних сигналів доцільне переважно в області високих і надвисоких частот, а також у стаціонарних умовах метрологічних лабораторій. До того ж, застосування лінійної частотної модуляції потребує збільшення часу вимірювань з метою уникнення перехідних процесів та зменшення нерівномірності амплітуд гармонік СНС [9].

У той самий час загальновідомі переваги цифрової вимірювальної техніки відкривають широкі можливості для методів цифрового алгоритмічного синтезу вимірювальних сигналів зі спектральним складом, що потребується. Оригінальним є цифровий метод формування сигналів довільної форми з квазіпрямокутним дискретним спектром на основі застосування функції $\sin x/x$ та її перетворення Гільберта [9], однак його основною вадою є достатньо велике значення нерівномірності спектра (порядку 3% для вимірювального СНС, що містить 30 спектральних складових). Даний сигнал доцільно використовувати при вимірюванні АЧХ ЛДС, в яких всі гармоніки – з першої по тридцяту – є корисними. У протилежному разі, застосування такого СНС призведе до низького коефіцієнта використання потужності. Іншим суттєвим недоліком сигналу є його слабка завадозахищеність, обумовлена достатньо великим значенням коефіцієнта амплітуди, що призводить до низького значення показника "відношення сигнал/шум".

Серед СНС довільної форми найбільшого поширення отримали сигнали типу мультисинус, що являють собою суму заданої кількості гармонічних складових з певними значеннями амплітуд та фаз [1, 3, 5, 7, 13]. Широкий спектр галузей застосування СНС такого виду обумовлюється достатньо розвинутою теорією їх синтезу не тільки на низьких та інфранизьких частотах, а й у мікрохвильовому діапазоні. Мультисинус, окрім притаманних йому корисних властивостей періодичних СНС, має, в порівнянні з іншими видами вимірювальних сигналів довільної форми, значно покращені характеристики спектра, зокрема, максимальну корисну потужність та можливість управління фазами спектральних складових з метою обмеження амплітуди сигналу в часовій області або, що те саме, досягнення мінімуму коефіцієнта амплітуди й підвищення завадозахищеності. Використання парних або непарних СНС типу мультисинус дозволяє уникнути складних розрахунків, підвищити оперативність отримання потрібних параметрів сигналу та, на підставі симетричності таких СНС, удвічі скоротити обсяг пам'яті даних калібратора [5]. Останній факт є дуже суттєвим у тих випадках, коли потрібно досягти мініатюризації калібрувальної апаратури при одночасному підвищенні її універсальності, тобто в одному корпусі зберігати декілька сигналів.

Нарешті, розглянемо сигнали бінарної форми, достатньо поширені серед полігармонічних СНС, до основних переваг яких відносять найбільшу за всіх сигналів завадозахищеність. Такі СНС мають найнижчий серед усіх відомих сигналів коефіцієнт амплітуди, який дорівнює одиниці, що забезпечує при будь-якому рівні завади високий показник “відношення сигнал/шум”. Крім того, при виготовленні калібратора не потребується значних апаратурних витрат, оскільки апаратурна реалізація СНС бінарної форми є найпростішою, що досить суттєво в сучасних умовах.

Спектральні властивості традиційних форм бінарних сигналів, таких, як прямокутна послідовність імпульсів з фіксованою шпаруватістю, меандр та їх різновиди, достатньо досліджені в технічній літературі, проте їх практичне застосування під час метрологічного обслуговування та ідентифікації ЛДС зазнає певних обмежень [14]. Даний недолік пов'язаний з неможливістю гнучкого управління спектральним складом синтезованого СНС.

Псевдовипадкова послідовність також не є оптимальною за критерієм максимуму використання потужності, проте її доцільно застосовувати у тих випадках, де потрібно проводити вимірювання за умови великої щільності контрольних частот в певному частотному діапазоні на обмеженому інтервалі часу та при нежорстких вимогах щодо точності вимірювань [1, 3, 4].

Серед наведених на рис. 2 різновидів бінарних вимірювальних сигналів найбільш перспективними є часоімпульсно-модульовані (ЧІМ) СНС, або, що те саме, бінарні послідовності з дискретними інтервалами [1]. Спектральним складом таких сигналів можна достатньо ефективно управляти за рахунок зміни їх точок переключення [5]. Останнє дозволяє отримувати вимірювальні СНС з максимальною корисною потужністю та нерівномірністю амплітуд спектральних складових порядку 10^{-4} % (без урахування похибок відтворення сигналу).

Деякі корисні властивості вимірювальних ЧІМ сигналів та СНС типу мультисинус поєднують у собі багаторівневі сигнали [6], однак за критеріями завадозахищеності та простоти формування найкращими є бінарні вимірювальні СНС.

Висновки

Розглянуто основні критерії синтезу вимірювальних сигналів з нормованим спектром, які уявляють собою вимоги як до самих СНС, так і до апаратурної реалізації калібраторів. Дані критерії в сукупності з наведеною класифікацією СНС дозволять розробникам калібрувальної апаратури, а також дослідникам у галузі частотної ідентифікації найбільш повно врахувати сучасні тенденції розвитку мікросхемотехніки, правильно обрати вид сигналу відпові-

дно до поставленої задачі та уникнути певних похибок експерименту. З метою розвитку частотного підходу в галузі метрологічного обслуговування та ідентифікації ЛДС подальші дослідження доцільно спрямувати на пошук нових, більш ефективних, сигналів, а також нових методів обробки результатів експериментальних досліджень.

Список літератури

1. Kollár I. *Frequency Domain System Identification Toolbox User's Guide*. – Natick, MA: The MathWorks Inc., 1995. – 232 p.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. Simon G., Schoukens J. Robust broadband periodic excitation design // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2000. – Vol. 49, № 2. – P. 270-274.
4. Nelles O. *Nonlinear system identification. From classical approaches to neural networks and fuzzy models*. – Berlin: Springer, 2001. – 785 p.
5. Чинков В.М., Крихтін Ю.О. Цифрові методи синтезу полігармонічних сигналів з нормованим спектром // *Український метрологічний журнал*. – 2006. – № 2. – С. 23-29.
6. Tan A. H., Godfrey K.R. An improved routine for designing multi-level multi-harmonic signals // *Proc. UKACC International Conference "Control 2004"*. – Bath (UK). – 2004. – P. 96-100.
7. Van den Broeck T, Pintelon R., Barel A. Design of a microwave multisine source using allpass functions estimated in the Richards domain // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1994. – Vol. 43, № 5. – P. 1-20.
8. Чинков В.М., Крихтін Ю.О. Застосування сигналів з нормованим спектром для метрологічного забезпечення засобів вимірювальної техніки // *Збірник наукових праць Одеського ордену Леніна інституту Сухопутних військ*. – Одеса: ООЛІСВ. – 2006. – Вип. 12. – С. 132-135.
9. Любчик В.Р. Вимірювання частотних характеристик радіосигналами з прямокутною обвідною спектра: Дис...канд. тех. наук: 05.11.08. – Вінниця, 2001. – 174 с.
10. Анализаторы спектра последовательного действия. Методика поверки: МИ 1201 – 86. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 24 с.
11. Славинський С.І. Розробка методів та засобів для метрологічного забезпечення аналізаторів спектру електричних сигналів (послідовної дії): Дис...канд. тех. наук: 05.11.15. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2000. – 257 с.
12. Павленко Ю.Ф., Славинський С.І. Вопросы метрологического обеспечения анализаторов спектра // *Український метрологічний журнал*. – 1999. – № 3. – С. 35 – 42, № 4. – С. 23-26.
13. Mozeson E., Levanon N. Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio // *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.* – 2003. – Vol. 150, № 2. – P. 71-77.
14. Бойченко В.Д. Исследование возможности поверки анализаторов спектра по сигналам с нормированным спектром: Дис...канд. тех. наук: 05.11.08. – М., 1981. – 183 с.

Надійшла до редколегії 19.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.