621.37
О-75

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

ОСНОВНІ ВИДИ СИГНАЛІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У БАЗОВИХ ЗРАЗКАХ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ОЗБРОЄННЯ

Харків
2023

УДК 621.372 (075.8)
О 75

Рекомендовано до друку вченою радою Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (протокол № 18 від 24.12.2019.)

Автори: В. А. Степаненко, А. С. Кійко, А. І. Нос, А. М. Коржов, О. В. Лукашук

Рецензенти: Головний науковий співробітник ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна НАН України, чл.-кор. НАН України, с.н.с. О. Омельянчук.
Завідувач кафедри мультимедійних інформаційних технологій та систем НТУ «ХПІ» д.т.н., професор С. Порошин.
Професор кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України д.т.н., професор О. Кондратенко.

О 75 **Основні** види сигналів та їх застосування у базових зразках радіолокаційного озброєння: підручник для курсантів та студентів вищих навчальних закладів/ В. А. Степаненко, А. С. Кійко, А. І. Нос та ін. – Х. : ХНУПС, 2023. – 408 с.

Підручник містить класифікацію та характеристики детермінованих (із прикладами застосування у зразках військової техніки ЗСУ) та випадкових сигналів, питання їх перетворення у лінійних, параметричних та нелінійних колах, у тому числі принципи оптимальної фільтрації корисного сигналу на фоні шумів та характеристики оптимальних фільтрів за критерієм максимуму відношення сигнал/шум і методику побудови схем таких фільтрів. Підручник призначений для курсантів радіотехнічних спеціальностей і може використовуватися студентами та слухачами, які навчаються за відповідними напрямками.

УДК 621.372 (075.8)

© Степаненко В. А., Кійко А. С., Нос А.І., Коржов А.М., Лукашук О.В., 2023

© Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2023 р

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ..... 10
ПЕРЕДМОВА..... 11
1. ДЕТЕРМІНОВАНІ СИГНАЛИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ..... 12
1.1. Загальні відомості про сигнали. Спектральне подання сигналів... 12
1.1.1. Класифікація сигналів..... 12
1.1.2. Спектральне подання періодичних сигналів та сигналів із обмеженою тривалістю..... 18
1.1.3. Опис неперіодичних сигналів (сигналів із обмеженою тривалістю)..... 22
1.2. Частотні спектри сигналів, які не інтегруються..... 24
1.2.1. Частотний спектр дельта-функції..... 24
1.2.2. Частотний спектр функції включення..... 26
1.2.3. Спектри гармонічних коливань..... 28
1.2.4. Спектр довільного періодичного сигналу..... 31
1.3. Частотні спектри одиночних відеоімпульсів..... 33
1.3.1. Спектр прямокутного відеоімпульсу..... 33
1.3.2. Частотний спектр відеоімпульсу трикутної форми..... 38
1.3.3. Спектри дзвоноподібного імпульсу та виду $\sin(x)/x$ 42
1.4. Частотні спектри періодичних послідовностей відеоімпульсів..... 49
1.4.1. Спектр періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів..... 49
1.4.2. Спектр послідовності відеоімпульсів трикутної форми..... 55
1.4.3. Спектр послідовності дзвоноподібних відеоімпульсів..... 58
1.4.4. Спектр послідовності імпульсів виду $\sin(x)/x$ 60
1.4.5. Визначення впливу параметрів періодичної послідовності на її спектр..... 62
1.5. Частотні спектри сигналів з амплітудною модуляцією..... 65
1.5.1. Поняття про сигнали з амплітудною модуляцією..... 65
1.5.2. Частотні спектри одно- та багатотональних АМ сигналів..... 66
1.5.3. Зв'язок спектра АМ сигналу зі спектром обвідної..... 70
1.6. Частотні спектри одиночних та періодичних послідовностей радіоімпульсів..... 73
1.6.1. Зв'язок спектра одиночних і періодичних послідовностей радіоімпульсів зі спектром обвідної амплітуд..... 73
1.6.2. Частотні спектри одиночних радіоімпульсів..... 74
1.6.3. Частотні спектри періодичних послідовностей радіоімпульсів 80
1.7. Частотні спектри пачок відео- та радіоімпульсів..... 86
1.7.1. Частотний спектр пачки відеоімпульсів..... 87
1.7.2. Частотний спектр пачки радіоімпульсів..... 90
1.7.3. Спектр періодичної послідовності пачок відео- та радіоімпульсів..... 92
1.8. Сигнали з кутовою модуляцією та їх спектри..... 95

1.8.1. Сигнали з кутовою модуляцією..... 95
1.8.2. Частотні спектри сигналів при однотональній кутовій модуляції..... 99
1.8.3. Поняття про спектр сигналу при багатотональній кутовій модуляції..... 104
1.9. Частотні спектри сигналів складної структури..... 105
1.9.1. Радіоімпульси з лінійною частотною модуляцією та їх спектри..... 105
1.9.2. Радіоімпульси з фазовою маніпуляцією та їх спектри..... 109
1.10. Кореляційний аналіз детермінованих сигналів..... 113
1.10.1. Автокореляційна функція одиночного сигналу..... 114
1.10.2. Автокореляційна функція періодичного сигналу..... 116
1.10.3. Взаємна кореляційна функція..... 116
1.10.4. Енергетичний спектр..... 117
2. АНАЛІЗ ПРОХОДЖЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ ЧЕРЕЗ ЛІНІЙНІ КОЛА..... 119
2.1. Спектральний метод аналізу проходження сигналів через лінійні кола..... 120
2.1.1. Зв'язок між спектрами на вході і виході лінійного кола..... 120
2.1.2. Комплексна обвідна радіосигналу..... 125
2.1.3. Зв'язок між комплексною функцією кола та його часовими характеристиками..... 126
2.2. Проходження амплітудно-модульованого сигналу через коливальний контур..... 128
2.2.1. Аналіз проходження однотонального амплітудно-модульованого сигналу через коливальний контур..... 131
2.2.2. Проходження багатонального амплітудно-модульованого сигналу через коливальний контур..... 135
2.3. Проходження частотно-модульованого сигналу через коливальний контур..... 137
2.3.1. Методи аналізу проходження ЧМ сигналів через лінійні кола 137
2.3.2. Проходження ЧМ сигналу через селективне коло при умові $\omega_0 = \omega_p$ 139
2.3.3. Проходження ЧМ-сигналу через селективне коло при умові $\omega_0 \neq \omega_p$..... 140
2.3.4. Поняття про частотні характеристики кола, яке не спотворює форму сигналу..... 142
2.4. Часовий метод аналізу проходження сигналів через лінійні кола 145
2.4.1. Визначення реакції кола на довільний вплив з використанням перехідної характеристики кола..... 145
2.4.2. Визначення реакції кола на довільний вплив при використанні імпульсної характеристики..... 148

2.5. Часовий метод аналізу проходження радіосигналів через лінійні кола 153
2.5.1. Застосування інтегралів накладення для визначення комплексної обвідної радіосигналу на виході кола 153
3. ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИГНАЛІВ У НЕЛІНІЙНИХ І ПАРАМЕТРИЧНИХ КОЛАХ 160
3.1. Характеристики нелінійних елементів і основні властивості нелінійних кіл 160
3.1.1. Поняття про нелінійні елементи і кола, їх основні властивості 160
3.1.2. Параметри нелінійних елементів і апроксимація їх характеристик 162
3.1.3. Аналіз відгуку нелінійного елемента на вплив гармонічних коливань 165
3.2. Основні види перетворень детермінованих сигналів у нелінійних колах 169
3.2.1. Випрямлення змінного струму 169
3.2.2. Нелінійне підсилення коливань. Принцип побудови резонансного підсилювача в нелінійному режимі 171
3.2.3. Множення частоти 172
3.2.4. Детектування амплітудно-модульованих коливань 173
3.3. Детектування сигналів із кутовою модуляцією 177
3.3.1. Детектування сигналів із частотною модуляцією 178
3.3.2. Детектування сигналів з фазовою модуляцією 181
3.4. Основні види перетворень детермінованих сигналів у нелінійних колах 183
3.4.1. Реакція нелінійного кола на вплив суми гармонічних коливань 183
3.4.2. Амплітудна модуляція 184
3.4.3. Перетворення частоти (гетеродинування) 187
3.5. Поняття про лінійне параметричне коло. Основні характеристики 190
3.5.1. Поняття про лінійне параметричне коло 190
3.5.2. Частотна характеристика параметричного кола 191
3.5.3. Визначення імпульсної характеристики параметричного кола 194
3.6. Поняття про лінійне параметричне коло з реактивним елементом 199
3.6.1. Параметричний опір 199
3.6.2. Синхронне детектування 202
3.6.3. Поняття про лінійне параметричне коло з реактивним елементом 203
3.6.4. Загальні енергетичні співвідношення. Еквівалентна схема параметричної ємності 204
3.6.5. Одноконтурний параметричний підсилювач 207

4. ЕЛЕМЕНТИ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ 209
4.1. Кола зі зворотними зв'язками 209
4.1.1. Загальні поняття про підсилювачі 209
4.1.2. Зворотні зв'язки в підсилювачах 209
4.1.3. Загальна схема та параметри підсилювача 211
4.1.4. Стійкість систем зі зворотним зв'язком 215
4.2. Автогенератори гармонічних коливань 217
4.2.1. Принципи генерування гармонічних коливань 218
4.2.2. Схема автогенератора з трансформаторним зворотним зв'язком і принцип її роботи 219
4.2.3. Диференційне рівняння автогенератора 222
4.3. Режими роботи автогенератора 223
4.3.1. Режим самозбудження. Лінійна теорія самозбудження автогенератора 224
4.3.2. Стаціонарний режим роботи автогенератора. Квазілінійна теорія 227
4.3.3. Визначення амплітуди стаціонарних коливань 228
4.4. Режими самозбудження автогенератора 231
4.4.1. М'який режим самозбудження автогенератора 231
4.4.2. Жорсткий режим самозбудження автогенератора 233
4.4.3. Діаграма Ламерея 235
4.5. Поєднання переваг м'якого і жорсткого режимів самозбудження 237
4.6. Елементи теорії синтезу лінійних частотних реактивних фільтрів .. 238
4.6.1. Загальні відомості з теорії синтезу лінійних електричних кіл .. 239
4.6.2. Апроксимація АЧХ електричних фільтрів 240
4.6.3. Синтез електричних фільтрів 244
4.7. Активні *RC*-фільтри 247
4.7.1. Поняття операційного підсилювача (ОП) 247
4.7.2. Стійкість систем з операційним підсилювачем 248
4.7.3. Активні *RC*-фільтри з однопетльовим зворотним зв'язком 249
4.7.4 . Масштабний підсилювач, ФНЧ, ФВЧ, інтегратор 251
5. КВАНТОВАНІ СИГНАЛИ ТА ЇХ ПЕРЕТВОРЕННЯ 255
5.1. Властивості й характеристики квантованих сигналів 255
5.1.1. Класифікація сигналів 257
5.1.2. Дискретний сигнал і його спектр 259
5.1.3. Зв'язок між сигналами різних типів. Теорема Котельникова ... 261
5.1.4. Відновлення вихідного аналогового сигналу 263
5.2. *Z*-перетворення і його властивості 263
5.2.1. Пряме *Z*-перетворення 265
5.2.2. Властивості *Z*-перетворення 267
5.2.3. Зворотне *Z*-перетворення .....

5.3. Дискретне перетворення Фур'є і його властивості. Швидке перетворення Фур'є 267
5.3.1. Дискретне перетворення Фур'є 267
5.3.2. Властивості дискретного перетворення Фур'є 270
5.3.3. Швидке перетворення Фур'є 271
5.4. Цифрова фільтрація аналогових сигналів 274
5.4.1. Принципи цифрової обробки сигналів 274
5.4.2. Цифрові фільтри та їх характеристики 276
5.5. Нерекурсивні цифрові фільтри 279
5.5.1. Структурна схема нерекурсивного цифрового фільтра 280
5.5.2. Основні характеристики нерекурсивного цифрового фільтра 282
5.5.3. Приклади синтезу цифрового фільтра 283
5.5.4. Рекурсивні цифрові фільтри 286
6. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ І СИГНАЛІВ У РАДІОТЕХНІЦІ 295
6.1. Характеристики випадкових сигналів 295
6.1.1. Загальні відомості про випадкові сигнали. Класифікація 295
6.1.2. Функція розподілу ймовірності 298
6.1.3. Щільність розподілу ймовірності 300
6.2. Статистичні характеристики випадкових сигналів 301
6.2.1. Початкові моменти одновимірної щільності розподілу ймовірності 301
6.2.2. Центральний момент одновимірної щільності розподілу ймовірностей 302
6.2.3. Характеристична функція 304
6.3. Нормальна та рівномірна щільність розподілу ймовірності 305
6.3.1. Нормальна (гаусівська) щільність розподілу ймовірності 305
6.3.2. Рівномірний розподіл імовірності 308
6.4. Двовимірна функція і двовимірна щільність розподілу ймовірності 312
6.4.1. Двовимірна і багатовимірна функція розподілу ймовірності 312
6.4.2. Двовимірна і багатовимірна щільність розподілу ймовірності 313
6.4.3. Взаємна функція і щільність розподілу ймовірності 315
6.4.4. Моментні функції двовимірної щільності розподілу ймовірності 316
6.4.5. Умовні функція і щільність розподілу ймовірності 318
6.5. Стаціонарні та ергодичні випадкові процеси 319
6.5.1. Стаціонарні випадкові процеси 319
6.5.2. Кореляційна функція стаціонарного випадкового процесу та її властивості 321
6.5.3. Ергодичні випадкові процеси 323

6.6. Спектральні характеристики стаціонарних випадкових процесів ... 325
6.6.1. Спектральна щільність потужності випадкового процесу ... 325
6.6.2. Взаємозв'язок між енергетичним спектром і кореляційною функцією випадкового процесу ... 328
6.6.3. Ефективна ширина енергетичного спектра ... 330
6.7. Статистичний аналіз деяких типів випадкових процесів ... 331
6.7.1. Гаусівські випадкові процеси ... 331
6.7.2. Білий шум ... 333
6.7.3. Дробовий шум ... 334
6.7.4. Тепловий шум ... 335
7. ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ І СИГНАЛІВ У ЛІНІЙНИХ ПРИСТРОЯХ ... 337
7.1. Статистичні характеристики випадкового процесу на виході лінійного пристрою ... 337
7.1.1. Загальні відомості щодо методів аналізу проходження випадкових процесів через лінійні пристрої (кола) ... 337
7.1.2. Часовий метод аналізу проходження випадкових сигналів через лінійні кола ... 338
7.1.3. Визначення математичного сподівання і середнього квадрата випадкового процесу на виході лінійного кола ... 339
7.1.4. Кореляційна функція випадкового процесу на виході лінійного кола ... 342
7.1.5. Взаємна кореляційна функція випадкових процесів на вході та виході лінійного кола ... 344
7.2. Спектральний метод аналізу проходження випадкових сигналів через лінійні кола ... 346
7.2.1. Загальні відомості ... 346
7.2.2. Спектральна щільність потужності (енергетичний спектр) випадкового процесу на виході лінійного кола ... 346
7.2.3. Проходження білого шуму через інтегруюче *RC* коло ... 349
7.2.4. Проходження білого шуму через ідеальний смуговий фільтр ... 351
7.2.5. Дія білого шуму на паралельний коливальний контур ... 353
7.3. Вузькосмугові випадкові процеси ... 356
7.3.1. Нормалізація випадкових процесів під час проходження через лінійні кола ... 356
7.3.2. Поняття вузькосмугового випадкового процесу ... 357
7.3.3. Двовимірна щільність розподілу ймовірностей вузькосмугового випадкового процесу ... 358
7.3.4. Одновимірна щільність розподілу початкової фази ... 361
7.3.5. Одновимірна щільність розподілу ймовірностей обвідної ... 361
7.4. Дія на лінійне коло суми детермінованого сигналу та шуму ... 363
7.4.1. Відношення сигнал/шум ... 363

7.4.2. Загальні відомості щодо оптимальної лінійної фільтрації..... 365
7.4.3. Критерій оптимальності 365
7.4.4. Проходження сигналу та шуму через лінійне коло..... 366
7.5. Оптимальні фільтри за критерієм максимуму відношення сигнал/шум..... 369
7.5.1. Оптимальна фільтрація детермінованого сигналу на фоні білого шуму..... 369
7.5.2. Імпульсна характеристика узгодженого фільтра..... 372
7.5.3. Форма корисного сигналу на виході оптимального фільтра.... 373
7.5.4. Узгоджений фільтр для прямокутного відео імпульсу..... 374
7.5.5. Узгоджений фільтр для прямокутного радіоімпульсу..... 376
8. ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ І СИГНАЛІВ У ЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА НЕЛІНІЙНИХ КОЛАХ 380
8.1. Перетворення випадкових процесів лінійними параметричними колами..... 380
8.1.1. Загальні відомості..... 380
8.1.2. Коваріаційна функція та енергетичний спектр випадкового процесу на виході лінійного параметричного кола..... 381
8.1.3. Дія детермінованого сигналу на параметричне коло з випадковими параметрами..... 383
8.2. Перетворення випадкових процесів у нелінійних системах..... 387
8.2.1. Загальні відомості щодо нелінійних перетворень випадкових процесів..... 387
8.2.2. Щільність розподілу ймовірностей випадкового процесу на виході нелінійного безінерційного елемента..... 388
8.2.3. Визначення статистичних характеристик випадкового процесу на виході нелінійного безінерційного елемента..... 392
8.2.4. Проходження вузькосмугового гаусівського шуму через квадратичний амплітудний детектор..... 396
ДОДАТКИ..... 403
Додаток А. Таблиця деяких перетворень Лапласа..... 403
Додаток Б. Форми подання комплексних чисел і дії над ними..... 404
Додаток В. Розв'язання деяких диференціальних рівнянь..... 405
Додаток Г. Функції Бесселя..... 406
ЛІТЕРАТУРА..... 407

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АКФ – автокореляційна функція
АМ – амплітудна модуляція
АЧС – амплітудно-частотний спектр
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
БПЛА – безпілотний літальний апарат
ВАХ – вольт-амперна характеристика
ЗЗ – зворотній зв'язок
ЗРГК – зенітний ракетно-гарматний комплекс
ЗРК – зенітний ракетний комплекс
ЛЧМ – лінійна частотна модуляція
ПЗЗ – позитивний зворотній зв'язок
ПТРК протитанкова керована ракета
РЛО – радіолокаційне озброєння
РЛС – радіолокаційна станція
ССЦ – станція селекції цілей
ТТХ – тактико-технічні характеристики
ФВЧ – фільтр високих частот
ФКМ – фазо-код маніпуляція
ФМ – фазова модуляція
ФНЧ – фільтр низьких частот
ФЧС – фазо-частотний спектр
ФЧХ – фазо-частотна характеристика
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ЦФ – цифровий фільтр
ЧМ – частотна модуляція

ПЕРЕДМОВА

Підручник містить класифікацію та характеристики детермінованих (із прикладами застосування у зразках військової техніки ЗСУ) та випадкових сигналів, питання їх перетворення у лінійних, параметричних та нелінійних колах, в тому числі принципи оптимальної фільтрації корисного сигналу на фоні шумів та характеристики оптимальних фільтрів по критерію максимуму відношення сигнал/шум і методику побудови схем таких фільтрів. Складається з восьми розділів: "Детерміновані сигнали та їх характеристики" "Аналіз проходження детермінованих сигналів через лінійні кола", "Перетворення детермінованих сигналів у нелінійних і параметричних колах", "Елементи аналізу і синтезу радіотехнічних пристроїв", "Квантовані сигнали та їх перетворення", "Основи теорії випадкових процесів і сигналів в радіотехніці", "Перетворення випадкових процесів і сигналів у лінійних пристроях" та "Перетворення випадкових процесів і сигналів у лінійних параметричних і нелінійних колах".

Підручник призначений для курсантів радіотехнічних спеціальностей і може використовуватися студентами та слухачами, які навчаються за відповідними напрямками.