

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Навчальний посібник

Видавництво “Магнолія 2006”
Львів — 2025

УДК 621.391(075.8)
ББК 32.88-01я73
Г-96

Відтворення цієї книги або будь-якої її частини заборонено без письмової згоди видавництва. Будь-які спроби порушення авторських прав переслідуватимуть у судовому порядку.

Гриф надано Міністерством освіти і науки України

Рецензенти:

Юдін О. К. – д. т. н., професор Національного авіаційного університету;

Шокало В. М. – д. т. н., професор Харківського національного університету;

Сорока Л. С. – д. т. н., професор Харківського національного університету радіоелектроніки.

Г-96 Гусєв О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І., Кузнецов Г. В., Пузиренко О. Ю.

Теорія електричного зв'язку: Навч. посібник. — Львів: Магнолія 2006, 2025.— 364 с.

ISBN 978-966-2025-97-2

“Магнолія 2006”

Розглянуто основи сучасної теорії електричного зв'язку, а також методи забезпечення характеристик систем електричного зв'язку в аспектах швидкості передачі й достовірності прийому. Сформульовано основні закономірності й методи передачі повідомлень каналами зв'язку. Викладено способи математичного представлення повідомлень, сигналів і завад, методи формування і перетворення сигналів у системах (каналах) електричного зв'язку, основи математичної теорії інформації, питання завадостійкості і пропускну здатності систем електрозв'язку, методи ефективного (статистичного) і завадостійкого (корегульованого) кодування, оптимального прийому повідомлень та основи цифрової обробки сигналів.

Для студентів напряму підготовки 050903 “Телекомунікації” стаціонарної та заочної форм навчання.

УДК 621.391(075.8)

© Гусєв О. Ю., Конахович Г. Ф., Корнієнко В. І.,
Кузнецов Г. В., Пузиренко О. Ю., 2025

© “Магнолія 2006”, 2025

ISBN 978-966-2025-97-2

ЗМІСТ

ВСТУП	8
--------------------	----------

ГЛАВА 1. СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	11
1.1. Інформація, повідомлення, сигнали	11
1.2. Системи, канали і мережі зв'язку	16
1.3. Завади і спотворення в каналі	21
1.4. Кодування і модуляція	24
1.5. Демодуляція і декодування	27
1.6. Основні характеристики систем зв'язку	29

ГЛАВА 2. ПОВІДОМЛЕННЯ, СИГНАЛИ І ЗАВАДИ.

ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРЕДСТАВЛЕННЯ І ПЕРЕТВОРЕННЯ	32
2.1. Класифікація повідомлень, сигналів і завад	32
2.2. Функціональні простори та їх базиси	32
2.2.1. Простори сигналів	33
2.2.2. Приклади просторів сигналів	38
2.2.3. Представлення сигналів ортогональними рядами ...	40
2.2.4. Узагальнені ряди Фур'є	42
2.2.5. Системи базисних функцій простору L_2	44
2.2.6. Системи базисних функцій простору I_2^N	52
2.3. Гармонійний аналіз	58
2.3.1. Гармонійний аналіз періодичних коливань	58
2.3.2. Розподіл потужності в спектрі періодичного коливання	62
2.3.3. Гармонійний аналіз неперіодичних коливань	63
2.3.4. Основні властивості спектральної щільності	66
2.3.5. Розподіл енергії в спектрі неперіодичного коливання	72
2.4. Повідомлення, сигнали і завади як випадкові процеси ...	73
2.4.1. Загальні визначення випадкових процесів	73
2.4.2. Спектральна щільність потужності	79
2.4.3. Співвідношення між енергетичним спектром і кореляційною функцією	86

2.4.4. Комплексне й квазігармонійне представлення сигналів	87
2.4.5. Обвідна і фаза випадкового процесу	90
2.4.6. Теорема Котельникова	91
2.4.7. Співвідношення між тривалістю сигналу і шириною його спектра	94
2.4.8. Принцип дискретизації Железнава	96
ГЛАВА 3. КАНАЛИ ЗВ'ЯЗКУ	99
3.1. Загальні відомості про канали зв'язку	99
3.2. Фільтрація у фізичних системах (каналах зв'язку)	100
3.2.1. Імпульсна перехідна функція	100
3.2.2. Частотні характеристики	102
3.2.3. Часова та частотна фільтрація	103
3.3. Проходження сигналів через канали із детермінованими характеристиками	116
3.4. Проходження сигналів через випадкові канали зв'язку	120
3.5. Математичні моделі каналів зв'язку	122
3.6. Рівняння стану	125
ГЛАВА 4. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ	129
4.1. Інформаційні параметри повідомлень і сигналів	129
4.2. Взаємна інформація	132
4.3. Ефективне кодування дискретних повідомлень	135
4.4. Інформація в неперервних сигналах	137
4.5. Пропускна здатність каналу зв'язку	139
4.6. Теорема кодування для каналу із завадами	140
4.7. Інформація в неперервних повідомленнях. Еpsilon-ентропія	142
4.8. Загальні відомості про цифрову передачу неперервних повідомлень	145
4.9. Завадостійкість імпульсно-кової модуляції	147
4.10. Кодування із пророкуванням	150
ГЛАВА 5. ТЕОРІЯ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ПОВІДОМЛЕНЬ	158
5.1. Основи теорії поділу сигналів	158

5.2. Частотний, часовий і фазовий поділ сигналів	162
5.3. Поділ сигналів за формою	168
5.4. Способи поділу сигналів в асинхронних кодових системах зв'язку	170

ГЛАВА 6. ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ ПРИЙОМУ ДИСКРЕТНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ 175

6.1. Визначення завадостійкості прийому дискретних повідомлень	175
6.2. Критерії вірності прийому повідомлень	181
6.2.1. Критерій мінімального середнього ризику (баєсівський критерій)	181
6.2.2. Критерій ідеального спостерігача (критерій максимуму умовної щільності розподілу)	183
6.2.3. Критерій максимуму апостеріорної ймовірності... ..	184
6.2.4. Мінімаксний критерій	185
6.2.5. Критерій Неймана-Пірсона	185
6.2.6. Інформаційний критерій	187
6.2.7. Критерій максимальної правдоподібності	187
6.3. Оптимальний когерентний прийом дискретних сигналів	187
6.3.1. Оптимальний алгоритм когерентного прийому.... ..	188
6.3.2. Оптимальний кореляційний приймач	190
6.3.3. Оптимальний приймач на узгоджених фільтрах	194
6.3.4. Потенційна завадостійкість оптимального когерентного прийому	199
6.3.5. Потенційна завадостійкість бінарних систем з АМн, ЧМн, ФМн і ВФМн	201
6.3.6. Потенційна завадостійкість багатопозиційних систем	205
6.4. Оптимальний некогерентний прийом дискретних сигналів	207
6.4.1. Алгоритм і схема оптимального некогерентного приймача	208
6.4.2. Потенційна завадостійкість оптимального некогерентного приймача	213
6.4.3. Потенційна завадостійкість бінарних систем з АМн, ЧМн і ВФМн	217

6.4.4. Потенційна завадостійкість багатопозиційних систем	219
6.4.5. Порівняння потенційної завадостійкості оптимального прийому	219
6.5. Неоптимальні методи прийому дискретних сигналів	221
6.5.1. Неоптимальний когерентний прийом	223
6.5.2. Неоптимальний некогерентний прийом	226
6.5.3. Схеми неоптимальних некогерентних приймачів ..	229

ГЛАВА 7. ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ НЕПЕРЕРВНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ	236
7.1. Особливості передачі неперервних повідомлень	236
7.2. Оптимальна лінійна фільтрація. Частотні характеристики ОЛФ	240
7.2.1. Фільтр Колмогорова-Вінера	240
7.2.2. Фільтр Калмана-Б'юсі	244
7.3. Оптимальний прийом неперервних сигналів	251
7.3.1. Оптимальна оцінка амплітуди сигналу	252
7.3.2. Оптимальна оцінка вектора параметрів сигналу ...	254
7.3.3. Оцінка потенційної завадостійкості передачі неперервних сигналів	259
7.4. Потенційна завадостійкість методів модуляції	260
7.4.1. Потенційна завадостійкість прямих методів модуляції	261
7.4.1.1. Потенційна завадостійкість амплітудної модуляції	263
7.4.1.2. Потенційна завадостійкість балансної та односмугової модуляції	264
7.4.1.3. Потенційна завадостійкість фазової модуляції	265
7.4.2. Потенційна завадостійкість непрямих методів модуляції	266
7.4.3. Потенційна завадостійкість методів багато-ступінчатої модуляції	269
7.5. Пороговий ефект нелінійних методів модуляції	272
ГЛАВА 8. ЗАВАДОСТІЙКЕ КОДУВАННЯ	278
8.1. Особливості використання корегувального кодування ...	278

8.2. Класифікація корегувальних кодів	280
8.3. Принципи побудови корегувальних кодів	281
8.4. Систематичні (лінійні) коди	292
8.4.1. Принципи побудови лінійних кодів	293
8.4.2. Матричне кодування і декодування	295
8.4.3. Групове кодування	302
8.4.4. Досконалі й квазідосконалі коди	307
8.4.4.1. Коди Хемінга	308
8.4.4.2. Коди Голея	311
8.4.5. Циклічні коди	314
8.4.5.1. Поліноміальні коди	314
8.4.5.2. Кодування і декодування циклічних кодів	316
8.4.5.3. Коди БЧХ	324
8.4.5.4. Циклічні надмірні коди CRC	328
8.5. Неперервне (рекурентне) кодування	331
8.6. Принципи адаптивного кодування	335
8.7. Ефективність корегувального кодування	337
ГЛАВА 9. СТИСК ІНФОРМАЦІЇ	342
9.1. Найпростіші алгоритми стиску інформації	342
9.1.1. Алгоритм Шеннона-Фано	342
9.1.2. Алгоритм Хафмена	343
9.2. Арифметичне кодування	346
9.3. Адаптивні алгоритми стиску	351
9.4. Підстановочні (словникові) алгоритми. Метод Лемпеля Зіва	352
9.5. Методи стиску інформації із втратами	354
ГЛАВА 10. ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ	356
10.1. Особливості оцінки ефективності СЕЗ	356
10.2. Ефективність систем передачі дискретних повідомлень	359
10.3. Ефективність систем передачі неперервних повідомлень	360
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	362

ВСТУП

Сучасний науково-технічний прогрес супроводжується інтенсивним зростанням обсягів інформації, необхідної для управління промисловістю, сільським господарством, транспортом тощо. Передача інформації на відстань — одне з найвидатніших досягнень людства. Види зв'язку (передавання інформації) є різноманітними: телеграфія, телефонія, радіомовлення, телебачення, факсимільний, стільниковий, документальний зв'язок та ін. Засобами зв'язку є дротовий зв'язок (в основному кабельний) і бездротовий, наприклад, радіозв'язок, — через супутники Землі, радіорелейні лінії тощо. Метою організації зв'язку є поширення наукових, економічних, культурних знань і, зрештою, задоволення потреби людини у спілкуванні.

Наразі саме *теорія електричного зв'язку (ТЕЗ)* визначає перспективні напрямки розвитку техніки електрозв'язку. Знання цієї теорії необхідне не лише на етапі проектування *систем електричного зв'язку (СЕЗ)*, але й при їх експлуатації, оскільки дозволяє правильно організувати боротьбу із завадами для підвищення не лише обсягів передачі інформації, але й якості передавання повідомлень (вірності зв'язку). Сучасна ТЕЗ використовує як детерміновані моделі сигналів, так і ймовірнісні моделі передаваних повідомлень, а також відповідних їм сигналів і завад у каналі зв'язку. Ймовірнісний підхід дозволяє врахувати випадковий (для одержувача) характер передачі повідомлень і завад у каналі та дозволяє визначити оптимальну конфігурацію приймальних пристроїв, що забезпечуватиме максимум можливої якості при граничних показниках СЕЗ.

Основи сучасної (статистичної) теорії зв'язку були закладені у фундаментальних роботах *В. О. Котельникова* в теорії потенційної завадостійкості (1947 р.) і *К. Шеннона* в теорії інформації (1948 р.). Окремі питання теорії розглядалися в більш ранніх роботах *Х. Найквіста* (1928 р.) і *В. О. Котельникова* (1933 р.), у яких була сформульована і доведена теорема відліків, у роботах *Р. Хартлі* (1928 р.), в яких введений логарифмічний засіб врахування інформації, у роботі *Д. В. Агєєва* (1935 р.) в теорії лінійного поділу каналів. У створенні і розвитку статистичної теорії

зв'язку велику роль відіграли роботи *О. Я. Хінчина* (1938 р.) з кореляційної теорії стаціонарних випадкових процесів, *А. М. Колмогорова* (1941 р.) і *Н. Вінера* (1943 р.) з інтерполяції й екстраполяції стаціонарних випадкових послідовностей, *А. Вальда* (1950 р.) в теорії статистичних рішень. Подальший розвиток теорія одержала в роботах *Р. Раїса*, *О. П. Харкевича*, *В. І. Сифорова*, *Р. Галлагера*, *Х. Хелстрорма*, *Р. Фано*, *Л. М. Фінка*, *Д. Вітербі* й багатьох інших вчених.

Аналізуючи вищенаведене, можна зробити висновки, що розвитку техніки і стандартів зв'язку сприяли масштабні теоретичні дослідження, але на початковому етапі розвитку в теорії розглядалися відокремлені задачі, пов'язані із різними електротехнічними пристроями (генераторами, підсилувачами, модуляторами тощо), досліджувалося проходження сигналів дротовими лініями зв'язку, поширення електромагнітних хвиль тощо. Ускладнення техніки зв'язку і зростання актуальності боротьби із завадами зумовили становлення у 40 х рр. ХХ ст. науки про передачу інформації — **теорії електричного зв'язку (ТЕЗ)**.

Курс ТЕЗ відноситься до фундаментальних навчальних дисциплін підготовки висококваліфікованих фахівців, які володіють сучасними методами аналізу і синтезу телекомунікаційних систем і пристроїв різноманітного призначення.

Головною метою викладення курсу ТЕЗ є навчання основним закономірностям і методам передачі повідомлень каналами зв'язку. Для цього вирішуються задачі аналізу і синтезу СЕЗ, розглядаються способи математичного представлення сигналів і завад, методи формування і перетворення сигналів в електричних колах, питання завадостійкості і пропускну здатності СЕЗ, методи ефективного і завадостійкого кодування, оптимального прийому, принципи багатоканального зв'язку, основи цифрової обробки сигналів, питання оптимізації СЕЗ. Розв'язанням задач ТЕЗ є створення оптимальних систем і мереж зв'язку, інформаційно-вимірювальних систем тощо. Тобто вони спрямовані на створення теоретичної основи оптимальної розробки та експлуатації виробів телекомунікаційної техніки.

Вивчення дисципліни базується на знаннях, отриманих студентами при вивченні наступних дисциплін: “*Вища математика*”, “*Теорія імовірності та математичної статистики*”, “*Дискрет-*

на математика”, “Фізика”, “Теорія електричних кіл і сигналів”. Знання і навички, отримані під час вивчення цієї навчальної дисципліни, будуть використані під час вивчення переважної більшості наступних дисциплін професійної та практичної підготовки фахівця, зокрема, “Телекомунікаційні системи передачі”, “Системи комутації і розподілу інформації”, “Телекомунікаційні та інформаційні мережі”, “Системи мобільного зв’язку”, “Захист інформації в телекомунікаційних системах та мережах”, “Волоконно-оптичні системи передачі”.

Курс ТЕЗ призначений для підготовки бакалаврів напряму підготовки 6.050903 “Телекомунікації” і відповідає програмі дисципліни ТЕЗ для вищих навчальних закладів.

Висновки посібника містять підсумковий аналіз основних положень і результатів відповідних глав. Питання, завдання і вправи спрямовані на закріплення матеріалу й поглибленого його осмислення. Текст, набраний курсивом, призначений для поглиблення і пояснення основного матеріалу, але в деяких випадках він нагадує читачеві матеріал, відомий із курсів вищої математики і теорії електричних кіл. Змістом і методичним викладенням навчальний посібник розрахований на студентів денної і заочної форм навчання. В основу підручника покладені лекції, що читаються авторами протягом ряду років в Національному гірничому і Національному авіаційному університетах.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ГУСЄВ Олександр Юрійович
КОНАХОВИЧ Георгій Філімонович
КОРНІЄНКО Валерій Іванович
КУЗНЕЦОВ Георгій Віталійович
ПУЗИРЕНКО Олександр Юрійович

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Навчальний посібник

Керівник видавничого проекту *В. М. Піча*

Формат 60x84/16. Умовн. друк. арк. 21,16.
Гарнітура Таймс Нью Роман

ПП "Магнолія 2006"

м. Львів-53, 79053, Україна, тел.+380503701957

e-mail: magnol06@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції: серія ДК № 2534 від 21.06.2006 року, видане Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавництва "Магнолія 2006"