**Державний комітет зв'язку та інформатизації України**

**Українська державна академія зв'язку ім. О. С. Попова**

**Кафедра теорії електричного зв'язку**

**АНАЛІЗ перетворень СИГНАЛІВ**

**ТА РОЗРАХУНКИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ**

ЗАВДАННЯ

на курсову роботу з дисципліни

“Сигнали та процеси в радіотехніці” й

Методичні вказівки

до їх виконання

Укладач: доц. Іващенко П. В.

Одеса 2000

**ЗМІСТ**

С.

**ПЕРЕДМОВА 4**

**1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ 5**

**2 Аналіз характеристик первинного сигналу 6**

**3 РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ АЦП 6**

**4 Розрахунок сигнального сузір‘я цифрової модуляції 8**

**5 РозрахункИ частотних та часових характеристик сигналів,**

**що передаються каналОм зв’язку 10**

**6 Аналіз проходження завади через блоки демодулятора 12**

**ВИСНОВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ 13**

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 14**

**Додаток А. Вихідні числові дані для КР 15**

**Додаток Б. Довідкові співвідношення 16**

**Додаток В. ОСНОВНІ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ... 16**

**ПЕРЕДМОВА**

Навчальними планами освітньо-професійної підготовки бакалаврів за напрямком вищої освіти 6.0907 “Радіотехніка” передбачено виконання курсової роботи з дисципліни “Сигнали та процеси в радіотехніці”. Мета КР – закріплення знань основних положень курсу “Сигнали та процеси в радіотехніці” – досягається шляхом аналізу перетворень сигналів та проведення розрахунків їх характеристик в системі електрозв'язку.

У розд. 1 цього посібника наведене "Завдання", у якому вказані перелік та послідовність розрахунків, що необхідно виконати. Числові значення вихідних даних до завдання індивідуальні і наведені в Додатку А. У 2000/2001 навч. році **студенти групи Р-51 виконують завдання за варіантами, номери яких співпадають з номерами прізвищ в журналі групи, а студенти групи Р-52 виконують завдання за варіантами, номери яких на 25 більші, ніж номери прізвищ в журналі групи.**

Для виконання КР студент повинен виписати з розд. 1 цього методичного посібника перелік вихідних даних, а з Додатку А – числові значення вихідних даних. Кожний із пунктів завдання повинен бути виконаний як розділ КР.

Рекомендований графік виконання завдань в 2000/2001 навч. році

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер завдання | 1 | 2 | 3 | 4 | Здача КР | Захист КР |
| Навчальний тиждень | 30.10 – 4.11 | 6 – 11.11 | 13 – 18.11 | 20 – 25.11 | 27.11 – 2.12 | 4 – 9.12 |

Виконання завдання 5 не обов’язкове.

У посібнику використані умовні позначення, які нині застосовуються в підручниках та на лекціях, практичних і лабораторних заняттях в УДАЗ ім. О.С. Попова.

У Додатку В наведені основні правила оформлення КР.

Рекомендована для виконання КР література зведена до переліку посилань.

**1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ**

**Вихідні дані.** Вихідним до курсової роботи є неперервний первинний сигнал електрозв’язку. Подальші перетворення відповідають передаванню його цифровим методом модульованим сигналом по радіоканалу. У каналі зв’язку діє адитивний білий гауссовий шум.

У табл. Д.1 наведені вихідні дані.

1 Характеристики первинного випадкового сигналу *b*(*t*):

– середнє значення сигналу дорівнює нулю;

– дисперсія сигналу ;



– коефіцієнт амплітуди сигналу *Ка*;

– спектральна густина потужності *Gb*(*f*) одного з трьох видів:

виду А:

(1.1)



виду Б:

; (1.2)



виду В:

(1.3)



2. ІКМ перетворення неперервного сигналу в цифровий виконується з використанням рівномірного квантування:

– відносна частка потужності сигналу *r*, що зосереджена на інтервалі (0, *F*max);

– допустиме відношення сигнал / шум квантування ρкв доп.

3. Амплітудний спектр елементу модульованого сигналу, що передається каналом зв’язку, – "корінь із спектру Найквіста" з коефіцієнтом закруглення α.

4. В каналі зв’язку діють:

– білий гауссовий шум із спектральною густиною потужності *N*0/2, –∞ < *f* < ∞;

– модульований сигнал з середньою потужність *Ps*.

5. Метод цифрової модуляції.

Виконання КР складається з окремих завдань

**1 Аналіз характеристик первинного сигналу.** Знайти середню потужність та кореляційну функцію сигналу *b*(*t*). Порівняти значення заданої дисперсії та значення середньої потужності. Побудувати графіки спектральної густини потужності *Gb*(*f*) та кореляційної функції *Kb*(τ). Визначити інтервал кореляції сигналу та показати його на графіку *Kb*(τ).

**2 Розрахунки параметрів АЦП.** Скласти і описати структурну схему АЦП. Визначити: максимальну частоту сигналу, що передається, частоту дискретизації, інтервал дискретизації, число рівнів квантування, відношення сигнал/шум квантування при вибраному числі рівнів квантування, тривалість двійкового символу.

**3 Розрахунок сигнального сузір‘я модульованого сигналу.** Навести сигнальне сузір‘я для заданого методу цифрової модуляції, розрахувати координати сигнальних точок, навести маніпуляційний код. Виконати аналіз, щоб встановити зв‘язок між мінімальною відстанню між сигналами *d* та енергією сигналу на біт *E*б (не обов‘язково).

**4 Розрахунки частотних та часових характеристик сигналів, що передаються каналом зв‘язку.** Для заданого методу цифрової модуляції дати опис перетворень сигналів у модуляторі, каналі зв‘язку та демодуляторі. Розрахувати та побудувати графіки: АЧХ ФНЧ модулятора та демодулятора; часову діаграму імпульсу на виході демодулятора. Розрахувати ширину спектра модульованого сигналу та порівняти її з шириною спектра неперервного сигналу, що передається.

**5 Аналіз проходження завади через блоки демодулятора.** Виконати аналіз проходження завади через блоки демодулятора: синхронній детектор, ФНЧ та вирішуючий пристрій. Розрахувати ймовірність помилки сигналу та двійкового символу.

**Висновки**. Зробити аналіз курсової роботи в цілому.

## 2 Аналіз характеристик первинного сигналу

Середня потужність сигналу *b*(*t)* визначається за заданою спектральною густиною потужності (СГП) *Gb*(*f*)

*Pb* = 2 (2.1)



Оскільки середнє значення сигналу *b*(*t*) дорівнює нулю, то отримане значення середньої потужності повинне співпадати з заданим значенням дисперсії сигналу.

Кореляційна функція сигналу визначається за заданою СГП

(2.2)



Для виконання інтегрування (2.1) і (2.2) можна використати довідкові співвідношення з додатку Б.

Після визначення функції *Kb*(τ) слід перевірити, чи значення *Kb*(0) співпадає зі значенням середньої потужності сигналу, що визначене вище.

Графіки функцій *Gb*(*f*) і *Kb*(τ) слід побудувати для невід‘ємних значень аргументів з використанням числових масштабів на осях координат.

Інтервал кореляції τк сигналу слід визначити, як протяжність інтервалу (0, τк), поза яким значення функції кореляції чи її обвідної, якщо *Kb*(τ) має коливальний характер, не перевищують 0,1⋅*Кb*(0). Інтервал кореляції можна визначити будь-яким способом: аналітично, вирішуючи рівняння

*Kb*(τк) = 0,1⋅*Kb*(0), (2.3)

чисельно, підбираючи τк, при якому виконується рівність (2.3), чи графічно з графіка *Кb*(τ), проводячи горизонтальну лінію на рівні 0,1⋅*Kb*(0) до перетину з графіком.

Під час виконання завдання 1 рекомендується використати [1, розд.2.2, 3, розд.4.3, 4.4, 4, розд. 7.1].

## 3 Розрахунки параметрів АЦП

Структурна схема АЦП докладно описана в [1, розд. 8; 2, розд. 16]. Наведені там схеми АЦП необхідно доповнити вхідним ФНЧ, що в реальних системах електрозв'язку використовується для обмеження спектра первинного сигналу. Це пов'язане з тим, що у більшості первинних сигналів спектр є поволі спадаючою функцією, і величина *F*max не є частотою, вище якої спектр дорівнює нулю, а є граничною частотою смуги, яку необхідно передати каналом зв’язку за певної умови.

У курсовій роботі *F*max визначається, як протяжність інтервалу (0, *F*max), у якому зосереджена частка *r* від середньої потужності сигналу. Частота *F*max визначається з умови

*r*. (3.1)



Спочатку слід виконати інтегрування (можна використати співвідношення з додатку Б), а з отриманого рівняння аналітично чи чисельно знайти *F*max.

Згідно з теоремою Котельникова [1, розд. 2.7; 2, розд. 2.4] частота дискретизації  *f*д = 1/*Т*д повинна задовольняти умові

*f*д≥ 2*F*max. (3.2)

Збільшення частоти дискретизації дозволяє спростити вхідний фільтр АЦП та відновлюючий ФНЧ ЦАП, що обмежує спектр первинного сигналу. Але збільшення частоти дискретизації призводить до зменшення тривалості двійкових символів на виході АЦП, що вимагає небажаного розширення смуги частот каналу зв'язку для передачі цих символів.

На рис. 1 наведені: *S* (*f*) – спектр відліків, поданих вузькими імпульсами, *Sb* (*f)* – спектр неперервного сигналу *b*(*t*), *A*(*f*) – робоче ослаблення ФНЧ. Для того, щоб ФНЧ не вносили лінійних спотворень у неперервний сигнал, гранична частота смуги пропускання ФНЧ повинна задовольняти умові

*f*1 ≥ *F*max*.* (3.3)

Для того, щоб виключити накладення спектрів *Sb* (*f*) і *Sb* (*f* – *f*д), а також забезпечити ослаблення відновлюючим ФНЧ складових *Sb* (*f* – *f*д), гранична частота смуги затримки ФНЧ повинна задовольняти умові

*f*2  ≤ (*f*д – *F*max). (3.4)

Щоб ФНЧ не був занадто складним, відношення граничних частот вибирають з умови

*f*2 / *f*1 = 1,3 – 1,4. (3.5)

Після підстановки співвідношень (3.3) і (3.4) у формулу (3.5) можна вибрати частоту дискретизації, а після цього розрахувати інтервал дискретизації: інтервал дискретизації – величина, обернена частоті дискретизації

*Т*д= 1 / *f*д. (3.6)

Порівняйте значення інтервалу дискретизації *T*д із значенням інтервалу кореляції τк, знайденому в завданні 1. Повинна виконуватись нерівність *T*д < τк.

*Gb*(*f* – *f*д)

*f*

*f*д

*f*д – *F*max

*F*max

*Gb*(*f*)

0

0

*f*

*f*2

*f*1

*А*1

*А*2

*А*(*f*)

*G*(*f*)

Рисунок 1 – Спектр відліків та АЧХ фільтрів АЦП і ЦАП

У системі передачі методом ІКМ визначають відношення сигнал/шум квантування

ρкв=*Pb* / , (3.7)

де – середня потужність шуму квантування.

Величина ρкв при рівномірному квантуванні визначається

ρкв= 3*L*2/, (3.8)



де *L* – число рівнів квантування,

*К*а – коефіцієнт амплітуди неперервного сигналу.

Для визначення числа рівнів квантування слід за формулою (3.8) за заданим допустимим відношенням сигнал/шум квантування ρкв.доп розрахувати допустиме число рівнів квантування *L*доп. У формулі (3.8) ρкв визначається в разах. Тому до розрахунку *L*доп задане в децибелах допустиме відношення сигнал/шум квантування необхідно перевести в рази

ρ = 100,1ρ [дБ]. (3.9)

Слід вибрати *L* ≥ *L*доп, враховуючи, що число рівнів квантування *L* – цілий степінь числа два. Після вибору *L* необхідно за формулою (3.8) розрахувати значення ρкв за вибраними параметрами АЦП, перевести розраховане значення в децибели і порівняти із заданим ρкв.доп.

Довжина двійкового коду АЦП *n* визначається числом рівнів квантування

*n* = log2 *L*. (3.10)

Тривалість двійкового символу на виході АЦП визначається

*Т*б = *Т*д / *n*. (3.11)

4 Розрахунок сигнального сузір‘я цифрової модуляції

Отриманий з виходу АЦП цифровий сигнал (ЦС) передається каналом зв‘язку модульованим сигналом – метод модуляції заданий. Елементами двовимірного модульованого сигналу, що посилається в канал зв‘язку, є радіоімпульси

*sі*(*t*) = *aіA*(*t*)cos2π*f*0*t* + *bіA*(*t*)sіn2π*f*0*t*, *і* = 0, 1, ..., *М–*1, (4.1)



де *і* – номер елементарного сигналу;

*М*– число елементарних сигналів;

*аі,* *bі*– пара чисел, що передаються *і*-им сигналом каналом зв‘язку; будемо вважати, що це координати *і*-ого сигналу на площині;

*A*(*t*) – обвідна радіоімпульсів;

*f*0 – частота несійного коливання.

Елементарні сигнали посилаються в канал зв‘язку через тактовий інтервал *Т*, і модульований сигнал записується

*s*(*t*)= (4.2)



де *k* – номер тактового інтервалу;

*і* – номер сигналу, що передається на *k*-ому інтервалі.

Тривалість тактового інтервалу визначається

*Т* = *T*б log2*M*, (4.3)

де *Т*б - тривалість двійкового символу (біта) цифрового сигналу, знайдена в завданні 2.

У завданні на КР задані методи модуляції ФМ-4, ФМ-8, АФМ-8 та КАМ-16 [5, розд. 2.1, 2.2]. Відповідні їм сигнальні сузір‘я наведені на рис. 2:

– у разі ФМ-4 сигнальні точки розміщені рівномірно на колі з кроком 90°;

– у разі ФМ-8 сигнальні точки розміщені рівномірно на колі з кроком 45°;

– у разі АФМ-8 4 точки розміщені рівномірно на колі радіусом *R* з кроком 90°; 4 точки розміщені рівномірно на колі радіусом 2*R* теж з кроком 90°, але точки, розміщені на різних колах, взаємно зміщені на 45°;

– у разі КАМ-16 точки розміщені рівномірно у вузлах квадратної сітки.

Для повного опису сузір‘я слід вказати координати усіх сигнальних точок. Оскільки сузір‘я завжди має певну просту структуру (вона описана вище для чотирьох методів модуляції), то для подання сузір’я досить вказати один чи два числових параметри. За звичай, задають середню енергію сигналів *Е*сер чи енергію *Е*б, що витрачається на передавання одного біта. Енергія кожного з сигналів визначається

*Ei* = , *i* = 0, 1, …, *M*–1. (4.4)



# Середня енергія сигналів

*E*сер = . (4.5)



Енергія, що витрачається на передавання одного біта,

*Е*б = *Е*сер/*n*; (4.6)

*n* = log2*M*. (4.7)

# Сузір’я характеризується також відстанями між сигналами

*b*

*S000000*0

*a*

АФМ-8

*d*

*a*

КАМ-16

Рисунок 2 – Сигнальні сузір’я

*S*0

*d*

*d*

*a*

*b*

# ФМ-4

*S*0

*b*

*d*

*d*

*S*0

*b*

*a*

*d*

# ФМ-8

*d*

*d*(*si, sj*) = *i, j* = 0, 1, …, *M*–1, *i* ≠ *j*. (4.8)



З рис. 2 видно, що відстані не рівні між собою. Часто корисно знати найменшу з відстаней, що позначається *d* (рис. 2). Оскільки і *d*, і *Е*б визначаються через координати сигнальних точок, то можна встановити між ними зв’язок. Результати таких розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Зв’язок між мінімальною відстанню та енергією сигналу на біт

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Метод модуляції | ФМ-4 | ФМ-8 | АФМ-8 | КАМ-16 |
| *d* | 2 | 1,326 | 1,549 | 1,265 |

Необхідно навести сигнальне сузір’я для заданого методу модуляції, пронумерувати сигнальні точки *s*0, *s*1, …, *sM*–1, визначити координати сигнальних точок та занести їх до таблиці на зразок таблиці 2. Для визначення координат сигнальних точок слід визначити

*Е*б = *РsТ*б, (4.9)

де *Рs* – середня потужність сигналу (задана в завданні на КР). Потім визначити *d* за співвідношенням з табл. 1 і всі координати сигнальних точок, враховуючи геометричну структуру сузір’я.

Таблиця 2 – Опис сигнального сузір’я та маніпуляційний код

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *si* | *ai* | *bi* | Кодова комбінація |
| s0  s1 | 0,345  0,115 | 0,115  0,115 | 1101  1100 |

Відповідність між сигналами *si* та кодовими комбінаціями визначає маніпуляційний код [5, розд. 2.2]. Довжина маніпуляційного коду визначається співвідношенням (4.7). Кращий маніпуляційний код – це код Грея. У разі коду Грея кодові комбінації, що відповідають будь-яким двом найближчим сигналам, відрізняються лише в одному розряді.

Рекомендується на закінчення цього розділу виконати розрахунки, що підтверджують зв’язок між *d* та *E*б, який наведений у табл. 1.

**5 РозрахункИ частотних та часових характеристик сигналів,**

##### що передаються каналОм зв’язку

Поданий у розділі 4 опис двовимірних модульованих сигналів визначає схеми модулятора та демодулятора, які разом з моделлю каналу зв’язку наведені на рис. 3.

Позначення на рис. 3 відносяться до деякого тактового інтервалу. Кодер маніпуляційного коду на основі *n* = log2*M* біт (*n* біт можуть створити *М* різних кодових комбінацій) виробляє координати *і*-го сигналу *ai* і *bi* (одного з *М* можливих сигналів). Ці числа кодер видає на своїх виходах у вигляді двох коротких імпульсів амплітуди *ai* і *bi* – математично імпульси описуються як *a*iδ(*t*) і *bi*δ(*t*). ФНЧ модулятора мають АЧХ “корінь зі спектра Найквіста”, вони формують імпульси *a*i*А*(*t*) і *biА*(*t*). Генератор несійного коливання виробляє cos2π*f*0*t*. Фазозсувач на π/2 перетворює це коливання вsin2π*f*0*t*. АЧХ “корінь зі спектра Найквіста” записується



= (5.1)



де *f*н = 1/(2*T*) – частота Найквіста;

α – коефіцієнт закруглення спектра (0 ≤ α ≤ 1).

Оскільки ФНЧ збуджується δ-функцією, то амплітудний спектр імпульсу *A*(*t*) описується співвідношенням (5.1). Тому ширина спектра імпульсу *A*(*t*) дорівнює (1 + α)/(2*T*). Спектр імпульсу *aiA*(*t*)cos2π*f*0*t* – це спектр БМ сигналу, тобто дві бокові смуги частот навколо частоти *f*0. Ширина спектра цього радіоімпульсу (1 + α)/*T*. Радіоімпульси *aiA*(*t*)cos2π*f*0*t* і *biA*(*t*)sin2π*f*0*t* мають одинакові за формою амплітудні спектри. Тому ширина спектра елементарних сигналів *si*(*t*) і модульованого сигналу *s*(*t*) (це вірно за умови, що елементарні сигнали на окремих тактових інтервалах незалежні)



*Fs* = (1 + α)/*T*. (5.2)

Смуга пропускання каналу зв’язку визначається смугою частот модульованого сигналу

*F*к= (1 + α)/*T*. (5.3)

У каналі зв’язку діє адитивний білий гауссовий шум *n*(*t*) зі спектральною густиною потужності *N*0/2, –∞ < *f* < ∞.

У демодуляторі сигнал з каналу зв’язку

*aiA*(*t*) cos2π*f*0*t* + *biA*(*t*) sin2π*f*0*t* + *n*(*t*)



поступає на два підканали. В підканалах включені синхронні детектори, де вхідний сигнал помножується на опорні коливання cos2π*f*0*t* та sin2π*f*0*t*. Слід врахувати, що



cos22π*f*0*t* = 0,5 + 0,5 cos2π2*f*0*t*, sin22π*f*0*t* = 0,5 – 0,5 cos2π2*f*0*t*, cos2π*f*0*t*⋅sin2π*f*0*t* = 0,5 sin2π2*f*0*t*.

Після помножувачів включені ФНЧ, які пропускають низькочастотні складові та ослаблюють складові з частотами біля 2*f*0. Тому на рис. 3 в на виходах помножувачів показані лише ті складові, які пройдуть через ФНЧ: *aiA*(*t*) + *Nc*(*t*) та *biA*(*t*) + *Ns*(*t*), де *Nc*(*t*) та *Ns*(*t*) – обвідні косинусної та синусної складових шуму на вході демодулятора.

*a*)

*si*(*t*)

Джерело завад

*si*(*t*) + *n*(*t*)

*n*(*t*)

*б*)

*si*(*t*) + *n*(*t*)

Рисунок 3 – Схема передавання цифрового сигналу (ЦС) двовимірним модульованим сигналом: *а* – модулятор; *б* – канал зв’язку; *в* – демодулятор

Кодер маніпуля-ційного коду

ФНЧ

### G

π/2

ФНЧ

Переданий ЦС

*ai*δ(*t*)

*bi*δ(*t*)

*aiA*(*t*)

*biA*(*t*)

**cos2π*f*0*t*

**sin2π*f*0*t*

*si*(*t*)

•

### G

ФНЧ

π/2

ФНЧ

**cos2π*f*0*t*

**sin2π*f*0*t*

*si*(*t*) + *n*(*t*)

*aiA*(*t*) + *Nc*(*t*)

*aiP*(*t*) + *Nc\**(*t*)

##### Кл

*biP*(*t*) + *Ns\**(*t*)

 *n*(*t*)

*n*(*t*)



Вирішу-ючий пристрій та декодер маніпуляційного коду

Прийнятий ЦС

*biA*(*t*) + *Ns*(*t*)

*в*)

Основне призначення ФНЧ демодулятора – забезпечити максимальне перевищення корисного сигналу над шумом у відліковий момент часу. Виходячи з цієї умови, приходимо до висновку, що ФНЧ повинен бути узгодженим з сигналом *A*(*t*) – його АЧХ повинна співпадати з амплітудним спектром *A*(*t*). Оскільки амплітудний спектр *A*(*t*) описується функцією – співвідношення (5.1), то і АЧХ ФНЧ демодулятора повинна описуватись залежністю . Після проходження імпульсу *A*(*t*) через ФНЧ отримаємо імпульс *P*(*t*) зі спектром Найквіста:



*N*(*f*) = (5.4)



Функцію *P*(*t)* можна отримати як зворотне перетворення Фур’є від *N*(*f*)

*P*(*t*) = . (5.5)



Ключі (Kл) на рис. 3*в* беруть відліки в момент максимального значення імпульсів *P*(*t*) в підканалах демодулятора. Взяття відліків повторюється через тактовий інтервал *Т*. Для того, щоб не було міжсимвольної інтерференції, імпульси на виходах ФНЧ демодулятора повинні задовольняти умові відліковості. Завдяки тому, що в цій точці схеми має місце спектр Найквіста, задовольняється умова відліковості.

Після ключів в підканалах демодулятора мають місце оцінки координат переданого сигналу = *ai* + ξ*c* та = *bi* + ξs, де ξ*c* таξs – значення завад в момент взяття відліків. Вирішуючий пристрій повинен визначити, якому з *М* можливих сигналів слід віднести координати (, ). Після винесення рішення про номер сигналу декодер маніпуляційного коду видає *n* біт, що відповідають цьому номеру у відповідності до табл. 2.



Розділ 4 курсової роботи повинен містити розраховані графіки АЧХ ФНЧ *H*(*f*) = та відгуку ФНЧ демодулятора *P*(*t*) з використанням числових масштабів на осях координат. Слід зробити висновки відносно відсутності міжсимвольної інтерференції. Необхідно порівняти ширину смуги модульованого сигналу *Fs* з шириною смуги неперервного сигналу *F*max, що передається, та зробити відповідний висновок.



6 Аналіз проходження завади через блоки демодулятора

До входу демодулятора поступає завада *n*(*t*) – адитивний білий гауссовий шум із спектральною густиною потужності (СГП) *N*0/2, –∞ < *f* <∞. Дію помножувача на заваду можна визначити, враховуючи властивість перетворення Фур’є: помноження на гармонічне коливання частоти *f*0 породжує дві складові, спектри яких зсунуті на +*f*0 i –*f*0 відносно спектру вхідного сигналу. У цьому разі СГП кожної із двох складових отримує множник ¼. Якщо гармонічне коливання має амплітуду , то множник дорівнює ¼⋅()2 = ½. Кожна із складових також є білим шумом, а самі складові незалежні на будь-якій з частот. Тому СГП їх суми удвічі більша за СГП кожної з них, і, таким чином, на виходах кожного з помножувачів має місце білий шум з СГП *N*0/2, –∞ < *f* <∞.



Потужність шуму на виході ФНЧ легко визначити, якщо відома його шумова смуга *F*ш. АЧХ ФНЧ демодулятора визначається співвідношенням (5.1). Максимальне значення АЧХ *Н*max дорівнює і



(6.1)



З виходу ФНЧ береться відлік завади і маємо ξ – випадкову величину з гауссовим розподілом ймовірності. Її дисперсія (потужність) дорівнює дисперсії завади на виході ФНЧ

(6.2)



Отже, на основі аналізу проходження сигналу і завади через блоки демодулятора на вході вирішуючого пристрою маємо та де *аі*, *bi* – числа, що описують переданий сигнал; ξ*с*, ξ*s* – незалежні відліки завади в підканалах демодулятора з середньоквадратичним відхиленням (СКВ) .



Алгоритм роботи вирішуючого пристрою побудований на такому підході. Вся площина, на якій нанесене сигнальне сузір’я, розбивається на *М* областей, що не пересікаються. Межами областей повинні бути сукупності точок, що знаходяться на рівних відстанях від найближчих точок – це мінімізує ймовірність помилки при винесенні рішення про номер переданого сигналу.

Знання сигнального сузір’я та СКВ завади достатньо для розрахунку ймовірності помилки сигналу. На рис. 2 у кожному сузір’ї позначений сигнал *s*0. Для сигналів ФМ-4,   
АФМ-8 та КАМ-16 помилка сигналу буде мати місце, якщо хоча б одна з координат попаде в область іншого сигналу. Тому умовою виникнення помилки є ξ > *d*/2, а ймовірність помилки



(6.3)



де *m* – кількість помилкових переходів: для ФМ-4 та АФМ-8 *m* = 2, для КАМ-16 *m* = 4;

*F*ξ(•) – функція розподілу ймовірності випадкової величини ξ;

V(•) – інтеграл ймовірності;

ξ – це ξ*с* чи ξ*s*.



У разі ФМ-8 умова виникнення помилки дещо інша (рис. 4): помилка виникне, якщо сума проекцій ξ*с* та ξ*s* на лінію, що з’єднує найближчі сигнальні точки, перевищить *d*/2. Сума проекцій ξ = ξ*s*⋅сos β + ξ*s*⋅sin β теж має гауссовий розподіл ймовірностей. Оскільки ξ*с* і ξ*s* незалежні, то

(6.4)



Як бачимо, умова виникнення помилки та ж сама: ξ > *d*/2, і у разі ФМ-8

(6.5)



Щоб виконати розрахунки ймовірності помилки сигналу, необхідно врахувати зв’язок між *d* та *Е*б, що наведений в табл. 1. Енергія на біт визначається

*Е*б = *T*б⋅*Ps*, (6.6)

де *T*б – тривалість біта, знайдена в завданні 2;

*Ps* – середня потужність модульованого сигналу, задана в завданні на КР.

Досить *d* подати через *Е*б, а значення *N*0 задане в завданні на КР, і можна розрахувати *Р*пом.

Якщо використовується маніпуляційний код Грея, то у разі помилки сигналу виникає помилка лише в одному розряді комбінації, що передається цим сигналом. У такому разі ймовірність помилки двійкового символу (біта) визначається

*р* = *Р*пом/*n*, (6.7)

де *n* визначається співвідношенням (4.7).

# ВИСНОВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

Викласти стисло перелік виконаних розрахунків. Зазначити, чи відповідають виконані розрахунки вихідним даним і завданню на КР, а якщо ні, то які розрахунки і чому не відповідають завданню.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Теория передачи сигналов**: Учебник для вузов / А. Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986.
2. **Панфилов И. П., Дырда В. Е.**. Теория электрической связи: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1991.
3. **Гоноровский И. С**. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986.
4. **Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1988.
5. **Банкет В.Л.** Эффективные системы передачи дискретных сообщений: Учебное пособие. – Одесса: ОЭИС, 1982.

Додаток А

**Таблиця Д.1 – Вихідні числові дані для КР**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Номер**  **варі-анту** | **Параметри первинного сигналу** | | | | ***r*** | **ρкв.доп,**  **дБ** | **α** | | | **Метод**  **модуляції** | ***N*0,**  **В2/Гц** | ***Ps*,**  **В2** |
| **В2/Гц** | **В2** | ***К*а** | ***с*,**  **кГц** |  |  | |
| **00** | **ВИД А** | **3,0** | **5** | **6,5** | **0,90** | **36** | | **0,20** | **ФМ-4** | | **1E–8** | **0,1** |
| **01** | **ВИД Б** | **1,2** | **8** | **12** | **0,95** | **31** | | **0,25** | **АФМ-8** | | **4E–9** | **0,05** |
| **02** | **ВИД В** | **2,5** | **2,5** | **2,4** | **0,97** | **38** | | **0,30** | **ФМ-8** | | **3E–7** | **0,2** |
| **03** | **ВИД А** | **0,1** | **5** | **6,5** | **0,99** | **42** | | **0,35** | **КАМ-16** | | **2E–9** | **0,25** |
| **04** | **ВИД Б** | **0,3** | **5,5** | **8,0** | **0,90** | **42** | | **0,40** | **ФМ-4** | | **2E–8** | **0,3** |
| **05** | **ВИД В** | **0,5** | **2** | **2,4** | **0,95** | **44** | | **0,20** | **АФМ-8** | | **1E–7** | **0,1** |
| **06** | **ВИД А** | **0,7** | **3** | **2,7** | **0,97** | **40** | | **0,25** | **ФМ-8** | | **3E–9** | **0,05** |
| **07** | **ВИД Б** | **0,9** | **4** | **3,5** | **0,99** | **37** | | **0,30** | **КАМ-16** | | **4E–9** | **0,2** |
| **08** | **ВИД В** | **1,2** | **2,5** | **50** | **0,90** | **50** | | **0,35** | **ФМ-4** | | **2E–8** | **0,25** |
| **09** | **ВИД А** | **1,5** | **3,5** | **2,5** | **0,95** | **39** | | **0,40** | **АФМ-8** | | **4E–8** | **0,3** |
| **10** | **ВИД Б** | **1,8** | **4,5** | **12** | **0,97** | **36** | | **0,20** | **ФМ-8** | | **2E–9** | **0,1** |
| **11** | **ВИД В** | **2,0** | **3** | **35** | **0,99** | **38** | | **0,25** | **КАМ-16** | | **3E–9** | **0,05** |
| **12** | **ВИД А** | **2,5** | **4,5** | **14** | **0,90** | **42** | | **0,30** | **ФМ-4** | | **9E–9** | **0,2** |
| **13** | **ВИД Б** | **2,8** | **6,5** | **18** | **0,95** | **33** | | **0,35** | **АФМ-8** | | **5E–9** | **0,25** |
| **14** | **ВИД В** | **3,0** | **2,5** | **80** | **0,97** | **44** | | **0,40** | **ФМ-8** | | **1E–8** | **0,3** |
| **15** | **ВИД А** | **0,2** | **7** | **12,5** | **0,99** | **39** | | **0,20** | **КАМ-16** | | **5E–9** | **1,0** |
| **16** | **ВИД Б** | **0,4** | **8** | **15** | **0,90** | **37** | | **0,25** | **ФМ-4** | | **2E–9** | **0,05** |
| **17** | **ВИД В** | **0,6** | **2** | **1,6** | **0,95** | **50** | | **0,30** | **АФМ-8** | | **4E–7** | **0,2** |
| **18** | **ВИД А** | **0,8** | **3,5** | **4,5** | **0,97** | **45** | | **0,35** | **ФМ-8** | | **1E–8** | **0,25** |
| **19** | **ВИД Б** | **1,0** | **4,5** | **7,0** | **0,99** | **36** | | **0,40** | **КАМ-16** | | **3E–9** | **0,3** |
| **20** | **ВИД В** | **1,1** | **3** | **0,8** | **0,90** | **38** | | **0,20** | **ФМ-4** | | **5E–7** | **0,1** |
| **21** | **ВИД А** | **1,3** | **5,5** | **7,5** | **0,95** | **42** | | **0,25** | **АФМ-8** | | **2E–9** | **0,05** |
| **22** | **ВИД Б** | **1,4** | **6,5** | **9,5** | **0,97** | **37** | | **0,30** | **ФМ-8** | | **4E–9** | **0,2** |
| **23** | **ВИД В** | **1,6** | **2** | **10** | **0,99** | **44** | | **0,35** | **КАМ-16** | | **6E–8** | **0,25** |
| **24** | **ВИД А** | **2,2** | **4,5** | **11** | **0,90** | **42** | | **0,40** | **ФМ-4** | | **2E–8** | **0,3** |
| **25** | **ВИД Б** | **2,4** | **6,5** | **8,5** | **0,95** | **33** | | **0,20** | **АФМ-8** | | **4E–9** | **0,1** |
| **26** | **ВИД В** | **2,6** | **2,5** | **0,1** | **0,97** | **50** | | **0,25** | **ФМ-8** | | **1E–7** | **0,05** |
| **27** | **ВИД А** | **1,9** | **3,5** | **2,5** | **0,99** | **45** | | **0,30** | **КАМ-16** | | **5E–9** | **0,2** |
| **28** | **ВИД Б** | **0,1** | **3** | **2,7** | **0,90** | **46** | | **0,35** | **ФМ-4** | | **6E–8** | **0,25** |
| **29** | **ВИД В** | **0,3** | **2** | **22** | **0,95** | **38** | | **0,40** | **АФМ-8** | | **2E–8** | **0,3** |
| **30** | **ВИД А** | **0,5** | **3,5** | **2,5** | **0,97** | **39** | | **0,20** | **ФМ-8** | | **8E–9** | **0,1** |
| **31** | **ВИД Б** | **0,7** | **4,5** | **12** | **0,99** | **42** | | **0,25** | **КАМ-16** | | **3E–9** | **0,5** |
| **32** | **ВИД В** | **0,9** | **2,5** | **11** | **0,90** | **44** | | **0,30** | **ФМ-4** | | **2E–8** | **0,2** |
| **33** | **ВИД А** | **1,1** | **4,5** | **14** | **0,95** | **36** | | **0,35** | **АФМ-8** | | **7E–9** | **0,25** |
| **34** | **ВИД Б** | **1,3** | **7** | **12,5** | **0,97** | **39** | | **0,40** | **ФМ-8** | | **5E–9** | **0,3** |
| **35** | **ВИД В** | **1,5** | **3** | **0,1** | **0,99** | **50** | | **0,20** | **КАМ-16** | | **2E–6** | **0,1** |
| **36** | **ВИД А** | **1,7** | **8** | **15** | **0,90** | **37** | | **0,25** | **ФМ-4** | | **2E–9** | **0,05** |
| **37** | **ВИД Б** | **1,9** | **3,5** | **4,5** | **0,95** | **45** | | **0,30** | **АФМ-8** | | **2E–8** | **0,2** |
| **38** | **ВИД В** | **2,1** | **2** | **18** | **0,97** | **38** | | **0,35** | **ФМ-8** | | **5E–8** | **0,25** |
| **39** | **ВИД А** | **2,3** | **4,5** | **7,0** | **0,99** | **36** | | **0,40** | **КАМ-16** | | **3E–9** | **0,3** |
| **40** | **ВИД Б** | **2,5** | **5,5** | **7,5** | **0,90** | **42** | | **0,20** | **ФМ-4** | | **8E–9** | **0,1** |
| **41** | **ВИД В** | **2,7** | **3** | **56** | **0,95** | **44** | | **0,25** | **АФМ-8** | | **3E–9** | **0,05** |
| **42** | **ВИД А** | **2,9** | **6,5** | **9,5** | **0,97** | **39** | | **0,30** | **ФМ-8** | | **4E–9** | **0,2** |
| **43** | **ВИД Б** | **0,2** | **4,5** | **11** | **0,99** | **36** | | **0,35** | **КАМ-16** | | **2E–9** | **0,25** |
| **44** | **ВИД В** | **0,4** | **2,5** | **44** | **0,90** | **50** | | **0,40** | **ФМ-4** | | **3E–8** | **0,3** |
| **45** | **ВИД А** | **0,6** | **6,5** | **8,5** | **0,95** | **33** | | **0,20** | **АФМ-8** | | **4E–9** | **0,1** |
| **46** | **ВИД Б** | **3,5** | **3,5** | **2,5** | **0,97** | **45** | | **0,25** | **ФМ-8** | | **4E–9** | **0,05** |
| **47** | **ВИД В** | **1,0** | **2** | **95** | **0,99** | **44** | | **0,30** | **КАМ-16** | | **5E–9** | **0,2** |
| **48** | **ВИД А** | **1,2** | **3** | **2,7** | **0,90** | **40** | | **0,35** | **ФМ-4** | | **7E–8** | **0,25** |
| **49** | **ВИД Б** | **1,4** | **3,5** | **2,5** | **0,95** | **45** | | **0,40** | **АФМ-8** | | **4E–8** | **0,3** |

***Примітка:*** Запис 4Е–8 означає 4⋅10–8.

**Додаток Б. Довідкові співвідношення**

|  |  |
| --- | --- |
| при *a* > 0 | при *a* > 0  *V*(*z*) =  = 0,5 – *V*(*z*)  *V*(*z*) ≈ 0,65exp(–0,44(*z* + 0,75)2). |

# Додаток В. ОСНОВНІ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1 Пояснювальна записка виконується на одному боці аркуша (можна і з двох боків) білого паперу формату А4 (297х210 мм). Текст пояснювальної записки виконується рукописним способом (чорнилом або пастою темного кольору) або на ЕОМ у редакторі Word, шрифт Times New Roman Cyr, розмір 14, міжрядковий інтервал одинарний. На аркуші залишають поля: ліве, верхнє та нижнє не менш за 20 мм, праве не менш за 10 мм.

2 Пояснювальна записка повинна містити:

1. титульний аркуш;
2. вихідні дані до завдання на курсову роботу;
3. чистий аркуш для рецензії керівника;
4. зміст;
5. основну частину;
6. висновки;
7. перелік посилань.

3 Сторінки пояснювальної записки нумерують арабськими цифрами. Номер сторінки проставляють у правому верхньому куті аркуша.

4 Текст пояснювальної записки ділять на розділи у відповідності до завдання. Розділи повинні мати порядкові номери арабськими цифрами та назви.

5 Текст пояснювальної записки має бути чітким і не допускати різних тлумачень. При цьому використовуються терміни, позначення та визначення, вживані в курсі ТЕЗ і попередніх курсах ТЕК і вищої математики, а також у рекомендованій навчальній та спеціальній літературі. До використаних формул повинні бути надані посилання на джерела, а до використаних числових значень – пояснення щодо їх походження. Результати розрахунків супроводжуються зазначенням відповідних одиниць виміру.

6 Ілюстрації (графіки, схеми) виконуються комп'ютерними засобами, а при рукописному способі – тушшю, чорним чорнилом або пастою на аркушах з текстом, або на кальці, при цьому в тексті залишають вільне місце для кальки.

7 Ілюстрації та таблиці обов’язково нумерують та надають назву (наприклад, “Рисунок 1.1 – Структурна схема системи передачі” – перший рисунок першого розділу). Номер та назва розміщуються: для ілюстрацій – внизу (під ілюстрацією), для таблиць – зверху (над таблицею).

8 Умовні графічні позначення на функціональних і структурних схемах повинні відповідати вимогам ЄСКД.

9 Перелік посилань містить у собі посилання на підручники, навчальні посібники та книги, які були використані під час виконання роботи. Посилання в тексті подаються у квадратних дужках. У дужках проставляють номер, під яким джерело значиться в переліку посилань.