

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ: «ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРО-ЗВ'ЯЗКУ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ВСІХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

Луцьк
2023

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електро-зв'язку» (для студентів денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей освітнього ступеня «бакалавр») / [Уклад. Д.О. Жуковська, Г.О. Теличко]. – Луцьк: ДонНТУ, 2023. – 51 с.

Методичні вказівки складені відповідно до робочих програм, розроблених для навчальних планів підготовки інженера в технічних галузях. Розглядаються сучасні методи частотного аналізу полігармонійних сигналів цифровими засобами, принципи побудови систем зв'язку із частотним та часовим поділом каналів, аналіз вузькосмугових сигналів, їх властивостей, отримання та застосування у системах зв'язку, методи перетворення детермінованих та випадкових сигналів під час проходження їх через лінійні та безінерційні нелінійні ланки каналів зв'язку, дослідження властивостей та характеристик системи ФАПЧ, процесів перетворення сигналів у дискретних каналах зв'язку, реалізованих з урахуванням безперервного ЧМ каналу. Дисципліна покликана навчити студентів застосуванню сучасних методів та засобів отримання, передавання, обробки та зберігання інформації. Методичні вказівки націлені на виконання навчально-дослідних робіт студентів під час лабораторного практикуму.

Укладачі: _____ Жуковська Д.О., асист. каф. автоматики та телекомунікацій
(підпис)
_____ Теличко Г.О., к.т.н., доц. каф. автоматики та
(підпис) телекомунікацій

Рецензент: _____ Воропаєва А.О., к.т.н., доц., доцент кафедри
(підпис) інформаційно-телекомунікаційних
технологій та систем Івано-Франківського
національного технічного університету
нафти та газу

Відповідальний за випуск: _____ Поцєпаєв В.В., к.т.н., доц., в.о. завідувача
кафедри автоматики та телекомунікацій

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № _____ від _____

Розглянуто на засіданні кафедри автоматики та телекомунікацій,
протокол № 15 від 07.06.2023р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Лабораторна робота № 1 Цифровий частотний аналіз полігармонійних сигналів.....	6
2. Лабораторна робота № 2 Системи зв'язку із частотним поділом каналів.....	13
3. Лабораторна робота № 3 Системи зв'язку з часовим поділом каналів.....	21
4. Лабораторна робота № 4 Вузькосмугові сигнали та їх властивості	26
5. Лабораторна робота № 5 Проходження детермінованих та випадкових сигналів через лінійні ланки каналів зв'язку	31
6. Лабораторна робота № 6 Системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) у техніці зв'язку.....	37
7. Лабораторна робота № 7 Дослідження перетворень сигналів у дискретному каналі зв'язку	44
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	51

ВСТУП

Метою вивчення дисципліни «Теорія електро-зв'язку» є формування у студентів знань щодо методів частотного аналізу полігармонійних сигналів цифровими засобами, принципів побудови систем зв'язку із частотним та часовим поділом каналів, аналізу вузькосмугових сигналів, їх властивостей, отримання та застосування у системах зв'язку, методів перетворення детермінованих та випадкових сигналів під час проходження їх через лінійні та безінерційні нелінійні ланки каналів зв'язку, дослідження властивостей та характеристик системи ФАПЧ, процесів перетворення сигналів у дискретних каналах зв'язку, реалізованих з урахуванням безперервного ЧМ каналу. Дисципліна покликана навчити студентів застосуванню сучасних методів та засобів отримання, передавання, обробки та зберігання інформації.

Завдання: отримання знань щодо базових методів, способів та засобів отримання, передавання, обробки та зберігання інформації.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати: моделі сигналів і каналів, що використовуються у інформаційних системах передачі та добування інформації; типові структури систем обміну інформацією; роль і місце основних функціональних елементів та процесів в цих системах; основні положення теорії інформації, методи оцінки інформаційних характеристик джерел повідомлень та каналів передачі інформації; основні положення теорії та методів економного і завадостійкого кодування повідомлень; основні методи передачі повідомлень, види модуляції і характеристики сигналів, що при цьому застосовуються, а також способи їх оптимальної обробки;

вміти: обирати параметри для представлення аналогових сигналів у цифровій формі; використовувати положення теорії інформації для розрахунків інформаційної ємності та продуктивності джерел, їх надлишковості, пропускну здатності каналів і швидкості передачі інформації в них; кодувати і декодувати інформаційні повідомлення, використовуючи методи побудови найбільш поширених завадостійких кодів; аналізувати основні методи передачі повідомлень, види модуляції та характеристики сигналів, що при цьому застосовуються, і способи їх оптимальної обробки.

У процесі вивчення навчальної дисципліни «Теорія електро-зв'язку» студенти виконують лабораторні роботи. Звіт до лабораторних робіт студенти оформляють на окремих аркушах форматом А4 відповідно до змісту і він повинен містити такі розділи:

- титульна сторінка;
- тема та мета роботи;
- постановка завдання;

- опис усіх етапів виконання роботи;
- висновки за результатами роботи.

Кожна лабораторна робота, що виконана і захищена за графіком, встановленим робочою програмою курсу, оцінюється за критерієм оцінювання знань за 100-бальною шкалою.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ЦИФРОВИЙ ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ ПОЛІГАРМОНІЙНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи: вивчити частотний аналіз полігармонійних сигналів цифровими засобами.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. 1. Завантажити виконуючий файл 1.svu (рис. 1.1). Записати параметри моделі моделі, параметри системного часу. Порівняти ці параметри із параметрами трикомпонентного полігармонічного сигналу (1.2).

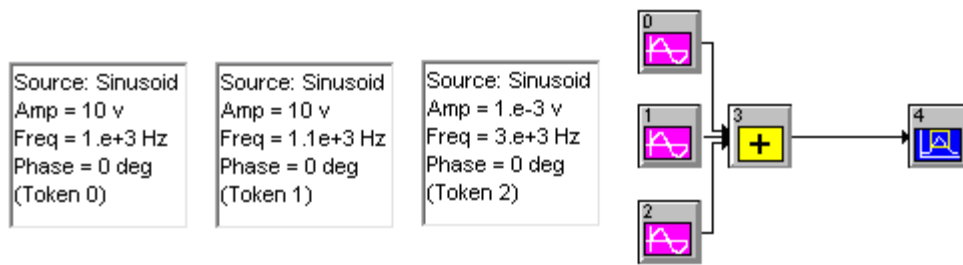


Рисунок 1.1. – Структурна схема моделі

Змінити параметри моделі відповідно до індивідуального варіанта завдання (див. табл. 1.1), а також доповнити її ще одним модулем, моделюючи цим чотирикомпонентний сигнал. У таблиці варіантів наведено значення амплітуд A_{ma} та частот f джерел гармонійних коливань. Амплітуди перших двох джерел задані у вольтах, а амплітуди третього та четвертого джерел – у мілівольтах. Фазу коливань завжди слід прийняти рівною 0° .

Слід зазначити, що зміна параметрів джерел може спричинити необхідність коригування параметрів системного часу моделі (у вікні, що викликається за командою *Define System Time* або поєднанням клавіш *Ctrl+T*). Необхідно виставити системну частоту дискретизації (*Sample Rate*) як мінімум у 2 рази більшу, ніж максимальна частота сигналів, що використовуються в моделі (у цьому випадку рекомендується значення $\approx 2,5 \cdot f_4$).

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань

N вар.	Сигнал 1		Сигнал 2		Сигнал 3		Сигнал 4	
	A_{max1}, B	$f_1, кГц$	A_{max2}, B	$f_2, кГц$	$A_{max3}, мВ$	$f_3, кГц$	$A_{max4}, мВ$	$f_4, кГц$
1	11	1,9	11	2	2	4,9	9	8,6
2	12	4,8	13	4,9	6	8,3	3	11,1
3	20	4,5	20	4,6	10	7,8	3	10,6
4	10	3,4	10	3,5	3	5,8	2	8,7
5	36	3,3	35	3,4	4	5,6	9	7,7
6	22	4,3	23	4,4	1	7,9	9	11,4
7	25	2,2	25	2,3	4	5,2	6	7,9
8	16	3,7	17	3,8	2	6,4	10	9,9
9	24	2,3	23	2,4	10	4,9	10	7
10	20	1,5	19	1,6	5	4,7	6	8,2
11	24	4,6	24	4,7	6	6,8	2	8,8
12	35	3,1	34	3,2	3	5,5	9	9,1
13	15	1,1	16	1,2	2	4,5	1	7,9
14	28	2	27	2,1	9	4,5	6	7,4
15	10	2	11	2,1	1	4,1	1	7,4

2. Запустити модель на цикл моделювання. Отримати графіки вихідного сигналу (*Sink4*) та його спектру. Використовуючи курсор, що переміщається «мишею», і поле індикації його координат (область правого верхнього кута вікна аналізу), оцінити характерні величини подання сигналів в аналізовувальних вікнах (мінімальне і максимальне значення амплітуд, що огинає, період зміни огинаючої, період частотного заповнення). Порівняти отримані результати із параметрами ідеального сигналу. Скориставшись «калькулятором» пакета *System View*, отримати спектр потужності досліджуваного сигналу, що виділяється на резисторі в 1 Ом. Відзначити вплив «відпливу» енергії одних спектральних компонент сигналу на сусідні та її вплив на достовірність результатів оцінювання відносної амплітуди та частоти. Зробити висновки щодо можливості та достовірності оцінки параметрів досліджуваного сигналу.

3. Піддати часову реалізацію сигналу «зважування» (*windowing*) з використанням стандартних вікон Барлетта (*Barlett*), Ханнінга (*Hanning*), Еланікса (*Elanix*). Для кожного випадку отримат спектр зваженого сигналу. Зробит оцінку параметрів амплітуди та частоти кожної з компонентів сигналу в кожному випадку. Виконати ескізи графіків спектрів із зазначенням отриманих оцінок. Порівняти отримані результати із параметрами ідеального сигналу. Зробити висновки щодо можливості та достовірності оцінки параметрів під час використання «зважувальних» вікон.

4. Внеси до складу сигналу адитивний Гаусов шум, шляхом доповнення джерел ще одним – джерелом Гауссового шуму (модуль *Gauss Noise* в бібліотеці *Source* -> *Noise/PN*) з математичним очікуванням (*mean*) рівним 0 і середньоквадратичним відхиленням (*Std Deviation*) рівним 0,3 мВ. Отримати графік спектра з використанням

вікна Ханнінга. Отримати оцінки частоти та амплітуди для кожної спектральної компоненти. Так як перешкода носить випадковий характер, слід повторити цикл моделювання та отримання оцінок сигналу багаторазово (не менше п'яти разів), а шукані оцінки знаходити як середні величини значень оцінюваних параметрів для кожного циклу моделювання. Повторити наведену вище послідовність отримання оцінок параметра сигналу для значень середньоквадратичного відхилення 1 мВ і 10 мВ. Дані розрахунків подати у вигляді таблиці. Навести графік спектру сигналу другого циклу моделювання. Зробити висновки щодо впливу перешкод на можливість оцінки параметрів сигналу та його достовірність.

5. Виключити із моделі блок джерела Гауссова шуму, відновивши тим самим вихідну структуру моделі. Викликати панель налаштувань системного часу та встановити число циклів моделювання (*No. of System Loops*) рівним 10. Виконати пункт 2 цього при нових налаштуваннях. Виконати пункт 3 (використовуючи лише вікно Еланікс). Зробити висновки щодо впливу довжини реалізації на достовірність оцінок. Позначити вплив вікна, що зважає, на отримані результати в порівнянні з пунктом 2.

6. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Цифрові засоби широко застосовуються в техніці зв'язку для обробки сигналів та оцінки їх параметрів. Їх застосування дозволяє суттєво підвищити якість роботи систем. Однак застосування цифрових методів мають деякі особливості порівняно з традиційними аналоговими методами, які необхідно знати для отримання достовірних результатів та правильної їхньої інтерпретації. Зокрема, слід правильно та обґрунтовано задавати тривалість досліджуваної реалізації, параметри часової дискретизації, динамічний діапазон, вид використовуваної шкали для представлення результатів. Крім того, слід брати до уваги деякі специфічні ефекти, що мають місце у цифрових системах, пов'язані з обробкою вибірок кінцевого об'єму, обмеженим динамічним діапазоном, впливом шумів.

Дана робота спрямована на вивчення зазначених питань засобами моделюючого пакета System View.

У багатьох випадках електричний сигнал $u(t)$ зручно розглядати як суму обмеженої кількості ($n < \infty$) гармонійних компонентів:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n u_{im} \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1.1)$$

де u_{im} – амплітуда;

$\omega_i = 2\pi f_i$ – частота;

φ_i – фаза i -ї компоненти.

Для неперіодичних сигналів таке уявлення є наближеним, однак, за рахунок вибору досить великого значення n , як правило, можна отримати задовільний ступінь наближення.

Гармонічні компоненти у складі сигналу можуть мати близькі частоти, але значно відрізнятися за амплітудою. Крім того, тривалість реалізації досліджуваного сигналу може виявитися недостатньою для отримання надійних оцінок параметрів. Занадто велика тривалість вимагатиме великого обсягу пам'яті ЕОМ і часу на обробку. Ефективність розв'язання задачі частотного аналізу може бути суттєво підвищена шляхом раціонального завдання обсягу вибірки, вибору програмних інструментів обробки реалізацій, а також засобів подання та візуалізації результатів.

У роботі досліджуваним сигналом є трикомпонентний сигнал:

$$u(t) = 10 \sin 2\pi 1000t + 10 \sin 2\pi 1100t + 0.001 \sin 2\pi 3000t. \quad (1.2)$$

Вираз (1.2) описує необмежений за тривалістю процес. За вказаним виразом може бути побудований ідеальний (теоретичний) спектр амплітуд. Реально ж, ми маємо можливість спостерігати та досліджувати лише процеси обмеженої тривалості. Якщо на основі таких обмежених реалізацій проводиться спектральне оцінювання, то отримуваний оціночний спектр може мати значні відмінності від ідеального. Спотворення результатів виникають внаслідок явища «витікання» – розтікання енергії зосереджених спектральних компонентів у прилеглих до них частотних областях. Витік знижує роздільну здатність спектрального аналізу, що призводить до неможливості виділити близькі за частотою компоненти.

Іншим негативним наслідком витоку є ефект маскування компонент малого рівня, присутніх у складі сигналу. Явище витоку можна істотно зменшити, якщо забезпечити відносно плавне наростання та зменшення рівня досліджуваного сигналу на початку і в кінці реалізації. Для цього використовуються часові вікна – унімодальні функції часу, визначені на тому ж часовому інтервалі, що й досліджувана реалізація, що змінюються в інтервалі $(0, 1)$. Прикладами таких вікон можуть бути вікно Барлетта (у вигляді рівнобедреного трикутника), вікно Ханнінга (у вигляді косинусоїди, взятої зі зворотним знаком і зміщеною по осі ординат на 1) та ін.

Застосування часового вікна сигналу (зважування сигналу) полягає у множенні обмеженої реалізації на функцію часового вікна. Спектр зваженого сигналу, звичайно, відрізняється від ідеального спектру. Однак він може мати кращі характеристики спектрального оцінювання, зокрема, менший маскуючий ефект у ближній або дальній зоні по відношенню до гармонійної компоненти, що його породжує. Це

дозволяє виявляти у складі сигналу складові малого рівня, забезпечуючи глибший його аналіз.

Зменшуючи вплив маскуючого ефекту явища витоку, вікна, що зважують, можуть погіршити інші характеристики спектрального оцінювання, зокрема, дозвіл за частотою. Тому при дослідженні реальних сигналів часто доводиться підбирати відповідне вікно, що забезпечує найкращу оцінку того чи іншого параметра спектра складного сигналу.

Ефективність вікон визначається шляхом порівняння спектральних оцінок, одержуваних з їх застосуванням, з ідеальним спектром досліджуваного сигналу. Як кількісні заходи ефективності використовуються перевищення рівня оцінюваної (слабкої) гармонійної компоненти над перешкодою, викликаною витоком, а також роздільна здатність, що визначається як мінімальна відстань по частоті між компонентами, при якому вони ще помітні як такі.

Явище витік і застосування вікон, що зважують, не дозволяють здійснювати безпосередню оцінку абсолютного рівня амплітуд гармонійних компонент досліджуваного сигналу, проте дозволяють отримувати відносні оцінки рівня компонент у складі сигналу. Абсолютні значення складових можуть бути знайдені, якщо до складу досліджуваного сигналу ввести еталонну (калібрувальну) гармонійну компоненту відомої амплітуди і на основі оцінки її рівня у складі спектра досліджуваного сигналу розрахувати амплітуд інших компонент спектру.

У ході виконання роботи оцінювання рівня спектральних компонент доцільно здійснювати через спектр потужності сигналу (струму або напруги), що виділяється на опорі в 1 Ом. Отримані у разі значення оцінок рівня залежить від того, який фізичної величиною (струмом чи напругою) представлений електричний сигнал. Нагадаємо, що

$$U = \sqrt{PR}, \quad I = \sqrt{\frac{P}{R}}, \quad (1.3)$$

де P - потужність;

U , I – діючі (або середньоквадратичне) значення напруги та струму;

R – опір ланцюга.

Для забезпечення можливості представлення одному графіку як малих, і великих рівнів сигналів одночасно необхідно використовувати нелінійний (логарифмічний) масштаб. Відповідні осі координат у такому разі ануються у децибелах. Нагадаємо, що

$$D[\partial B] = 10 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{U}{U_0} = 20 \log \frac{I}{I_0}; \quad (1.4)$$

$$D[\partial B_m] = 10 \log \frac{P}{P_0 = 1 \text{ мВт}}; \quad (1.5)$$

$$P = P_0 10^{\frac{D}{10}}. \quad (1.6)$$

де I_0, U_0, P_0 – певний еталонний рівень струму, напруги чи потужності.

Слід мати на увазі, що в цифровій моделюючій системі, що використовується в даній і подальшій роботах, безперервні залежності видаються дискретно своїми відліками, тому якість виведених на екран графіків істотно залежить від кількості точок, що відображають ці відліки.

При недостатній кількості точок картина, що представляється на екрані, може не відповідати дійсній через брак інформації для її відновлення за наявними відліками.

В ході роботи деякі параметри досліджуваного сигналу (1.2) можуть змінюватися, до його складу може бути введена додаткова компонента у вигляді випадкового Гауссового процесу (завади).

Завдання даної роботи реалізуються шляхом вибору відповідних зважувальних вікон, зміни тривалості реалізації, а також параметрів візуалізації, за яких забезпечуються найкращі результати оцінки відповідних параметрів.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структура моделі, її параметри, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів із зазначенням отриманих оцінок параметрів, а також висновки відповідно до пунктів 2 – 5 практичного завдання.
4. Висновки по роботі загалом.

Контрольні питання

1. До якого класу сигналів має бути віднесений досліджуваний у роботі сигнал на етапі завдання, різних етапах обробки, на етапі видачі результатів обробки?
2. Як можна оцінити абсолютне значення амплітуди спектральної компоненти сигналу за його спектром амплітуд, представленим у логарифмічному масштабі?
3. Як впливає збільшення обсягу вибірки на точність оцінки частоти гармонійної компоненти складного сигналу?
4. Як впливає використання вікон, що «зважують», на точність частотних оцінок? Відповідь сформулювати стосовно як для «сильних», так і для «слабких» компонентів, що входять до складу сигналу.

5. У яких випадках доцільно використовувати логарифмічний, а яких лінійний масштаб при оцінюванні складного, полігармонического сигналу?.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [4], [7], [10].

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЧАСТОТНИМ ПОДІЛОМ КАНАЛІВ

Мета роботи: вивчити принципи побудови систем зв'язку з частотним розподілом каналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл 2_1.svu (див. рис. 2.1). Змінити параметри існуючих модулів відповідно до завдання індивідуального варіанта (див. табл. 2.1). Крім того, слід доповнити систему моделлю третього приймально-передавального тракту. У таблиці варіантів наведено значення амплітуд (A_{max}) і частот (f в Гц) повідомлень, що передаються, а також амплітуд (U_n) і частот (f_n в кГц) несучих коливань кожного каналу. Представити структуру моделі, запишіть параметри модулів та параметри системного часу. Перевірити відповідність параметрів системного часу до вимог теореми Котельникова.

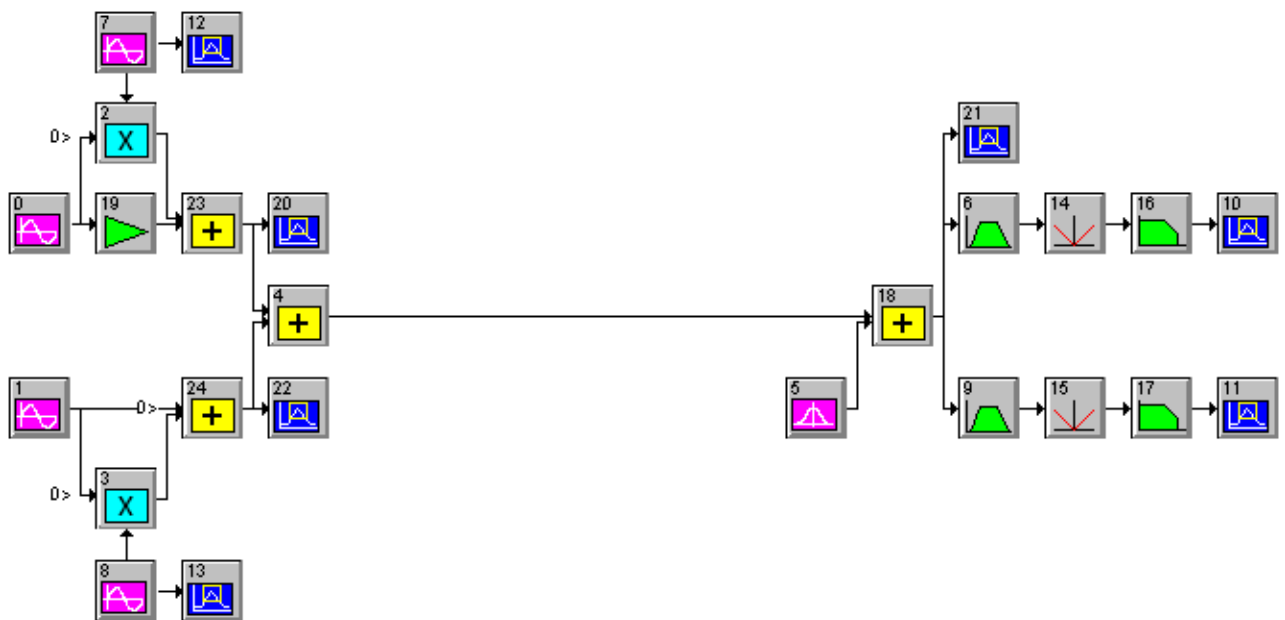


Рисунок 2.1. – Структурна схема моделі, що обробляє безперервні повідомлення

2. Запустити модель на цикл моделювання. Отримати часові реалізації вихідних повідомлень (Sink 12, 13) та модульованих сигналів, які їх представляють (Sink 20, 22). Порівняти отримані графіки. У чому виявляються характерні відмінності сигналів різних передавачів? Якими особливостями структури передавачів вони спричинені? Оцінити параметри модульованих сигналів (максимальне та мінімальне значення

рівня огинаючої, її період та частоту, період та частоту гармонійного заповнення).

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань до першої частини лабораторної роботи

N вар.	Канал 1				Канал 2				Канал 3			
	$A_{max1},$ B	$f_1, Гц$	$U_{n1},$ B	$f_{n1},$ $кГц$	$A_{max2},$ B	$f_2, Гц$	$U_{n2},$ B	$f_{n2},$ $кГц$	$A_{max3},$ B	$f_3, Гц$	$U_{n3},$ B	$f_{n3},$ $кГц$
1	1,6	360	6	42	0,5	280	8	72	0,8	380	3	100
2	2	170	9	39	0,1	400	8	69	0,7	220	4	90
3	1,6	410	7	23	0,2	360	7	50	1	490	10	71
4	2	340	6	36	0,5	250	6	57	1	320	5	86
5	1	420	5	36	0,2	200	8	58	0,4	190	6	86
6	1,2	220	6	28	1	360	10	53	0,4	120	4	81
7	2	400	6	31	0,1	140	8	60	0,8	130	4	82
8	1,7	500	10	35	0,7	140	10	64	0,8	230	8	94
9	1,1	410	7	28	0,7	480	3	58	0,2	170	5	87
10	1	150	10	24	0,9	180	10	53	0,3	210	5	79
11	1	300	8	19	0,7	460	7	49	0,8	110	7	71
12	1	230	6	43	0,2	170	5	63	0,2	420	5	92
13	1,8	360	5	13	0,4	190	5	39	0,9	110	8	64
14	2	110	9	21	0,5	410	3	41	0,5	220	6	69
15	1,9	130	9	28	0,5	430	6	58	0,9	350	3	80

3. Отримати спектри модульованих сигналів на виході передавачів. Для отримання детальної картини спектра в області несучої частоти слід використовувати зміну масштабу по осі абсцис. Оцінити ширину спектра кожного сигналу на рівні -20 дБ щодо рівня несучого коливання.

4. Отримати графік сигналу в лінії зв'язку та спектр цього сигналу. Оцінити рівень перекриття спектрів сигналів різних передавачів. Зробити висновки про можливість поділу сигналів, допустимий рівень просочування не повинен перевищувати -20дБ у порівнянні з енергією (потужністю) суттєвої частини спектра корисного сигналу. Оцініть можливості зближення частот несучих коливань передавачів без порушення умов частотного поділу. Обрати та обґрунтувати значення частот несучих коливань для випадку допустимого перекриття спектрів на рівні -20дБ.

5. Отримати графіки прийнятих повідомлень на виходах приймачів (Sink 10, 11) і порівняти їх з переданими (Sink 12, 13). Описати відмінності графіків повідомлень та пояснити, чим викликані спотворення. Оцінити час розповсюдження повідомлень по каналу зв'язку. Зробити висновок щодо можливості відновлення інформації. У звіті достатньо навести один із отриманих графіків.

6. Встановити середньоквадратичне відхилення Гаусового шуму в лінії зв'язку 0,1 В і запустити модель на цикл моделювання. Отримати графік сигналу у лінії зв'язку та його спектр. Виконати п.5 для даних значень шуму. Збільшуючи СКВ шуму, визначити його максимальне

значення, за якого відновлення повідомлення ще можливе. Яке з цих повідомлень найбільш схильне до впливу перешкод?

7. Виконати пункти 1...6 для другої моделі системи, що обробляє дискретні повідомлення. Для цього необхідно запустити виконуючий файл 2_2.svu (див. рис. 2.2). Змінити параметри модулів відповідно до індивідуального завдання (див. табл. 2.2).

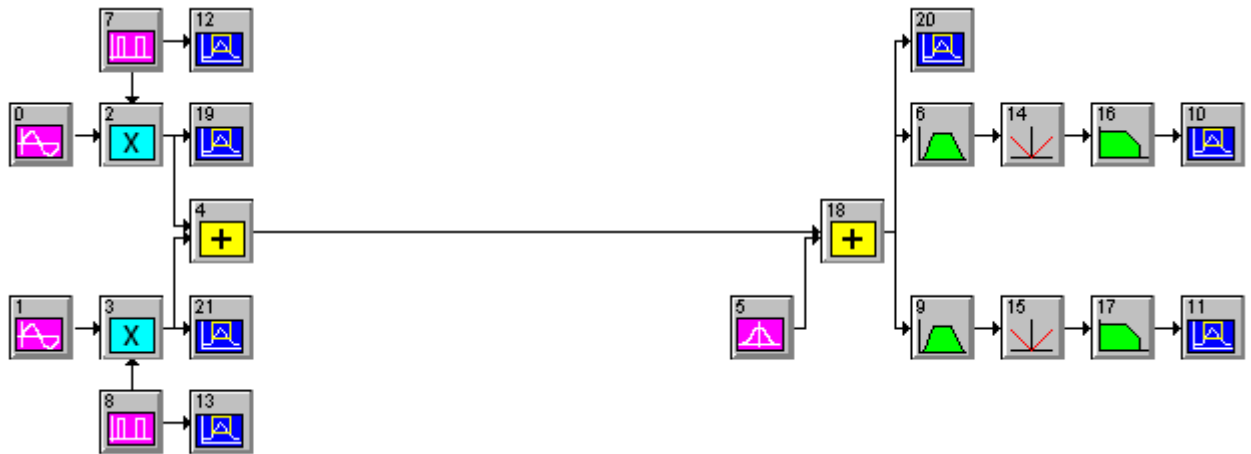


Рисунок 2.2 – Структурна схема моделі, що обробляє дискретні повідомлення

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань до другої частини лабораторної роботи

№ вар.	Повідомлення 1			Повідомлення 2			Повідомлення 3	
	Ампл. $A_{\max}$, В	Частота f , Гц	Шпарування S	Рівень $A_{\min}$, В	Рівень $A_{\max}$, В	Частота f , Гц	Рівень $A_{\max}$, В	Частота f , Гц
1	0,8	220	1,4	0,1	0,7	180	1,3	190
2	0,5	140	3,6	0,2	0,6	210	0,7	130
3	0,7	80	2,9	-0,1	0,7	240	1,4	160
4	1,1	170	1,5	0,4	1,4	180	1,4	260
5	0,6	100	1,5	-0,4	1	180	1,2	120
6	0,9	190	4,1	0,2	1,4	80	1	180
7	0,5	120	1,3	0,2	0,8	220	1,2	140
8	0,9	90	1,7	0,3	1,4	150	0,6	120
9	1,3	220	2,5	-0,5	0,6	180	1,2	200
10	1,2	80	1,5	-0,1	0,5	200	1,1	200
11	1,2	240	1,3	-0,3	0,6	90	1,1	130
12	1,1	160	1,5	0,4	1,1	130	1,4	220
13	1,4	260	1,5	-0,2	1,1	160	0,6	250
14	1,1	230	1,8	-0,1	1,1	210	0,9	190
15	1,1	250	2,1	-0,1	1	80	0,6	260

Параметри несучих коливань слід використовувати із завдання до першої частини. Амплітуда сигналу другого передавача у процесі модуляції додатково посилюється з коефіцієнтом посилення $K = 2$ (використовується модуляція без придушення несучої). Крім того, слід зазначити, що в деяких випадках (варіантах) може знадобитися корекція

частоти несучої одного або двох каналів з метою унеможливлення їх накладання та погіршення якості зв'язку. У цьому випадку самостійно задати частоту несучої та обґрунтувати своє рішення.

На приймальній стороні ширину смуги пропускання смугових фільтрів (СФ) селекторів каналів слід встановити приблизно 6-8 кГц. Частоту зрізу низькочастотних фільтрів (ФНЧ) детекторів огибаючої слід вибрати рівною 1-2 кГц.

8. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Одне з найважливіших завдань у телекомунікаційних системах – завдання розподілу сигналів, що передаються спільно з однієї фізичної лінії зв'язку. Розподіл здійснюється за заздалегідь відомими і незмінними ознаками, індивідуальними для кожного з сигналів, що розділяються.

Найчастіше під час створення систем зв'язку застосовується розподіл сигналів за частотною ознакою. На основі частотного розподілу реалізуються системи багатоканального телефонного та радіозв'язку, системи супутникового зв'язку, системи радіомовлення та телебачення. Такі системи містять у своєму складі групу передавачів та приймачів, що взаємодіють через загальне середовище поширення сигналів (кабельна лінія, навколотземний та космічний простір – «ефір» тощо).

У найпростішому випадку кожна пара передавач – приймач і середовище, що їх пов'язує, становлять окремий канал. Для забезпечення можливості одночасної передачі повідомлень по всіх каналах необхідно виконати умови незалежності їх роботи, виключення впливу один на одного, що складає завдання поділу сигналів і відповідних каналів зв'язку. Основою частотного поділу каналів є такі положення:

- кожен з передавачів формує та видає в середовище розповсюдження сигнали, які мають спектри, що не перекриваються зі спектрами сигналів інших передавачів;
- кожен з приймачів має засоби виділення сигналів тільки потрібного передавача та придушення сигналів інших;
- середовище поширення сигналів має лінійні властивості.

Дана робота спрямована на вивчення реалізації цих положень на прикладі найпростішої двоканальної систем зв'язку, що моделюється засобами пакета System View.

Об'єктом дослідження у цій роботі є модель двоканальної системи зв'язку. У роботі передбачається дослідження двох версій системи та, відповідно, двох версій моделі – перша, для передачі безперервних повідомлень (див. рис. 2.1) та друга, – для передачі дискретних (див. рис. 2.3). Повідомлення першої моделі представлені гармонійними коливаннями різних частот. Фізично це може відповідати передачі по

кожному каналу звукових сигналів, що відображають звучання нот різних тональностей. Для другої моделі повідомлення представлені імпульсними послідовностями з різною тривалістю імпульсів. Фізично це може відображати передачу послідовності "крапок" телеграфної абетки по одному каналу і "тире" – по іншому.

До складу обох моделей системи входять модулі передавачів, представлених на лівій частині рисунків, та приймачів – у правій частині. Середовище поширення – лінія зв'язку, представлена суматором та джерелом Гаусового шуму, у центральній частині рисунку.

Передавач представлений модулятором (модулі 2, 19, 23 для першого каналу і модулі 2, 24 для другого), що здійснює перенесення повідомлення (генерується модулями 7 і 8 для відповідних каналів) на несуче гармонійне коливання (генерується модулями 0 і 1) шляхом управління його амплітудою.

Приймач кожного каналу представлений фільтром (модулі 6 і 9), що пропускає тільки частотні компоненти свого передавача, і детектором огибаючої (модулі 14, 16 і 15, 17). У свою чергу, кожен детектор містить нелінійний елемент (двонапівперіодний випрямляч) і фільтр, що пропускає частотні компоненти повідомлення, що відновлюється в детекторі.

Слід мати на увазі, що перша умова поділу сигналів в реальних системах виконується з певним ступенем наближення. Спектри реальних сигналів тією чи іншою мірою перекриваються. Це можна пояснити своєрідним «витіканням», оскільки реальний сигнал завжди змінюється і, отже, у ньому не можна виділити протяжну стаціонарну ділянку. З огляду на зазначене, енергія реального сигналу завжди розподілена в деякій частотній області, згрупованої в околиці частоти коливання. У міру віддалення від цієї області енергія частотних компонентів сигналу зменшується. Кількісним мірою ширини смуги частот, що займає сигнал, може служити так звана суттєва смуга частот (ширина спектру), на межах якої рівень енергії (потужності) частотних компонент становить задану, досить малу частину (соту, тисячну тощо) енергії найбільш потужних компонент центральну частину спектра.

Згадане вище явище витікання призводить до того, що деяка частина енергії передавача потрапляє у смугу частот сигналу «не свого» приймача. Таким чином сусідні канали створюють перешкоди один одному. Щоб такі перешкоди були несуттєвими, необхідно щоб рівень перешкоди, що просочується, був малий у порівнянні з корисним сигналом. Кількісно це оцінюється ступенем перекриття спектрів суміжних каналів, яка визначається як відношення потужності суттєвої частини корисного сигналу, сконцентрованої, як правило, в центральній частині його спектра, потужності суміші сигналу і перешкоди на межі смуги пропускання фільтра приймача.

У другій частині роботи досліджується передача дискретних повідомлень безперервним каналом зв'язку. Дискретні повідомлення, як правило, відображаються послідовністю імпульсів, певної частоти та тривалості.

Такий сигнал може приймати значення лише певних рівнів, перехід між якими здійснюється стрибком у певні моменти часу, тобто. сигнал дискретний як за рівнем, і за часом. У найпростішому випадку кількість дозволених рівнів дорівнює двом. Такі сигнали називаються двопозиційними (або бінарними) і часто становлять послідовність логічних нулів і одиниць.

Для завдання імпульсної послідовності необхідно визначити мінімальний A_{min} і максимальний A_{max} рівні (амплітуду сигналу), частоту f або період T імпульсної послідовності, а також параметр, що характеризує ширину імпульсу τ . Як такий параметр часто використовується шпаруватість, S – відношення періода імпульсної послідовності до тривалого імпульсу, або зворотна величина, звана коефіцієнтом заповнення D (див. рис. 2.3).

$$S = \frac{T}{\tau}, \quad D = \frac{\tau}{T}. \quad (2.1)$$

Для передачі каналом зв'язку дискретне повідомлення накладається на несучий сигнал (відбувається амплітудна модуляція, аналогічно 1 частини роботи), іншими словами, відеоімпульси перетворюються на радіоімпульси. Таким чином, сигнал, що передається в лінію зв'язку, є безперервним (гармонічним зі змінною стрибкоподібною амплітудою), але в той же час, що несе інформацію про дискретне повідомлення. Такий вид цифрової модуляції називається амплітудною маніпуляцією або АМ-2.

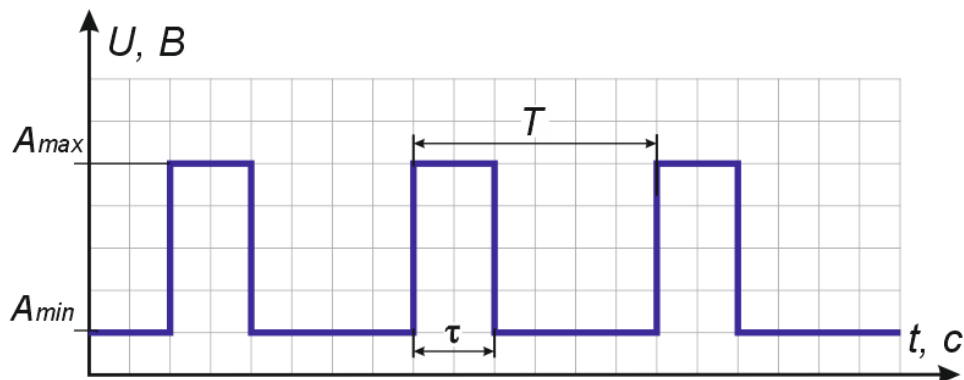


Рисунок 2.3 – Імпульсна послідовність зі шпаруватістю $S = 3$.

Завданням другої частини лабораторної роботи є перетворення та доопрацювання моделі, розробленої в першій частині роботи, з метою передачі дискретних повідомлень. Для цього необхідно змінити

параметри джерел повідомлень відповідно до значень, наведених у таблиці варіантів.

Як перший джерело використовуємо блок генератора імпульсної послідовності (*Pulse Train*), сигнал на виході якого приймає значення 0 В та A_{max} В. У таблиці варіантів також задані частота послідовності та шпаруватість імпульсів, які визначають додаткові параметри блоку.

Як сигнал джерела 2 досліджується меандр – імпульсна послідовність, що має шпарування $S = 2$ (тривалість імпульсу дорівнює тривалості паузи). Такий сигнал може бути уніполярним (змінюватися від 0 до A_{max} або від $-A_{max}$ до 0) і двополярним (приймати значення від $-A_{max}$ до A_{max}). Крім того, у загальному випадку, сигнал може приймати значення A_{min} та A_{max} , відмінні від 0. Для встановлення такого сигналу необхідно виставити значення параметра *Offset*, рівень постійної складової сигналу (у часовій області це відповідає підняттю чи опусканню графіка сигналу над віссю абсцис).

Повідомлення третього джерела обрано як випадкова послідовність біт, для чого необхідно використовувати блок *PN Seq (Pseudo Noise Sequence*, псевдовипадкова послідовність) вкладки *Noise/PN*. Сигнал з виходу даного блоку є випадковою послідовністю дискретних рівнів, рівномірно розподілених на інтервалі $-A \dots +A$, В і змінюються стрибком із частотою *Rate*, Гц. Виставивши кількість рівнів сигналу (*No. of levels*) рівним 2, отримано випадкову бінарну послідовність. Такий сигнал найчастіше застосовується для моделювання реальних потоків бітів в оцінці ймовірності помилки передачі, так як поява нулів та одиниць у ньому рівноймовірна. Слід звернути увагу, що за умовчанням середнє значення сигналу дорівнює 0 В, тобто він приймає значення $\pm A$. Необхідно змінити параметри блоку таким чином, щоб логічному нулю відповідав рівень 0 В, а логічній одиниці A_{max} , В.

Завдання даної роботи реалізуються шляхом аналізу сигналів у різних точках системи, їх зіставлення та оцінки, як у часовій, так і частотній областях.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів із зазначенням отриманих оцінок параметрів, а також висновки відповідно до пунктів 1...7 практичного завдання».
4. Висновки з роботи загалом. У загальних висновках порівняти систему передачі безперервних та дискретних повідомлень, вказати їх особливості, виявлені під час досліджень.

Контрольні питання

1. Яким обов'язковим вимогам повинні задовольняти параметри каналних модулів та сигналів у системі із частотним розподілом?

2. Чи однакові умови роботи різних каналів системи? Відповідь обґрунтуйте, порівнявши роботу високо- та низькочастотних каналів.

3. Як впливає збільшення кількості одночасно працюючих каналів на роботу лінійного обладнання? Відповідь обґрунтувати, зважаючи на те, що у складі лінійного обладнання, спільного для всіх каналів, можуть бути підсилювачі, перетворювачі, а також інші активні пристрої.

4. Чим якісно відрізняється робота систем із частотним розподілом при передачі безперервних та дискретних повідомлень?

5. Як впливають перешкоди виконання системою функцій розподілу сигналів?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1-3], [5], [8-10].

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З ЧАСОВИМ ПОДІЛОМ КАНАЛІВ

Мета роботи: вивчити принципи побудови систем зв'язку з тимчасовим розподілом каналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл моделі 3.svu.

Доповнити пропоновану триканальну систему ще одним каналом зв'язку, для чого до моделі необхідно додати блоки, що відображають безперервне повідомлення четвертого джерела, джерело синхронізуючої імпульсної послідовності. Описати, які зміни необхідно додатково внести до параметрів блоків моделі та налаштування системного часу. Параметри повідомлення, що передається (початкова частота f_n , Гц, кінцева частота f_k , Гц, період повторення T , с наведено у таблиці варіантів, див. табл. 3.1). Запишіть параметри модулів та параметри системного часу.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

N варіанта	f_n , Гц	f_k , Гц	T , с
1	200	1100	0,03
2	1300	1100	0,02
3	800	500	0,02
4	2300	1600	0,04
5	1400	1400	0,02
6	1300	500	0,02
7	900	1200	0,01
8	2300	500	0,02
9	1300	2300	0,03
10	600	300	0,05
11	1300	600	0,05
12	1500	1900	0,02
13	2000	2200	0,02
14	1000	1300	0,03
15	2500	1800	0,01

2. Запустити модель на цикл моделювання. Отримати графіки вихідних повідомлень. (Sink 20, 21, 22) та оцінити їх параметри (амплітуди та тривалості).

3. Отримати графіки прийнятих повідомлень на виходах приймачів (Sink 5, 18, 19) і порівняти їх з переданими (Sink 20, 21, 22). Зробити висновки щодо можливості відновлення переданих повідомлень на приймальній стороні.

4. Отримати графіки сигналів синхронізації (виходи *модулів 2, 12, 13*) та оцінити їх параметри. Для цього слід встановити на виходах зазначених модулів реєстратори сигналів та повторно запустити модель на цикл моделювання. Чи відповідають ці сигнали умовам часового розподілу каналів? При виконанні пунктів 4, 5 з метою покращення роздільної здатності слід використовувати зміну масштабу часу, рекомендований діапазон подання сигналу $0 \dots 0,005$ с.

5. Отримати графік сигналу в лінії зв'язку та його спектр (*Sink 11*). Оцінити ширину спектра сигналу на рівні -20дБ щодо максимального рівня.

6. Зробити фазу проходження імпульсів генератора четвертого передавача такою, що збігається з фазою першого генератора (*модуль 2*). Запустити модель на цикл моделювання та виконати пункт 3. Чи можливе відновлення повідомлень, що передаються в цьому випадку? Пояснити причину явищ, що спостерігаються.

7. Відновити вихідні значення тактових фаз генераторів. Змінити частоту проходження імпульсів всіх тактових генераторів (*модулі 2, 12, 13*), зробити рівною 9000 Гц. Запустити модель на цикл моделювання і виконати п. 3. Чи можливе відновлення повідомлень, що передаються в цьому випадку? Пояснити причину явищ, що спостерігаються.

8. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Часовий розподіл каналів застосовується досить часто при створенні систем зв'язку. На основі часового поділу реалізуються системи багатоканального цифрового телефонного зв'язку, системи супутникового зв'язку та телебачення. Для забезпечення можливості одночасної роботи кількох каналів по одній лінії зв'язку необхідно виконати умови незалежності їх роботи, виключення впливу один на одного, що становить завдання розділення каналів. Основою тимчасового поділу каналів є такі положення:

- кожен з передавачів формує і видає в середовище розповсюдження сигнали тільки у відведені для нього інтервали часу, що не перекриваються з інтервалами, відведеними для інших передавачів;
- кожен із приймачів має засоби виділення інтервалів передачі, а, отже, і сигналів лише потрібного передавача та придушення сигналів інших. (Для цього у складі системи повинні бути блоки, що забезпечують синхронну роботу передавачів та приймачів, по черзі надають середовище поширення в їхнє розпорядження та засоби відновлення повідомлень із квантованих за часом сигналів – інтерполуючі фільтри);

- дискретизація сигналів, що представляють повідомлення здійснюється з дотриманням вимог теореми В.А.Котельникова;
- середовище поширення сигналів володіє достатньою широкосмуговістю і лінійністю з тим, щоб імпульсні сигнали, що передаються, не були спотворені.

Ця робота спрямовано вивчення цих положень з прикладу найпростішої системи зв'язку, що моделюється засобами пакета System View.

Об'єктом дослідження у цій роботі є модель триканальної системи зв'язку (див. рис. 3.1). Повідомлення моделі представлені гармонійним коливанням, частота якого змінюється лінійно в інтервалі ($f_{\min} \dots f_{\max}$) (див. рис. 3.2).

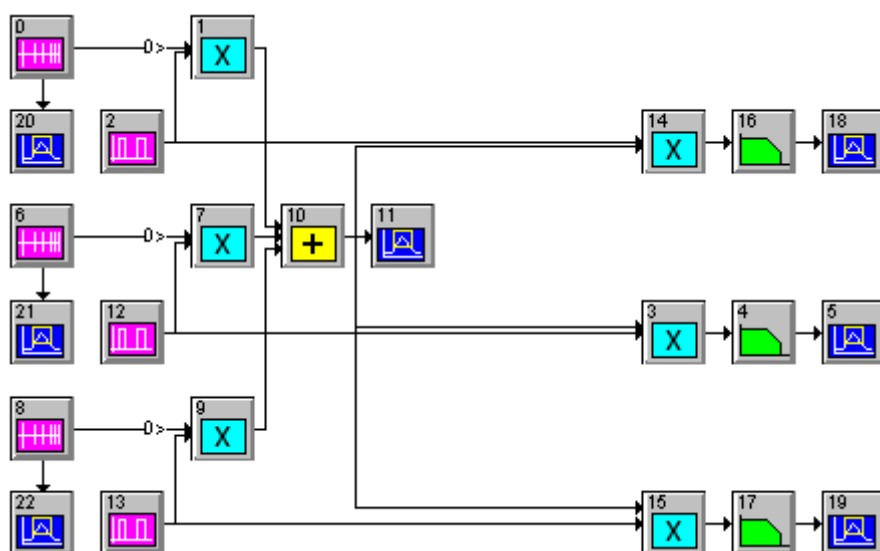


Рисунок 3.1 – Структурна схема моделі триканальної системи зв'язку

У першому наближенні можна вважати, що спектр такого коливання зосереджений у смузі ($f_{\min}, f_{\max}$).

Необхідною процедурою обробки сигналів при часовому поділі є часова дискретизація, в результаті якої безперервна часова реалізація замінюється відліками, що впливають із заданим інтервалом. Для відновлення вихідної форми безперервного коливання по дискретним відлікам необхідно, щоб у період зміни було зроблено досить багато відліків, тобто. інтервал дискретизації був досить малий. Умови, за яких можливе відновлення безперервного коливання, визначаються теоремою Котельникова. Найменша кількість звітів за період потрібна для відновлення гармонійного коливання, і воно дорівнює двом.

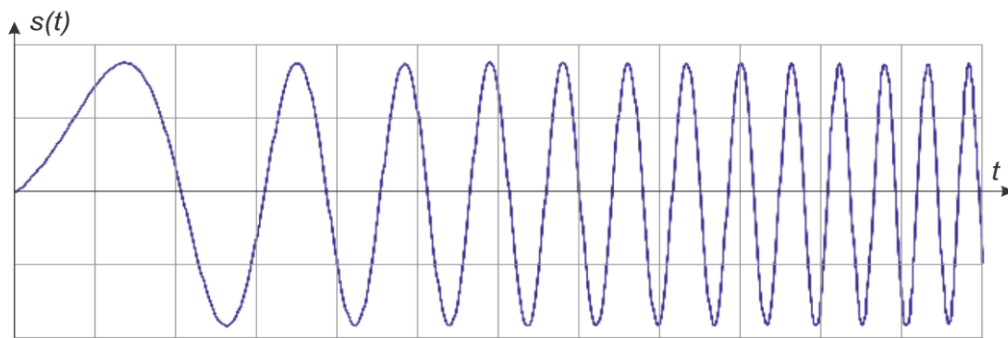


Рисунок 3.2 – Реалізація коливання з частотою, що лінійно змінюється

Дискретні відліки, що формуються передавачами, послідовно перемножуючись, передаються в лінію зв'язку, і таким чином формується нова результуюча (лінійна) послідовність. На приймальній стороні приймачі приймають лише призначені їм відліки. Це забезпечується синхронною та синфазною роботою ключів дискретизаторів передавачів та відповідних ключів – клапанів приймачів. Як такі ключі використовуються перемножувачі. На один вхід перемножувача надходить сигнал, що обробляється, на другий – сигнал від імпульсного генератора тактування. Імпульси тактування можуть приймати лише два рівні – одиничний та нульовий.

Модулі передавачів, що входять до складу моделі системи, представлені у лівій частині схеми, а приймачів – у правій частині. Робота приймачів та передавачів синхронізована загальними для кожної пари приймач-передавач генераторами імпульсів тактування та керованих ними ключами-комутаторами на передавальній та приймальній сторонах. Тактові генератори працюють також синхронно та синфазно. Фазовий зсув між імпульсами послідовностей, що формуються ними, становить 120° .

Середовище поширення – лінія зв'язку, представлена суматором сигналів у центральній частині. Якщо лінія зв'язку вносить запізнення або спотворює форму імпульсних сигналів (наприклад, зтягуючи їх на інтервали суміжних відліків), робота системи зв'язку погіршується і може бути порушена повністю.

Завдання даної роботи реалізуються шляхом аналізу сигналів у різних точках системи, їх зіставлення та оцінки як у часовій, так і частотній областях.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структурна схема моделі, її параметри, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів із зазначенням отриманих оцінок параметрів, а також висновки відповідно до пунктів 1...7.

4. Висновки по роботі загалом.

Контрольні питання

1. Яким обов'язковим вимогам мають відповідати параметри каналних модулів у системі з часовим поділом?
2. Чи однакові умови роботи різних каналів системи? Відповідь обґрунтувати, порівнюючи роботу сусідніх каналів.
3. Як впливає збільшення кількості одночасно працюючих каналів на роботу лінійного устаткування? Відповідь обґрунтувати, зважаючи на те, що у складі лінійного обладнання можуть бути підсилювачі, перетворювачі та інші активні пристрої.
4. Оцінити ширину смуги частот, необхідну передачі тих самих повідомлень, як у роботі, але з використанням частотного поділу. Який варіант триканальної системи вимагатиме більшої смуги і чому?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [3], [6], [8-10].

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ВУЗЬКОСМУГОВІ СИГНАЛИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТ

Мета роботи: вивчити вузькосмугові сигнали, їх властивості, отримання та застосування у системах зв'язку.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл моделі 1 4_1.svu (або rr_noise.svu). Змінити параметри модулів відповідно до індивідуального варіанта завдання. У таблиці 4.1 наведено частоти зрізу f_1 і f_2 для трьох фільтрів, що використовуються в моделі. Привести структуру моделі, записати параметри модулів, параметри системного часу. Запустити модель на цикл моделювання. Отримати графіки сигналів на виходах фільтрів, спектри та кореляційні функції.

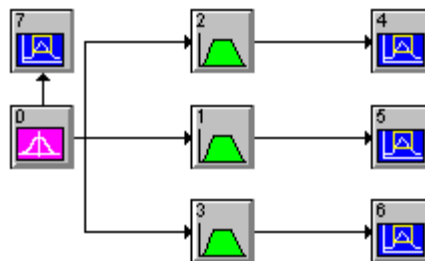


Рисунок 4.1 – Структурна схема моделі, що реалізує вузькосмугову фільтрацію білого шуму

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

N вар.	Фільтр №1		Фільтр №2		Фільтр №3		$f_c, \text{Гц}$
	$f_1, \text{Гц}$	$f_2, \text{Гц}$	$f_1, \text{Гц}$	$f_2, \text{Гц}$	$f_1, \text{Гц}$	$f_2, \text{Гц}$	
1	124	126	113	137	85	165	50
2	159	161	150	170	125	195	150
3	179	181	166	194	140	220	125
4	287	293	276	304	260	320	75
5	266	274	260	280	245	295	180
6	67	73	62	78	50	90	175
7	288	292	276	304	260	320	180
8	115	125	108	132	85	155	50
9	79	81	72	88	55	105	160
10	268	272	256	284	240	300	50
11	219	221	206	234	185	255	120
12	237	243	228	252	210	270	120
13	168	172	158	182	140	200	75
14	108	112	102	118	75	145	250
15	128	132	120	140	105	155	125

2. Оцінити ширину діапазонів сигналів на рівні -60 dB. Зробити висновки щодо зміни форми сигналу під час зміни смуги фільтрації.

3. Оцінити середню швидкість наростання огинаючої сигналу на виході кожного фільтру, використовуючи вираз:

$$V_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{U_{\max i} - U_{\min i}}{\Delta T_i}}{n}, \quad (4.1)$$

де, $U_{\max i}$ і $U_{\min i}$ – рівні суміжних максимумів квазігармонійного заповнення ("несучого коливання") сигналу;

ΔT_i – часовий інтервал між суміжними максимумами та мінімумами сигналу;

i – номер виміру ($i = 1, 2 \dots n = 5 \dots 7$).

4. Зіставити результати оцінок, зроблених у пунктах 2 і 3, і зробити висновки про взаємозв'язок смуги сигналу та швидкість зміни його огинаючої.

5. Завантажити виконуючий файл другої моделі – 4_2.svu (або fpulse2.svu). Змінити частоту модулюючої імпульсної послідовності (модуль 0) відповідно до індивідуального варіанта завдання (f_c у табл. 4.1). Зауважити, що тривалість імпульсу необхідно зробити рівною тривалості паузи. Для цього слід відповідним чином змінити параметр *Pulse Width*, або скористатися кнопкою *Square Wave* для автоматичного налаштування. Максимальний рівень імпульсу слід задати рівним 1, мінімальний – 0 В. Представити структуру моделі, записати параметри її модулів, параметри системного часу.

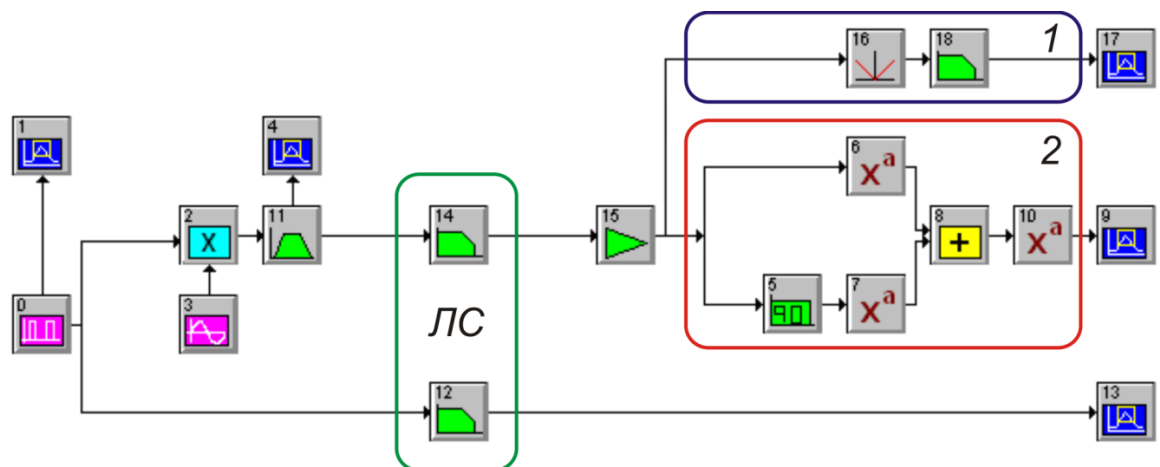


Рисунок 4.2 – Структурна схема моделі, що реалізує вузькосмугову модуляцію несучого коливання

6. Запустити модель на цикл моделювання та отримати графіки сигналів, що відтворюють вихідне (передане) та отримане повідомлення. Зробити висновки про спотворення вузькосмугового та широкосмугового сигналів, що несуть ту саму інформацію при проходженні через те саме середовище поширення.

7. Дати оцінку якості відновлення вихідного сигналу детектором огибаючої (1) та засобами обробки аналітичного сигналу (2 на рис.4.2).

8. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. У більшості сучасних систем зв'язку як сигнали, що передаються в середовище поширення, використовуються вузькосмугові сигнали. Цьому сприяють кілька причин. Серед них найважливішими є:

- менша схильність до лінійних спотворень,
- відносна простота реалізації технічних засобів передачі та прийому вузькосмугових сигналів,
- відносна простота алгоритмів обробки вузькосмугових сигналів.

Для вузькосмугового сигналу виконується співвідношення:

$$\Delta\omega \ll \omega_0, \quad (4.2)$$

де ω_0 – центральна частота спектра сигналу;

$\Delta\omega$ – ширина спектра сигналу.

Такий сигнал може бути отриманий одним із двох способів:

- "вузькосмуговою" модуляцією гармонійного несучого коливання. Для цього необхідно, щоб виконувалася умова:

$$\Omega_{\max} \ll \omega_n, \quad (4.3)$$

де $\Omega_{\max}$ – максимальна частота в спектрі модулюючого сигналу;

ω_n – частота несучого коливання.

- вузькосмугової смугової фільтрації широкосмугового сигналу, наприклад, шумового. Для цього необхідне виконання умови:

$$\Delta\omega_\phi \ll \omega_{0\phi}, \quad (4.4)$$

де $\Delta\omega_\phi$ – смуга пропускання смугового фільтра;

$\omega_{0\phi}$ – центральна частота смуги пропускання фільтра.

Характерним для вузькосмугового сигналу є високий рівень корельованості сусідніх періодів коливання. При звуженні смуги відбувається "гармонізація" коливання, тобто заповнення коливання близько формою до косинусоїди, сусідні максимуми мають близьке значення. Якщо побудувати криву, котра проходить через вершини косинусоїд, то виявиться, що побудована таким чином огибаюча змінюється набагато повільніше, ніж заповнення.

Для таких сигналів використовується подання у вигляді:

$$f(t) = C(t) \cos \Psi(t), \quad (4.5)$$

де $C(t)$ – огибаюча (змінна амплітуда);

$\Psi(t)$ – миттєва фаза коливання.

Спектр вузькосмугового сигналу, отриманого шляхом модуляції гармонійного переносника для найпростіших видів модуляції, симетричний щодо несучої частоти. Для відновлення інформації, що міститься в такому сигналі, достатньо половини спектру. Вузькосмугові сигнали, отримані шляхом фільтрації широкосмугових, як правило, цій вимозі не задовольняють.

Вузькосмугові сигнали при поширенні в деякому середовищі зазнають менших лінійних спотворень, ніж широкосмугові, що пов'язано з тим, що середовище поширення, в межах вузького діапазону частот, займаного сигналом, має приблизно однакові властивості по відношенню до всіх його частотних компонентів.

Сучасні технології, що застосовуються при створенні засобів зв'язку, широко використовують явища електричного та механічного резонансу для реалізації елементів частотної селекції сигналів (смушкових фільтрів). Найбільш прості та дешеві вузькосмугові фільтри, а широке використання таких фільтрів в апаратурі зв'язку визначає (поряд з іншими факторами) вибір проектувальників на користь вузькосмугових сигналів,

Об'єктом дослідження в даній роботі є вузькосмугові сигнали, що формуються та оброблюються в одній із двох простих моделей систем (див. рис.4.1).

Перша модель відтворює процес формування вузькосмугового сигналу методом смугової фільтрації з широкосмугового Гаусового білого шуму. Зміна смуги фільтрації дозволяє спостерігати зміну властивостей сигналу на виході фільтра у частотній та часовій областях.

Друга модель представляє процес формування вузькосмугового сигналу за допомогою модуляції та його поширення в середовищі із частотно-залежними властивостями. На підставі порівняння результатів проходження сигналів, що несуть одне й те саме повідомлення через те саме середовище можна зробити висновок, що перетворення вихідного

широкопasmового сигналу в вузькопasmовий дає певний виграш у сенсі збереження інформації, що передається.

Завдання даної роботи реалізуються шляхом аналізу сигналів у різних точках моделей, їх зіставлення та оцінки як у часовій, так і в частотній областях.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структурні схеми моделей, параметри, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів із зазначенням отриманих оцінок параметрів.
4. Висновки відповідно до пунктів 1...7.

Контрольні питання

1. Чому подання сигналу як $f(t) = C(t)\cos\Psi(t)$ вважається неоднозначним і як ця неоднозначність усувається при поданні цього сигналу як аналітичного?
2. Чому застосування апарату аналітичного сигналу до класу вузькопasmових сигналів найефективніше?
3. Які параметри комплексної огинаючої несуть інформацію про повідомлення при:
 - амплітудній модуляції;
 - кутовій модуляції?
4. Які зміни зазнає кореляційна функція сигналу зі звуженням його смуги?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [4], [9-10].

5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ПРОХОДЖЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ТА ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ ЧЕРЕЗ ЛІНІЙНІ ЛАНКИ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Мета роботи: вивчити перетворення детермінованих та випадкових сигналів при проходженні їх через лінійні ланки каналів зв'язку.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл 5.svu (або dsp_fill.svu) (див. рис. 5.1). На екрані з'явиться структура трьох моделей для дослідження проходження через фільтр стандартних сигналів, а саме, функції, синусоїди та меандра.

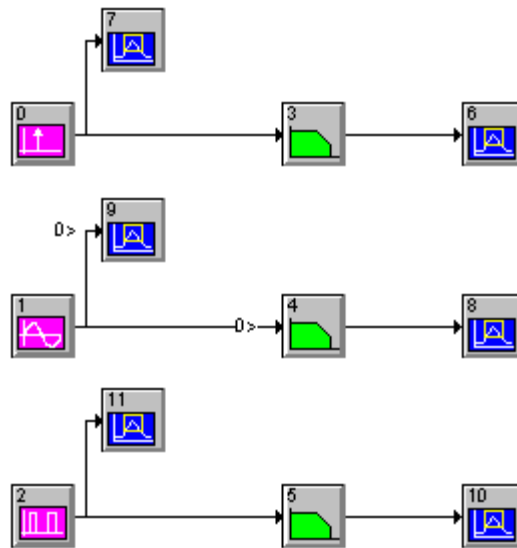


Рисунок 5.1 – Структурна схема моделі

Використовуючи засоби редагування моделей, введіть ще одну, четверту модель, – для дослідження проходження Гаусового білого шуму через такий самий фільтр (середньоквадратичне значення шуму слід прийняти рівним 1 В).

Встановіть параметри модулів відповідно до індивідуального варіанта завдання (див. табл. 5.1). Для цього частоту зрізу фільтрів задайте рівною f_l Гц, а частоту гармонійного сигналу (модуль 1) – f_{sin} Гц.

2. Представити структуру моделі, записати параметри модулів, параметри системного часу. Запустити модель на цикл моделювання. Отримати графіки на виходах фільтрів.

Таблиця 5.1 – Таблиця варіантів

N вар.	Частота зрізів фільтрів		$f_{sin}, \text{Гц}$	Коефіцієнт поліномів			
	$f_1, \text{Гц}$	$f_2, \text{Гц}$		$a_1, 10^{-3}$	$a_2, 10^{-6}$	b_0	b_1
1	70	80	75	0,46	2,75	2	1
2	90	120	105	0,23	2,28	1,25	1
3	140	190	165	0,15	0,98	0,5	0,2
4	170	190	180	0,39	3,91	0,75	0,5
5	100	150	125	0,59	4,41	10	2
6	60	90	75	0,46	2,75	8	0,2
7	80	110	95	0,3	2,27	7	0,5
8	150	180	165	0,14	0,87	5	0,2
9	110	150	130	0,26	1,74	0,25	1
10	140	150	145	0,45	1,7	2	2
11	60	110	85	0,51	2,22	7	0,2
12	75	85	80	0,44	1,24	5	0,5
13	90	130	110	0,49	1,55	2	1
14	140	180	160	0,63	5,06	8	0,5
15	130	180	155	0,27	3,1	7	2

3. Дослідити проходження стандартних сигналів через ФНЧ, а саме:

3.1 Використовуючи імпульсну перехідну функцію, отримати АЧХ та ФЧХ фільтра та за ними визначити частоту зрізу. При вирішенні завдань даної роботи доцільно використовувати уявлення спектра в лінійному масштабі по осі ординат (FFT). Розглянути випадки фільтрів Баттерворта, Бесселя та Чебишева (з нерівномірністю у смузі прозорості 0,5 дБ). Дати якісний порівняльний опис особливостей АЧХ і ФЧХ різних видів фільтрів, що розглядаються.

3.2 Дослідити особливості проходження гармонійного сигналу через фільтр. Якісно описати спотворення, що вносяться фільтром.

3.3 Дослідити особливості проходження через фільтр сигналу типу меандр. Якісно описати і пояснити спотворення, що вносяться фільтром.

3.4 Розглянути реакції фільтрів низьких частот різних типів (Баттерворта, Бесселя та Чебишева) на меандр. Проаналізувати зв'язок між нелінійністю фазової характеристики, крутизною амплітудної характеристики і спотвореннями, що вносяться фільтром. Розглянути випадки зміни порядку фільтра.

3.5 Використовуючи реакцію фільтра низьких частот на сигнал типу меандр, оцінити часову затримку, що вноситься. Дослідити залежність затримки від порядку фільтра та побудувати графік цієї залежності.

3.6 Дослідити особливості проходження Гаусового білого шуму через ФНЧ. Порівняти автокореляційну функцію вихідного сигналу з автокореляційною функцією Гаусового білого шуму. Поступово зменшуючи частоту зрізу фільтра до 5 Гц, дослідити залежність ширини

головної пелюстки автокореляційної функції від частоти зрізу, побудувати графік цієї залежності.

4. Виконати дослідження згідно з пп. 3.1, 3.2, і 3.3 стосовно ПФ. Частоти зрізу ПФ прийняти рівними f_1 і f_2 (див. табл. 5.1).

5. Виконати дослідження згідно з пп. 3.1, 3.2, і 3.3 стосовно ФВЧ. Частоту зрізу прийняти рівною f_2 (див. табл. 5.1).

6. Дослідити проходження стандартних сигналів (δ -функції, синусоїди, меандру та ГБШ) через інтегратор, диференціатор, пропорційне, інерційне та коливальне ланки. Досліджувані ланки задати за допомогою коефіцієнтів (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1), поданих у таблиці варіантів (табл. 5.1). Навести вираз для комплексного коефіцієнта передачі кожної з ланок.

Дати якісний опис вихідним сигналам для кожного стандартного вхідного сигналу, використовуючи спектри сигналів на вході та виході ланок. При дослідженні проходження Гауссова білого шуму через ланки використовувати автокореляційні функції сигналів.

7. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості. Лінійні властивості каналів зв'язку при моделюванні часто використовують у вигляді фільтрів. Крім того, фільтри, як елементи засобів зв'язку, є важливими та поширеними компонентами сучасної апаратури. Знання основних різновидів фільтрів, процесів перетворення сигналів фільтрами (тобто. процесів фільтрації) та його характеристик необхідні для аналізу та синтезу систем зв'язку.

Основними характеристиками фільтра є амплітудно-частотна (АЧХ):

$$K(\omega) = \text{mod } \dot{K}(\omega). \quad (5.1)$$

та фазочастотна характеристики (ФЧХ):

$$\varphi(\omega) = \arg \dot{K}(\omega), \quad (5.2)$$

$$\text{де} \quad \dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вих}}(\omega)}{\dot{U}_{\text{вх}}(\omega)} = \frac{N(s)}{D(\omega)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

комплексний коефіцієнт передачі фільтра $s = \alpha + j\omega$ – комплексна частота, n – порядок фільтра ($n \geq m$).

Залежно від виду амплітудно-частотної характеристики фільтри поділяються на:

- фільтри нижніх частот – ФНЧ – (пропускають сигнали з частотою нижче частоти зрізу ω_c);
- фільтри верхніх частот – ФВЧ – (пропускають сигнали з частотою вище частоти зрізу ω_c);
- смушкові (полосові) фільтри – ПФ – (пропускають сигнали в смузі частот $\omega_{c1} < \omega < \omega_{c2}$);
- загороджувальні фільтри – ЗФ – (пропускають сигнали поза смуги загородження $\omega < \omega_{c1}; \omega > \omega_{c2}$).

Властивості фільтра значною мірою визначаються полюсами комплексного коефіцієнта передачі, у зв'язку з цим корені полінома знаменника відіграють вирішальну роль в описі фільтра. Залежно від виду апроксимуючого полінома знаменника виділяють такі різновиди фільтра:

- Баттерворта;
- Бесселя;
- Чебишева та ін.

Структура фільтрів може бути однією і тією ж, однак, відмінності в коефіцієнтах поліномів чисельника та знаменника, а отже і коренях поліномів, суттєво впливають на властивості фільтрів.

Серед простих лінійних ланок, які можуть бути представлені у вигляді загального опису фільтра, виділені найчастіше зустрічаються. Це:

1. Пропорційна ланка (ФНЧ, у якого для всіх $m \neq 0, b_m = 0, b_0 \neq 0$, а для всіх $n \neq 0, a_n = 0, a_0 = 1$).
2. Інтегратор (ФНЧ, у якого для всіх $m \neq 0, b_m = 0, b_0 \neq 0$, а для всіх $n \neq 1, a_n = 0, a_1 \neq 0$).
3. Диференціатор (ФВЧ, у якого для всіх $m \neq 1, b_m = 0, b_1 \neq 0$, а для всіх $n \neq 0, a_n = 0, a_0 = 1$).
4. Інерційна ланка (ФНЧ, яка має для всіх $m \neq 0, b_m = 0, b_0 \neq 0$, а для всіх $n \neq 0, n \neq 1, a_n = 0, a_0 = 1, a_1 \neq 0$).
5. Коливальна ланка (ПФ, у якого для всіх $m \neq 0, b_m = 0, b_0 \neq 0$, а для всіх $n \neq 0; 1; 2, a_n = 0$, крім $a_0 = 1, a_1 \neq 0, a_2 \neq 0$).

Ця робота спрямовано вивчення засобами пакета System View властивостей фільтрів як моделей ланок систем зв'язку.

Пакет System View крім великого набору стандартних лінійних ланок (блок *Operators*) дає можливість гнучкого налаштування параметрів ланки шляхом зміни коефіцієнтів полінома, що описує його. Для цього у вікні параметрів фільтра (*Linear Sys/Filters -> Parameters*) слід вибрати вкладку *Laplace/Define* (у правому верхньому куті). У вікні

представлено вираз комплексного коефіцієнта передачі (позначеного в даному випадку $H(S)$) у вигляді відношення двох поліномів. Задаючи відповідні коефіцієнти поліномів чисельника (b_m) та знаменника (a_n) можна отримати моделі лінійних ланок різних типів. Після натискання кнопки *Update* система обчислює значення нулів та полюсів характеристики. Даний апарат використовується в роботі при моделюванні інтегруючої, диференційної, пропорційної інерційної та коливальної ланок.

Об'єктом дослідження у цій роботі є ФНЧ, ФВЧ і ПФ, що під впливом гармонійних, імпульсних і випадкових сигналів.

Гармонійні компоненти вхідного сигналу, що проходять через фільтр, зазнають у фільтрі ослаблення (посилення) і затримку в часі, в результаті чого спектр сигналу на виході фільтра може істотно відрізнятися від спектру вхідного сигналу:

$$\dot{S}_{U_{вых}}(\omega) = \dot{K}(\omega) \dot{S}_{U_{вх}}(\omega). \quad (5.3)$$

Ці зміни можуть знаходити як корисне застосування в роботі реальних систем зв'язку (придушення небажаних компонентів, очищення сигналу від перешкод), так і призводити до небажаних наслідків (лінійні спотворення). Вибираючи потрібний різновид фільтра та його параметри (порядок фільтра, частоту зрізу) можна досягти бажаних властивостей і цим забезпечити необхідну якість фільтрації.

Схема моделі на дослідження фільтра елементарно проста. Це послідовне з'єднання модулів генератора вхідних сигналів (δ -функція, меандр, синусоїда, Гауссов білий шум), власне фільтра та реєстратора вихідних сигналів (аналізуюче вікно пакета SystemView).

Завдання даної роботи реалізуються шляхом аналізу вхідних і вихідних сигналів фільтра в часових і частотних областях для вищевказаних різновидів і структур фільтрів при стандартних сигналах, що подаються на вхід.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структурні схеми моделей, параметри, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів, автокореляційні функції, АЧХ та ФЧХ, побудовані залежності, необхідні коментарі відповідно до пунктів 1 – 6.
4. Висновки відповідно до пунктів 1-6.

Контрольні питання

1. Навести формули для комплексного коефіцієнта передачі ФНЧ, ФВЧ, ПФ другого порядку, а також для інтегратора, диференціатора, пропорційної, інерційної коливальної ланок у разі, коли $s = j\omega, a_n = 0$, крім $a_0 \neq 0$.

2. Для перелічених вище ланок навести якісні графіки залежностей АЧХ і ФЧХ.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [5], [7], [8].

6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ (ФАПЧ) У ТЕХНІЦІ ЗВ'ЯЗКУ

Мета роботи: вивчити властивості та характеристики системи ФАПЧ.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл 6_1.svu (або com_pll3.svu) (див. мал. 6.1). Задати частоту сигналу, що модулює (модуль 3) відповідно до таблиці варіантів ($f_{\text{мф_чм}}$, Гц); записати параметри модулів та налаштування системного часу. Доповнити модель блоками, що аналізують, для реєстрації сигналів у всіх точках схеми.

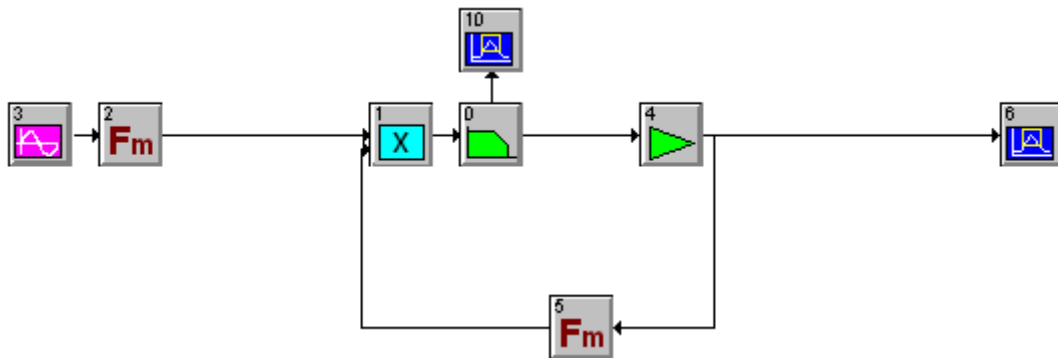


Рисунок 6.1 – Модель ФАПЧ для вивчення її як ЧМ демодулятора

Запустити модель на цикл моделювання та побудувати графіки переданого та прийнятого повідомлень та їх спектрів. (Для більш наочного уявлення слід використовувати часові вікна та змінити масштабу по осі частот). Визначити час перехідного процесу в системі ФАПЧ та коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу частотного детектора (модуль 6), беручи до уваги лише перші три його гармоніки.

2. Дослідити вплив різновидів (типів) використовуваного формуючого фільтра на час перехідного процесу, замінюючи фільтр Бесселя, на фільтр Баттерворта, потім Чебишева (з нерівномірністю частотної характеристики – 0,1 дБ). Порядок та налаштування фільтра зберегти такими ж.

Використовуючи як формуючий фільтр Чебишева, змінюючи його порядок від 3 (вихідне значення) до 8, побудувати залежність часу перехідного процесу коефіцієнта нелінійних спотворень від порядку фільтра. Результати досліджень подати у вигляді таблиць та графіків.

3. Дослідити залежність часу перехідного процесу та коефіцієнта нелінійних спотворень від зміни коефіцієнта посилення у петлі

зворотного зв'язку. Для цього доцільно повернутися до вихідного значення порядку фільтра (3) і, змінюючи коефіцієнт посилення підсилювача, (модуль 4) реєструвати час перехідного процесу спектр вихідного сигналу. Останній дозволяє розрахувати коефіцієнт нелінійних спотворень. Побудувати графіки отриманих залежностей. Збільшуючи коефіцієнт посилення, оцінити його максимальне значення, при якому забезпечується стійка робота ЧМ детектора.

4. Для дослідження явища захоплення і утримання задаючих коливання слід доповнити вихідну модель (файл 6_1.svu) елементами, що моделюють перебудову частоти несучого коливання на вході ФАПЧ. Для цього між джерелом ЧМ сигналу (модуль 2) та входом ФАПЧ (модуль 1) слід помістити фрагмент схеми, що моделює перебудову частоти, зображену на рис 6.2.

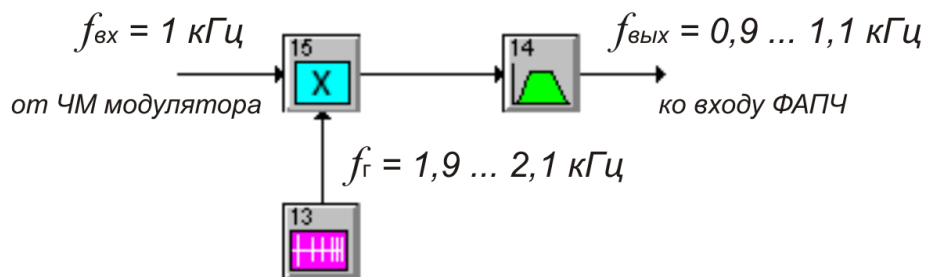


Рисунок 6.2 – Фрагмент схеми, що моделює частотну перебудову

Параметри додатково введених модулів:

Параметри генератора ЛЧМ сигналу (*Freq. Sweep*):

Amp = 1В;

Start.freq = 1,9 кГц;

Stop.freq = 2,1 кГц;

Period = 0,5с.

Параметри смугового фільтра (*Band Pass*):

Тип - фільтр Баттерворт

Порядок - $N = 5$

Частоти зрізу: $f_{LO} = 750$ Гц,

$f_{HI} = 1500$ Гц.

Частоту генератора повідомлення (модуль 3) слід збільшити до 100 Гц. Після внесення змін запустити модель та побудувати графік сигналу на виході ФАПЧ. За графіком визначити момент початку формування сигналу з частотою 100Гц (момент захоплення) та момент закінчення формування (момент зриву стеження). Знаючи швидкість сканування частоти *Sweep*-генератора та його початкову (кінцеву) частоту, визначити смугу захоплення та смугу утримання ФАПЧ.

5. Завантажити файл моделі 6_2.svu (або Div_n_0.svu) (див. рис. 6.3). Задати параметри модулів (частоту опорного сигналу f_{on} – модуль 0, центральну частоту ГУН $f_{0_ГУН}$ – модуль 2) відповідно до індивідуального варіанта завдання (див. табл. 6.1). Початковий

коефіцієнт перерахунку K_{noc} , що задається в модулі 3, розрахувати самостійно, округливши до найближчого значення значення $f_{0_ГУН} / f_{on}$. Частоту зрізу формуючого фільтра (модуль 5) встановити рівною $(0,4 \dots 0,5) \cdot f_{on}$.

Таблиця 6.1 – Таблиця варіантів

N вар.	$f_{инф_ЧМ},$ Гц	$f_{оп},$ Гц	$f_{0_ГУН},$ Гц
1	65	8	205
2	60	10	220
3	55	11	255
4	15	12	230
5	65	14	270
6	15	5	190
7	30	10	260
8	60	12	180
9	45	5	120
10	65	9	290
11	65	14	320
12	50	10	175
13	45	16	365
14	30	10	270
15	25	15	215

6. Запустити модель на цикл моделювання та отримати графіки керуючого сигналу ГУН та спектру вихідного сигналу ГУН (вихід синтезатора).

7. За отриманими графіками визначити:

- час перехідного процесу;
- частоту спектральної лінії сигналу, що генерується синтезатором;
- ширину спектра «п'єдесталу» фазових шумів та його відносний рівень;
- наявність гармонійних компонент у спектрі «п'єдесталу» та їх частоти.

8. Змінити коефіцієнт поділу дільника у ланцзі зворотного зв'язку на одиницю у бік збільшення та виконати пункти 6 та 7.

9. Дати нову одиничну зміну коефіцієнта поділу і повторити пункти 6 і 7, і так доти, доки спостерігатиметься явище захоплення. Зверніть увагу, що тривалість перехідного процесу може перевищувати інтервал моделювання. У цьому випадку необхідно збільшити параметр *Stop Time* у налаштуваннях системного часу.

10. Повторити пункти з 6 по 9, зменшуючи значення коефіцієнта перерахунку щоразу на одиницю від початкового значення (K_{noc}) до граничного (K_{min}), у якому ще спостерігатиметься захоплення.

11. Результати вимірювань занести у таблицю, де як незалежну змінну розглядати коефіцієнт поділу. Визначити діапазон роботи синтезатора. Побудувати графіки залежності частоти генерованої спектральної лінії, ширини та відносного рівня п'єдесталу від коефіцієнта перерахунку. Навести графіки керуючих сигналів ГУН і спектрів його вихідних сигналів для початкового значення коефіцієнта.

12. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості. Фазова автопідстроювання частоти (ФАПЧ) — система автоматичного регулювання, що підлаштовує частоту керованого генератора так, щоб вона дорівнювала частоті опорного сигналу. Регулювання здійснюється завдяки наявності негативного зворотного зв'язку.

Система ФАПЧ реалізуються на основі елементарних ланок, з'єднаних у структуру із зворотним зв'язком. До складу ФАПЧ входять фазовий детектор (ФД), що формує низькочастотний фільтр (ФНЧ) і генератор гармонійних коливань, керований напругою (ГУН), див. 6.3.

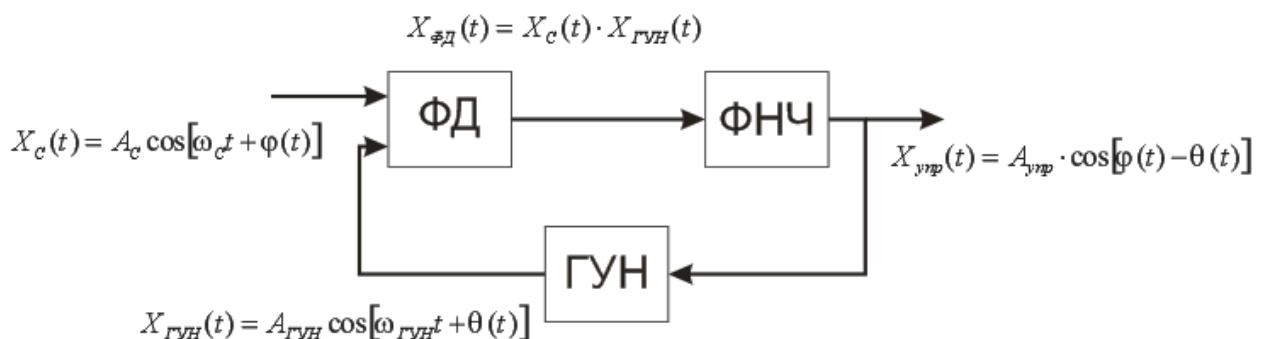


Рисунок 6.3 – Структурна схема ФАПЧ

Фазовий детектор формує своєму виході напругу, відповідну різниці фаз вхідного сигналу $X_c(t)$ і сигналу з виходу ГУН $X_{ГУН}(t)$. У стаціонарному режимі, коли частоти ω_c і $\omega_{ГУН}$ рівні, в системі встановлюється постійна різниця фаз між відповідними сигналами та вихідна напруга фазового детектора (сигнал неузгодженості або сигнал помилки) постійний. Цей сигнал використовується для керування ГУНом, частота якого залежить лінійно від прикладеної на вхід напруги. Якщо вихідна частота ГУН відхиляється від частоти вхідного сигналу, то напруга неузгодженості змінюється, впливаючи на ГУН у бік зменшення помилки.

Між фазовим детектором і ГУН включається фільтр нижніх частот. Пропускаючи постійний (або змінюється відносно повільно) сигнал неузгодженості, він усуває з спектру його складові побічних частот, присутні на виході фазового детектора, які, потрапляючи на вхід ГУН, викликають паразитну частотну модуляцію.

Система ФАПЧ може працювати у кількох режимах. Система перебуває у режимі утримання, якщо частоти вхідного сигналу і ГУН сигналу рівні. Цей режим, в першу чергу, характеризується смугою утримання, ширина якої визначається різницею граничних значень частоти ГУН, що відповідають найбільшому та найменшому значенню напруги на виходах фазового детектора, за яких цей режим можливий. Якщо рівень сигналу неузгодженості на виході фазового детектора перевищує допустимі межі, зумовлені смугою утримання, система перебуває у режимі биття. І тут середнє значення частоти ГУН відрізняється від частоти вхідного сигналу. Перехідний стан системи, у якому режим биття переходить із часом у режим утримання, називається режимом захоплення. Смуга захоплення – область початкових розладів, у якій за будь-яких початкових умов встановлюється режим утримання.

Як структурне ланка каналів зв'язку, система ФАПЧ знайшла широке застосування як демодулятор ЧМ і ФМ сигналів, генератор синусоїдального сигналу, що перебудовується, у складі гетеродинів, нелінійного фільтра та ін.

У роботі досліджуються властивості системи ФАПЧ, що працює як детектор ЧМ сигналу і дробово-кратного перетворювача частоти (формуваача сітки частот). У першому випадку вхідним сигналом є ЧМ сигнал $X_C(t)$, вихідним – низькочастотний сигнал $X_{ynp}(t)$, що представляє повідомлення, що відновлюється і знімається з виходу формуючим фільтром.

При використанні ФАПЧ у складі синтезатора частоти гетеродина, вхідним сигналом є гармонійне коливання $X_C(t)$, що задає, вихідним – сигнал місцевого генератора (ГУН) – $X_{ГУН}(t)$, див. рис. 6.4.

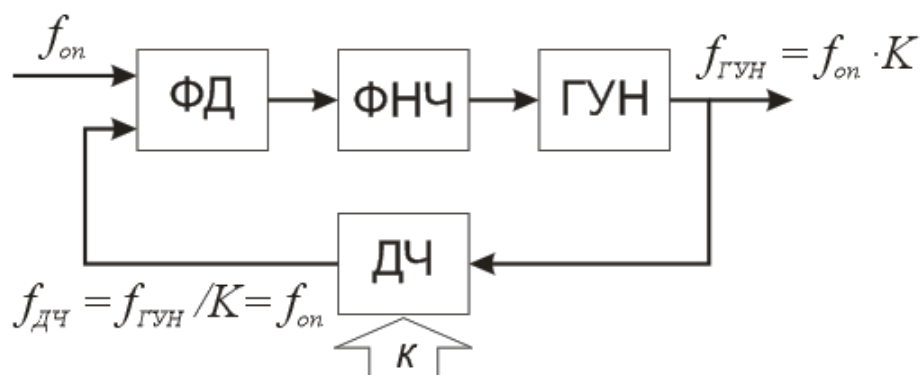


Рисунок 6.4 – Структурна схема синтезатора сітки частот на основі ФАПЧ

Крім того, в петлі зворотного зв'язку включається дільник частоти (ДЧ) – пристрій, що знижує частоту сигналу, що генерується ГУН, в ціле число разів (K – коефіцієнт розподілу). Таким чином, для того, щоб система знаходилася в режимі утримання і частоти сигналів на вході

фазового детектора були рівні, частота сигналу місцевого генератора (ГУН) повинна бути в K разів більше частоти опорного сигналу, що подається ззовні. Шляхом зміни коефіцієнта поділу K місцевий генератор може бути легко перебудований на іншу частоту в межах деякого діапазону. Крок перебудови визначається частотою опорного (зовнішнього) генератора f_{on} .

Властивості та характеристики системи ФАПЧ визначаються властивостями та характеристиками її елементів, насамперед фазовим детектором та формуючим фільтром. Істотний вплив на роботу ФАПЧ надає передатна характеристика фазового детектора, тип фільтра, його порядок, коефіцієнт передачі в петлі зворотного зв'язку та ін. Ці фактори впливають на умови захоплення та утримання частоти, на нелінійні спотворення при детектуванні, на спектральний склад сигналу, що генерується керованим генератором.

Об'єктом дослідження у цій роботі є найпростіша система ФАПЧ, у якій ролі керованого генератора (VCO) використовується частотний модулятор. Вихідна схема моделі (див. рис. 6.1) розрахована дослідження її як частотного детектора. Модель включає джерело ЧМ сигналу (модулі 2 та 3) та власне модель ФАПЧ (модулі 0, 1, 4, 5). При проведенні досліджень джерело сигналу та модель ФАПЧ модифікуються шляхом зміни параметрів модулів та введення до складу структури додаткових модулів.

Завдання даної роботи вирішуються шляхом аналізу сигналів у різних точках моделі ФАПЧ, як у часовій, і у частотній областях, і навіть отримання їх основні оцінок параметрів самої ФАПЧ. При виконанні досліджень, зокрема, в оцінці спектрів, необхідно використовувати потрібні відрізки реалізації сигналів, характерні для того чи іншого варіанта використання ФАПЧ. Так, в оцінці нелінійних спотворень, внесених ФАПЧ при демодуляції, слід враховувати перехідний режим ФАПЧ (відповідно, ділянку реалізації, де цей режим спостерігається). При дослідженні режимів, характерних для роботи ФАПЧ у складі керованого генератора, слід вибирати фрагменти реалізації, де перехідні процеси закінчилися.

На рис.6.5 зображено схему моделі синтезатора частоти на основі ФАПЧ. У коло зворотнього зв'язку включено дільник частоти (модуль 3). Крім того, в схему введено елемент частотної корекції (модуль 7), що дозволяє суттєво розширити смугу захвату. Слід зазначити, що входом синтезатора є коефіцієнт поділу (ціле число), що задається з панелі параметрів дільника. Виходом синтезатора є вихід ГУН.

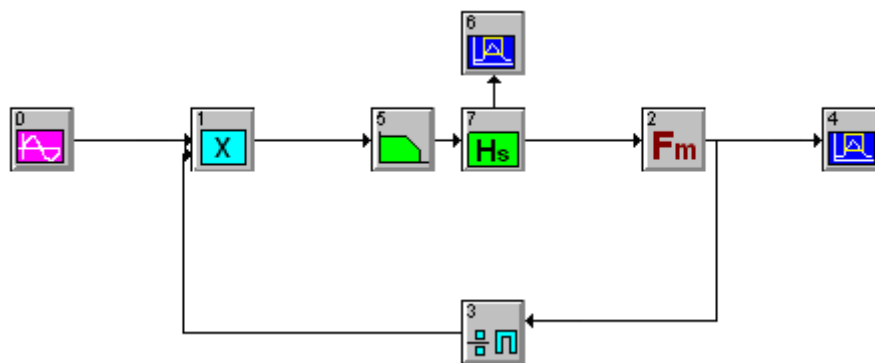


Рисунок 6.5 – Структурна схема моделі синтезатора частоти з дільником у ланцюзі зворотного зв'язку

Під час дослідження синтезатора необхідно приділити увагу сигналу управління ГУН. У ньому явно проглядається ділянка захоплення (початкова ділянка) та ділянка відстеження. В ідеальному випадку на ділянці відстеження сигнал повинен бути з постійною напругою. Чим сильніша відмінність від постійної напруги, тим гірша якість вихідного сигналу ФАПЧ.

У роботі необхідно дослідити роботу запропонованої схеми ФАПЧ при дискретній перебудові частоти в межах смуги захоплення, дати оцінку спектру сигналу, що генерується синтезатором, і якості роботи аналізованого синтезатора.

Зміст звіту

1. Найменування роботи, її мета та завдання.
2. Структурні схеми моделей, параметри, параметри системного часу.
3. Ескізи графіків сигналів, їх спектрів побудовані залежності та обчислення значення параметрів відповідно до пунктів 1...11.
4. Висновки відповідно до пунктів 1...11.

Контрольні питання

1. Пояснити фізично, чому ФАПЧ як керований генератор в режимі, що встановився, має нульову помилку відстеження частоти задаючого коливання.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [3], [8], [10].

7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ СИГНАЛІВ У ДИСКРЕТНОМУ КАНАЛІ ЗВ'ЯЗКУ

Мета роботи: вивчити процеси перетворення сигналів у дискретних каналах зв'язку, реалізованих на основі безперервного ЧМ каналу.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, SystemView.

Завдання:

1. Завантажити виконуючий файл моделі 7_1.svu (або Bin_FM_Channel.svu) (див. рис. 7.1). Записати параметри модулів та налаштування системного часу. Змінити параметри модулів відповідно до індивідуального варіанта завдання. У таблиці 7.1 для кожного варіанту наведено тривалість бітової послідовності T_b в мс, а також частоти ЧМ-2 сигналу Гц, відповідні передачі логічних нулів f_0 і одиниць f_1 . Дані зміни безпосередньо вплинуть на параметри модулів передавача (модулі 0 і 3) і, крім того, викликають необхідність відповідного налаштування приймачів. Записати змінені параметри модулів та порівняти їх із вихідними. Вказати, на які параметри приймачів впливає тривалість біта, а на які – частота бітової послідовності.

Таблиця 7.1 – Таблиця варіантів

N вар.	T_b , мс	f_0 , Гц	f_1 , Гц
1	125	200	240
2	125	120	240
3	40	100	125
4	50	60	100
5	80	75	100
6	125	124	140
7	160	75	100
8	200	20	35
9	250	40	60
10	400	75	100
11	500	10	14
12	125	200	280
13	40	125	200
14	50	220	260
15	80	100	125

Для отримання більш наочних результатів рекомендується вибрати тривалість моделювання (*Stop Time*) у налаштуваннях системного часу, що дорівнює 10 – 20 бітовим інтервалам.

2. Запустити модель на цикл моделювання та отримати графіки первинного сигналу, що відображає передане повідомлення та графіки

відновлених сигналів на виході каналів. Визначити запізнення, яке вносить кожен канал. Встановити, чи це запізнення є випадковим чи постійним. Звернути увагу на поведінку першого біта, що приймається, когерентним ЧМ демодулятором. Дати пояснення явищу, що спостерігається.

3. Отримати графіки сигналів на входах пристроїв прийняття рішень кожного з демодуляторів (пороговий пристрій 42, визначення номера гілки з найбільшим сигналом 10 і 20). Дати аналіз процесів формування цих сигналів. Логічно обґрунтувати необхідність перетворень, що виконуються. Порівняти ці перетворення для розглянутих демодуляторів, використовуючи графіки сигналів у проміжних точках. Якісно оцінити перешкодостійкість розглянутих демодуляторів, зробивши припущення про найбільш і найменш перешкодостійкий.

4. Для підтвердження або спростування зробленого припущення про завадостійкість каналів ввести шуми в лінію зв'язку (модуль 29). Початкове значення СКО шумів може становити 0,5-0,7 В. Збільшуючи рівень шумів з кроком 0,2-0,3 В та зіставляючи графіки переданих та прийнятих повідомлень, оцінити мінімальний рівень шумів, при якому виникають помилки в різних каналах. Звернути увагу на характер виникаючих спотворень у когерентному та некогерентному каналах; пояснити причини спостережуваних відмінностей.

5. Для точної оцінки завадостійкості каналів завантажити файл моделі 2 (7_2.svu або Bin_Fm_Chanel_Noise.svu). Записати параметри модулів та налаштування системного часу. Порівняти параметри системного часу із параметрами попередньої моделі. Змінювати параметри відповідно до власного варіанту не обов'язково.

6. Побудувати залежність ймовірності помилкового прийому від відношення енергії на біт до СПМ шуму $P_{\text{ош}} = f(E_{\text{бм}}/N_0)$ когерентного каналу ЧМ-2. Для цього необхідно приєднати входи аналізатора (модуль 61) до виходів досліджуваного (модуль 27) еталонного каналів (модуль 50). Встановити значення СПМ шуму (модуль 29, орієнтовні межі діапазону значень $10^{-2} - 10^{-4}$ Вт/Гц) і запустити модель на цикл моделювання.

При закінченні рахунку має з'явитися повідомлення про закінчення моделювання за умовою, що визначається модулем 67. Якщо таке повідомлення не з'явилося, а моделювання закінчилося після закінчення заданого у вікні «System Time» інтервалу часу, необхідно повторити моделювання при вибраних параметрах, попередньо збільшивши тривалість інтервалу моделювання в вікні «System Time». Оцінити необхідну «добавку» до встановленого часу моделювання можна за динамікою процесу накопичення помилок, екстраполюючи графік залежності процесу (модуль 64) до граничного значення, заданого в модулі зупинки (модуль 67).

При оцінці достовірності результату статистичного моделювання необхідно проаналізувати графік зміни ймовірності помилки біта в процесі моделювання (модуль 65) щодо стабілізації цієї величини на момент видачі результату (момент зупинки). Якщо ця умова «стабілізації» не виконується, необхідно збільшити поріг, що вводиться в модуль зупинки (модуль 67).

Задаючи ряд значень СПМ, із зазначеного раніше діапазону та реєструючи відповідні їм значення ймовірності помилок, отримати набір точок, за яким необхідно побудувати графік залежності:

$$P_{\text{ош}} = f(E_{\text{бim}}/N_0), \quad (7.1)$$

попередньо обчисливши значення відношення $E_{\text{бim}}/N_0$.

7. Відповідно до порядку, викладеного в пункті 6 побудувати графіки залежностей ймовірності помилки біта від АМ-2 і некогерентного ЧМ-2 каналів. Графіки побудувати в загальній системі координат, використовуючи логарифмічний масштаб за шкалою абсцис. Дати кількісну оцінку завадостійкості кожного з каналів та їх спільну порівняльну характеристику.

8. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості. Об'єктом дослідження у роботі є три різних бінарних канали зв'язку – АМ-2 – некогерентний канал, ЧМ-2 – некогерентний канал і ЧМ-2 – когерентний канал, що забезпечують передачу повідомлень одного джерела. Модель, що відображає роботу каналів, представлена рис. 7.1.

У моделі реалізується модуляція ЧМ-2. Виділення частотних посилок, що відповідають передачі лише логічних одиниць, дозволяє сформувати модуляцію АМ-2 з пасивною паузою.

На рис. 7.1 модулі 0 та 3 – відтворюють джерело модульованого ЧМ-2 сигналу. Модуль 2 відображає передане дискретне повідомлення. Модуль 29 – джерело Гауссова білого шуму (адитивна перешкода).

Модуль 3 являє собою частотний модулятор – джерело гармонійного сигналу з частотою, що змінюється пропорційно до рівня напруги на його вході. Основні параметри цього модуля: початкова частота (*Frequency* f_0 – частота модульованого сигналу при рівні модулюючої напруги, що дорівнює 0 В), а також крутизна модуляційної характеристики m (*Mod Gain*, Гц/В), що є коефіцієнтом пропорційності, який визначає, на скільки герц зміниться частота сигналу на виході модулятора при зміні напруги, що модулює, на 1 В. Таким чином, миттєва частота ЧМ-сигналу змінюється за законом:

$$f(U_{\text{вх}}) = f_0 + m \cdot U_{\text{вх}}. \quad (7.2)$$

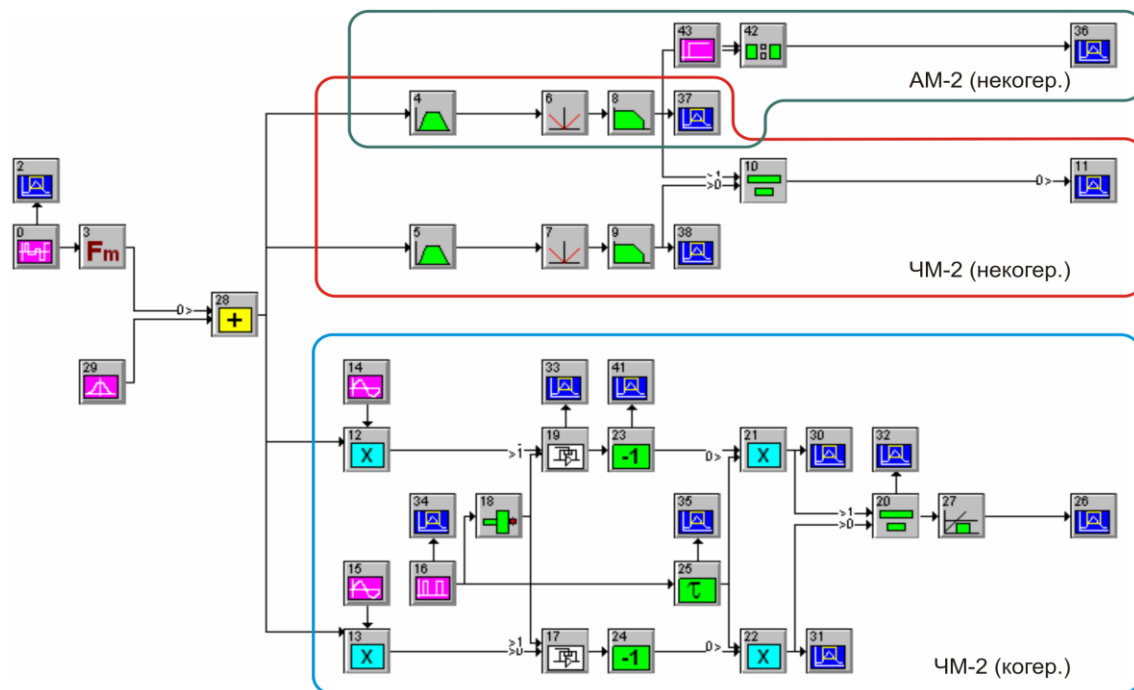


Рисунок 7.1 – Структурна схема моделі досліджуваних каналів зв'язку

Модулі 4-10 реалізують некогерентний ЧМ демодулятор. Вихідний сигнал демодулятора відображається модулем 11. Частина модулів цього демодулятора (4, 6, 8) задіяні у складі некогерентного АМ-2 демодулятора. Крім зазначених, до складу АМ демодулятора входять модулі 42 та 43, що реалізують функцію прийняття рішення. Вихід АМ - демодулятора відображається модулем 36.

Модулі 12 – 27 реалізують когерентний ЧМ-2 – демодулятор. Вихід цього демодулятора відображається модулем 26.

Обробка сигналу АМ демодулятором полягає у виділенні смуги частот, що відповідає передачі логічних одиниць (околиця частоти 120 Гц) фільтром 4, виділенні огинаючої (модулі 6, 8), порівнянні рівня огинаючої з порогом (0,35 В) – модулі 42, 43.

Некогерентний ЧС демодулятор містить окрім розглянутої вище АМ гілки обробки посилок з частотою 120 Гц (логічні 1), другу таку ж гілку обробки посилок з частотами 100 Гц (логічні 0), що включає модулі 5, 7, 9 і пристрій визначення номера гілки (0 або 1), що формує сигнал більшого рівня (модуль 10, див. *Help SysView*).

Когерентний ЧМ-2 демодулятор містить дві аналогічні гілки обробки посилок з частотами 100 Гц і 120 Гц, що видають свої вихідні сигнали на пристрій визначення номера гілки (0 або 1), що формує сигнал більшого рівня (модуль 20). Цей пристрій з'єднаний з одиницею 27, що видає вихідний сигнал ЧМ когерентного каналу у вигляді бінарних посилок стандартної тривалості та амплітуди. Гілки відрізняються лише частотами генераторів (модулі 14 та 15) – 120 Гц та 100 Гц.

При обробці сигналів у кожній гілці відбувається синхронне детектування частотних посилок (модулі 12, 14 і 13, 15), накопичення сигналів протягом часу дії кожної частотної посилки (модулі 17, 19), видача накопичених сигналів через інвертори і ключі (23, 21 і 24, 22) пристрій визначення гілки (0 або 1), в якій сформований сигнал більшого рівня. Синхронізація роботи демодулятора здійснюється генератором 16, синхронним із джерелом дискретних повідомлень.

У роботі необхідно дослідити процеси перетворення вихідних частотних посилок повідомлення, що відновлюються на виході каналів. Потрібно пояснити необхідність тих чи інших перетворень при виділенні інформаційних ознак сигналу, встановити, яка вихідна апріорна інформація про сигнали та перешкоди закладена в алгоритми роботи демодуляторів каналів зв'язку.

Необхідно також встановити ступінь завадостійкості кожного з аналізованих каналів. Як міра перешкодостійкості може бути використана статистична оцінка ймовірності помилкового прийому, що визначається як відношення числа помилкових біт у переданому фрагменті повідомлення до повної кількості переданих. Ці дослідження можуть бути виконані за допомогою моделі, зображеної на рис. 7.2.

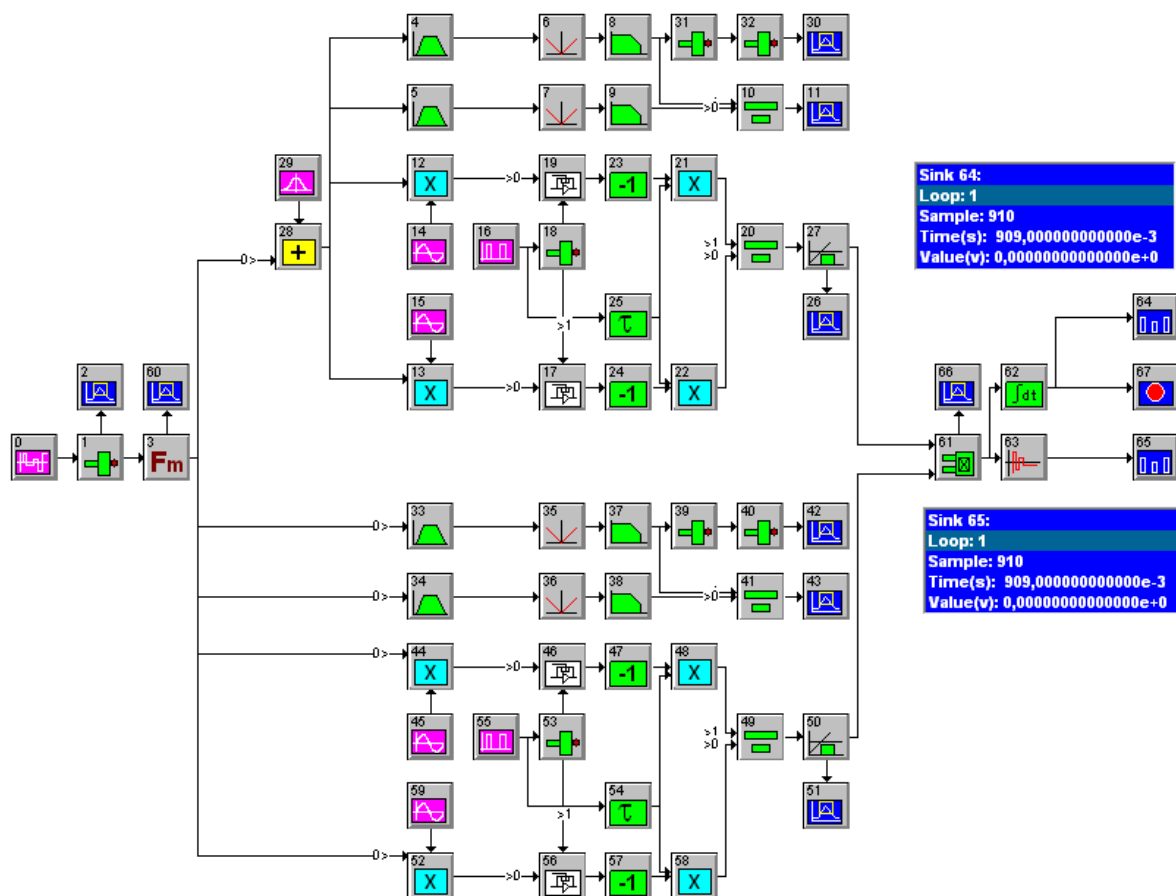


Рисунок 7.2 – Структурна схема моделі на дослідження характеристик завадостійкості дискретних каналів зв'язку

Модель включає дві групи каналів, що складаються з каналів АМ-2, ЧМ-2 – некогерентний та ЧМ-2 – когерентний. Відмінність цих груп у тому, що канали верхньої за схемою групи працюють в умовах перешкод, а канали нижньої групи працюють без перешкод, відновлюють повідомлення без помилок і є в цьому сенсі еталонними. Порівнюючи стани виходів відповідних каналів верхньої та нижньої груп щодо їх відповідності можна виявляти помилки у роботі кожного з каналів верхньої групи. Підраховуючи кількість помилок, допущених у кожному каналі за сеанс передачі, що містить відоме і досить велика кількість біт, що передаються, можна знайти оцінку ймовірності помилки біта для кожного каналу.

Для виконання цих обчислень до складу моделі включено аналізатор помилок, реалізований на елементі «Виключаюче АБО» (модуль 61). Аналізатор може бути підключений своїми входами до виходів відповідних каналів верхньої та нижньої групи. При невідповідності вихідних сигналів каналів на виході елемента «Виключаюче АБО» з'являється логічна одиниця, вказуючи на помилку прийому біта каналом верхньої групи.

Підрахунок кількості помилок (накопичення) здійснюється інтегратором (модуль 62), підключеним до виходу аналізатора. До цього виходу підключений елемент поточної статистичної обробки даних, що надходять з аналізатора (модуль 63). Обчислювана ним величина – статистична оцінка ймовірності помилки біта:

$$P_{\text{ош}} = \frac{n}{N}, \quad (7.3)$$

де N – число переданих біт;

n – число помилково прийнятих біт.

Моделювання припиняється досягненням числом помилкових біт деякого максимального значення, записаного в елементі «Стоп» (модуль 67).

Розглянута модель реалізує метод статистичних випробувань (Монте-Карло) і дозволяє отримувати точкові оцінки ймовірностей помилок кожного каналу при заданих параметрах. Отримуючи ці значення оцінок за різних параметрів каналу, сигналів та перешкод можна побудувати відповідні залежності та графіки. Достовірність результатів, одержуваних за допомогою даної моделі, зростає зі збільшенням кількості накопичених помилок та кількості переданих біт.

В якості характеристики перешкодостійкості каналу зв'язку, широке поширення на практиці отримала залежність ймовірності помилкового прийому біта від відношення енергії, що припадає на один біт, що передається, до спектральної щільності потужності (СПМ) перешкоди:

$$P_{\text{ош}} = f(E_{\text{бит}}/N_0), \quad (7.4)$$

де $E_{\text{бит}} = \int_0^{T_b} s^2(t) dt$ – енергія сигналу $s(t)$ тривалістю T_b , який

відповідає одному біту, що передається;

N_0 – СПМ перешкоди.

У роботі необхідно побудувати залежності ймовірності помилкового прийому біта від відношення енергії на біт до СПМ перешкоди для кожного з досліджуваних каналів, для чого аналізатор (модуль 61) підключається послідовно до виходів відповідних каналів.

Зміст звіту

1. Найменування, мета та завдання роботи.
2. Схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.
3. Графіки побудованих залежностей, сигналів та спектрів, отримані відповідно до пп 1...7.
4. Висновки щодо пунктів виконаного плану та роботи в цілому.

Контрольні питання

1. Навести опис та функції кожного блоку моделі.
2. Пояснити різницю між когерентним та некогерентним прийомом. Чий прийом краще в яких випадках?
3. Які функції у інтегратора в даих схемах?
4. Чи вносять блоки затримку при передачі? Якщо так, то які саме?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1-3], [5], [8-9].

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конспект лекцій Теорія електричних кіл та сигналів. Теорія сигналів / О. М. Кобяков, І. Є. Бражник – Суми: Сумський державний університет, 2017. – 126 с.
2. Теорія електричного зв'язку: навч. посібник / Гусєв О.Ю., Конахович Г.Ф., Корнієнко В.І. – Магнолія 2006, 2021. – 364 с.
3. Климаш, М.М. Телекомунікаційні системи передавання інформації : навч. посіб. / М.М. Климаш, Р.С. Колодій. - Львів : вид-во Львівської політехніки, 2018. - 632 с.
4. Бондаренко І.М., Медведєв В.К. Системи радіозв'язку. Кн.1. Системи електрозв'язку: Навч. посібник. – Харків.: ХІ ВПС, 2002. – 181 с.
5. Навчальний посібник: Наритник Т. М., Почерняєв В. М., Повхліб В. С. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку (основи розрахунку). Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019. – 164с.
6. Лошаков В.А, Наритник Т.Н., Шостко І.С., Сабурова С.О., Ощепков М.Ю., Півнюк О.В. Системы и стандарты цифрового телевидения Навч.посібник. - Харків.: ХНУРЕ. - 2014. 638с.
7. Розробка інформаційних ресурсів та систем: підручник. У 2 т. / Л.С.Глоба (Том 2: «Несуперечність і реплікація», «Відмовостійкість», «Захист інформації», «Розподілені системи об'єктів», «Розподілені файлові системи», «Розподілені системи документів», «Розподілені системи узгодження», «Пошукові системи»), - К.: НТУУ "КПІ", 2015. Т.2. - 376 с..
8. М.Л. Бірюков, В.В. Максимов, Н.Р. Тріска «Цифрові системи передавання в електрозв'язку. Аналого-цифрове та цифро-аналогове перетворення сигналів». Навчально-методичний посібник. Київ. НТУУ «КПІ» 2010. с.122.
9. Брагін А.С., Вульпе О.А. "Передавальні та приймальні пристрої систем радіозв'язку". Навчальний посібник. - ІВЦ "Політехніка" 2009, - 130с.
10. Лебедев О.М., Ладик О.І., Прищепа Т.О. "Дослідження функціональних властивостей аналогових і цифрових пристроїв". Методичні вказівки. - Київ: НТУУ "КПІ" 2009 - 30с.