

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ: «ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОДУВАННЯ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
172 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА
ОСВІТНЬОГО СТУПНЯ «БАКАЛАВР»

Покровськ
2021

УДК 004.4:519.7](072)
М 54

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Теорія інформації та кодування» (для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка освітнього ступеня «бакалавр») [Електронний ресурс] / уклад. А.О. Воропаєва, Д.О. Жуковська. – Покровськ : ДонНТУ, 2021. – 67 с.

Методичні вказівки складені відповідно до робочих програм, розроблених для навчальних планів підготовки інженера в галузі електроніки та телекомунікацій. Розглядаються сучасні математичні методи розв'язання задач за допомогою моделювання та чисельних методів і алгоритмів їх реалізації на ЕОМ, формування умінь виконувати постановку, алгоритмізацію та розв'язок основних типів задач теорії сигналів та кодування; формування умінь використовувати сучасні пакети прикладних програм (MATLAB, Simulink) при виконанні практичних завдань; умінь застосовувати набуті знання у професійній діяльності. Методичні вказівки націлені на виконання навчально-дослідних робіт студентів під час практикуму.

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

Рецензент: _____ Штепа О.А. к.т.н., доц., доц. каф. електронної техніки
(підпис)

Відповідальний за випуск: _____ Лактіонов І.С., к.т.н., проф., завідувач
кафедри автоматики та телекомунікацій

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 10 від 29.06.2021 р.

Розглянуто на засіданні кафедри автоматики та телекомунікацій,
протокол № 6 від 12.05.2021р.

Донецький національний технічний університет, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Практична робота № 1 Генерація сигналів в і оцінка їх енергетичних характеристик у пакеті Simulink	5
2. Практична робота № 2 Оцінка спектральних характеристик сигналів у пакеті Simulink.....	12
3. Практична робота № 3 Синтез цифрових фільтрів і фільтрація сигналів у пакеті Simulink	28
4. Практична робота № 4 Кореляційний аналіз сигналів у пакеті MATLAB	44
5. Практична робота № 5 Модуляція й демодуляція сигналів	56
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	67

ВСТУП

Метою вивчення дисципліни «Теорія інформації та кодування» є освоєння основ моделювання сигналів у прикладних пакетах, вивчення методів цифрового спектрального аналізу сигналів, синтезу й аналізу цифрових фільтрів, а також основи застосування цифрової фільтрації сигналів, вивчення принципів кореляційного аналізу стохастичних і детермінованих сигналів їх реалізації на ЕОМ.

Завдання: отримання знань щодо принципів побудови методів розв'язання основних типів задач зі створення, передачі та прийому інформації в розвитку сучасного інформаційного суспільства; формування умінь використовувати сучасні пакети прикладних програм (MATLAB, Simulink) при виконанні практичних завдань; виховання вміння застосовувати набуті знання у професійній діяльності.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати: сучасний стан наукової дисципліни, формування задач та методи їх розв'язування, розуміти сутність і значення інформації в розвитку сучасного інформаційного суспільства;

вміти: застосовувати набуті знання для вирішення практичних завдань; пояснювати результати, отримані в результаті проведення вимірювань, в термінах їх значущості та пов'язувати їх з відповідною теорією; застосовувати навички оцінювання, інтерпретації та синтезу інформації і даних.

У процесі вивчення навчальної дисципліни «Теорія інформації та кодування» студенти виконують практичні роботи. Звіт до практичних 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 практична робота, що виконана і захищена за графіком, встановленим робочою програмою курсу, оцінюється за критерієм оцінювання знань за 100-бальною шкалою.

1. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

ГЕНЕРАЦІЯ СИГНАЛІВ В І ОЦІНКА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК У ПАКЕТІ SIMULINK

Мета роботи: освоїти основи моделювання сигналів у пакеті Simulink, розглянути і вивчити способи оцінки енергетичних характеристик сигналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, MATLAB, Simulink.

Завдання:

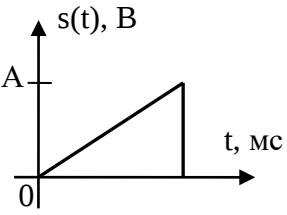
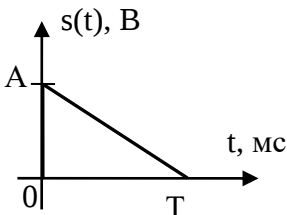
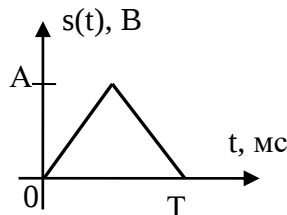
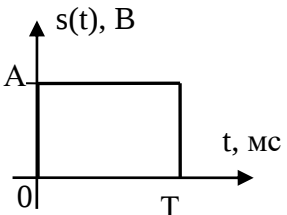
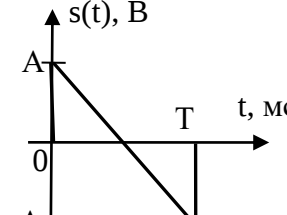
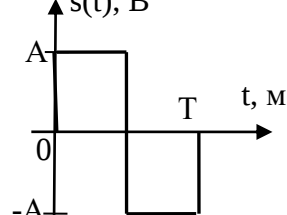
1. Завантажити пакет Simulink і ознайомитися зі складом, призначенням і налаштуваннями блоків базової бібліотеки й бібліотеки DSP Blockset.

2. Використовуючи блок *Signal Builder* з папки *Sources* або інші блоки базової бібліотеки Simulink створити відповідно до свого варіанта завдання (табл. 1.1) моделі двох сигналів з табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань

№ варіанта	Завдання 1				Завдання 2
	Типи сигналів	Т, мс	А, В		Математична модель сигналу
1	1.1	1.2	12	1	$s(t) = \cos(2\pi 100t) + \sin(2\pi 300t) - 3\sin(2\pi 120t) + 1$
2	1.1	1.3	50	2	$s(t) = \sin(2\pi 400t) \cos(2\pi 100t) + 5\sin(2\pi 350t) + 6$
3	1.1	1.4	70	3	$s(t) = \cos^2(2\pi 200t) + 6\sin(2\pi 30t) - 4\sin(2\pi 20t)$
4	1.5	1.1	80	3	$s(t) = \cos(2\pi 200t) \cos(2\pi 130t) - 5\sin(2\pi 850t) + 10$
5	1.1	1.6	15	5	$s(t) = \sin(2\pi 440t) + 3\sin(2\pi 30t) + \sin(2\pi 2000t) + 8$
6	1.2	1.3	80	1	$s(t) = \cos(2\pi 200t) \cos(2\pi 130t) - 5\sin(2\pi 850t) + 10$
7	1.2	1.4	5	2	$s(t) = \cos(2\pi 100t) + 6\sin^2(2\pi 130t) - 4\sin(2\pi 420t) - 1$
8	1.2	1.5	55	3	$s(t) = 3\cos(2\pi 300t) + \sin(2\pi 500t) \cos(2\pi 700t) - 5$
9	1.2	1.6	40	4	$s(t) = \sin(2\pi 100t) + \cos(2\pi 50t) \sin(2\pi 20t) - 8$
10	1.3	1.4	35	5	$s(t) = \sin(2\pi 40t) + 2\sin(2\pi 30t) + \sin(2\pi 2000t) + 3$
11	1.3	1.5	90	1	$s(t) = \cos^2(2\pi 100t) + 5\sin(2\pi 230t) - 4\sin(2\pi 420t) + 8$
12	1.3	1.6	25	2	$s(t) = \cos(2\pi 100t) - 4\sin(2\pi 150t) + 3\sin(2\pi 200t) - 1$
13	1.4	1.5	10	3	$s(t) = \cos(2\pi 100t) + \sin(2\pi 300t) - 3\sin(2\pi 120t) + 1$
14	1.4	1.6	50	4	$s(t) = \sin(2\pi 400t) \cos(2\pi 100t) + 5\sin(2\pi 350t) + 6$
15	1.5	1.6	70	5	$s(t) = \cos^2(2\pi 200t) + 6\sin(2\pi 30t) - 4\sin(2\pi 20t)$

Таблиця 1.2 – Графіки імпульсних сигналів для завдання 1

Сигнал 1.1	Сигнал 1.2	Сигнал 1.3
		
Сигнал 1.4	Сигнал 1.5	Сигнал 1.6
		

3. Створити модель (див. рис. 1.1), що виводить графіки обох сигналів, а також графік суми цих сигналів.

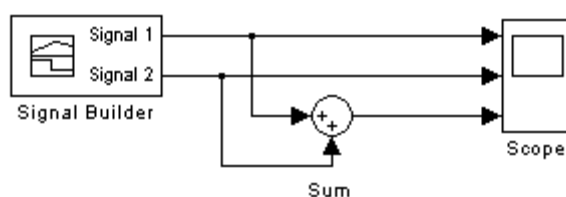


Рисунок 1.1 – Схема моделі до завдання 1

4. Аналітично описати математичні моделі всіх трьох отриманих сигналів, аналітично визначити енергетичні параметри сумарного сигналу: енергію, середню потужність, пік фактор, норму.

5. Оцінити на моделі енергетичні параметри сумарного сигналу й зрівняти з результатами розрахунку в пункті 4. Для оцінки енергії сигналу можна використовувати структуру моделі, наведену на рис. 1.2.

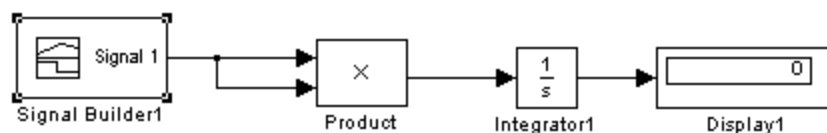


Рисунок 1.2 – Схема моделі для оцінки енергії сигналу

6. Використовуючи блоки базової бібліотеки й бібліотеки DSP Blockset створіть модель полігармонійного сигналу згідно варіанта

завдання (див. табл. 1.1). Тривалість сигналу, що моделюється дорівнює 3-4 періоду самого низькочастотного компонента.

7. Оцініть на моделі енергетичні параметри полігармонійного сигналу (аналогічно пункту 5). Аналітично оцініть спектральний склад даного сигналу й обґрунтуйте вибір частоти дискретизації.

8. Зробити висновки.

Теоретичні відомості.

Формули для розрахунку основних енергетичних характеристик сигналів наведені нижче:

- миттєва потужність сигналу: $p(t) = S^2(t) \rightarrow [B^2]$;
- енергія сигналу: $E = \int_{-\infty}^{+\infty} S^2(t) dt. \rightarrow [B^2 c]$;
- норма сигналу: $\|S\| = \sqrt{E} \rightarrow [\sqrt{B^2 c}]$;
- середня потужність сигналу: $P_s = \frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt \rightarrow [B^2]$

де T – тривалість сигналу (для періодичних сигналів – період);

– середньквдратичене значення сигналу (СКЗ, RMS):

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{P_s} \rightarrow [B].$$

Для опису сигналу також часто використовують наступні параметри:

- максимальна амплітуда ($A_{\max}$);
- мінімальна амплітуда ($A_{\min}$);
- розкид амплітуд ($A_{p-p} = A_{\max} - A_{\min}$);
- пік-фактор (коефіцієнт амплітуд) $K_a = \frac{\max |S(t)|}{\sigma_{RMS}}$,

де $\max |S(t)|$ - максимальна амплітуда модуля сигналу.

Створюємо модель для прикладу сигналу 1.1 та 1.5, що виводить графіки обох сигналів, а також графік суми цих сигналів.

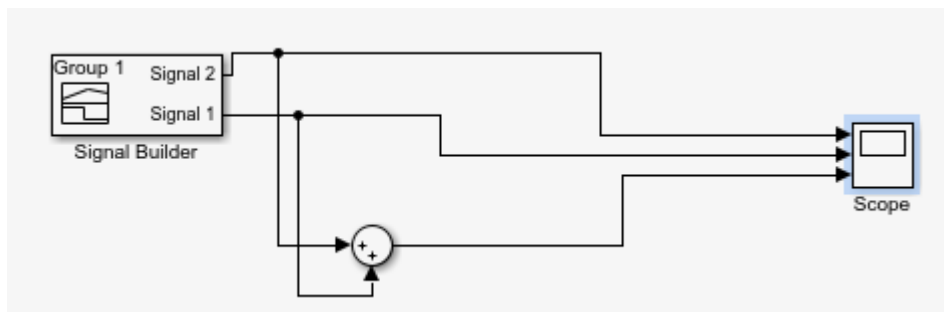


Рисунок 1.3 – Схема моделі, що виводить графіки обох сигналів, а також графік суми цих сигналів

Отримаємо графіки сигналів з блоку Scope (рис. 1.4).

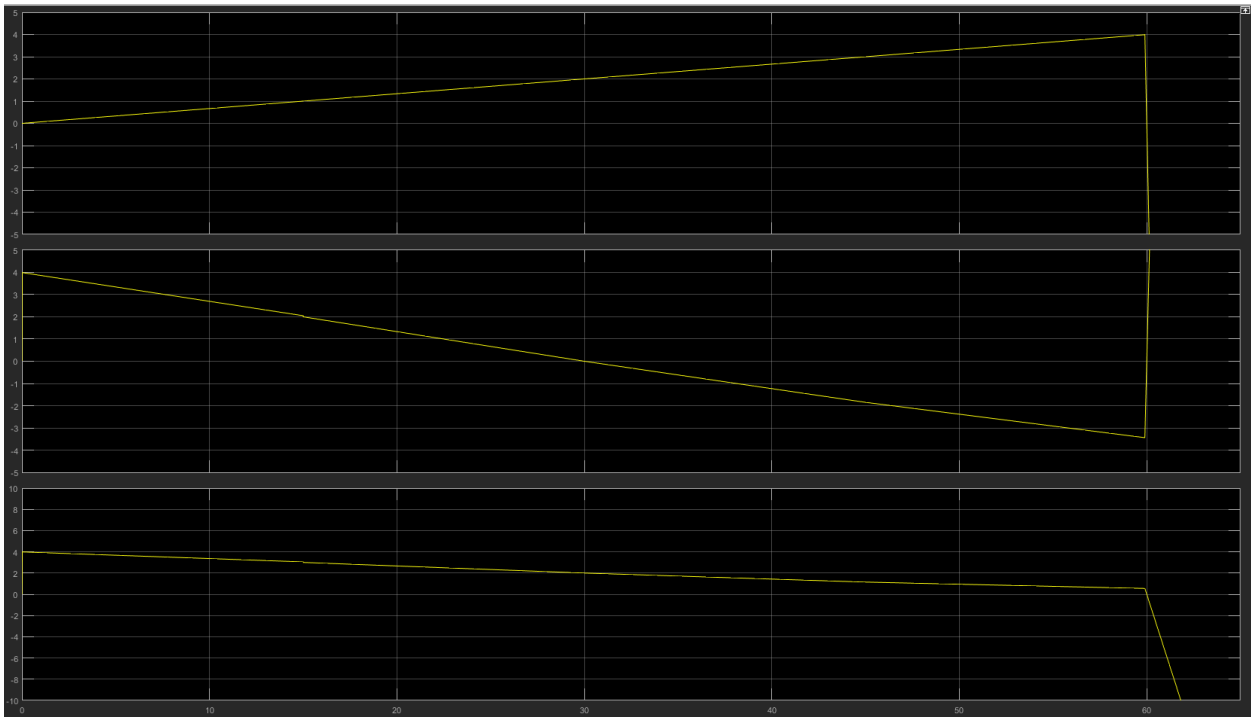


Рисунок 1.4 – Графіки отриманих сигналів

Аналітично опишемо математичні моделі всіх трьох отриманих сигналів. Для цього необхідно скласти рівняння прямих, що описують вхідні сигнали:

- Перший сигнал – це несиметричний трикутний імпульс, для нього:

$$S_1(t) = \begin{cases} A \frac{t}{T}, & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & t < 0, t > T \end{cases};$$

- Другий сигнал – це пілоподібний сигнал, для нього:

$$S_2(t) = \frac{2A}{T}(t - kT), \quad (k - \frac{1}{2})T < t \leq (k + \frac{1}{2})T.$$

- Для сумарного сигналу:

$$S(t) = A \frac{t}{T} + \frac{2A}{T}(t - kT).$$

Аналітично визначити енергетичні параметри сумарного сигналу:

- енергію;
- середню потужність;
- пік фактор;
- норму.

Для цього додамо до схеми наступні блоки, як показано на рис. 1.5.

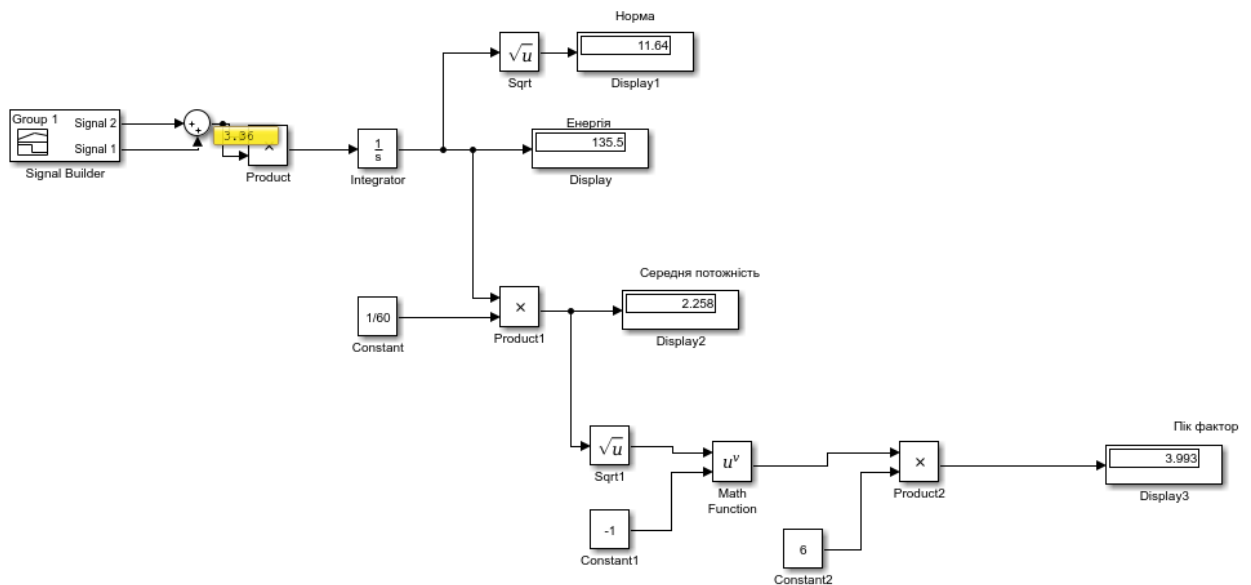


Рисунок 1.5 – Схема визначення енергетичних параметрів сумарного сигналу

Використовуючи блоки базової бібліотеки й бібліотеки DSP Blockset створіть модель полігармонійного сигналу згідно варіанта завдання. Тривалість сигналу, що моделюється дорівнює 3-4 періоду самого низькочастотного компонента. Для сигналу $s(t) = \cos(2\pi 300t) + \sin(2\pi 450t) \sin(2\pi 200t) - 1$ схема моделі має вигляд (рис. 1.6).

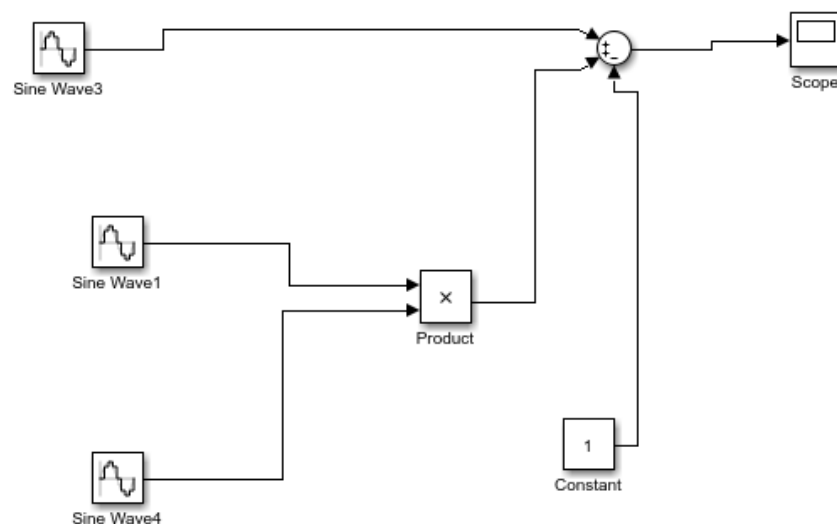


Рисунок 1.6 – Схема моделі

Отримаємо графік сигналу з блоку Scope (рис. 1.7).

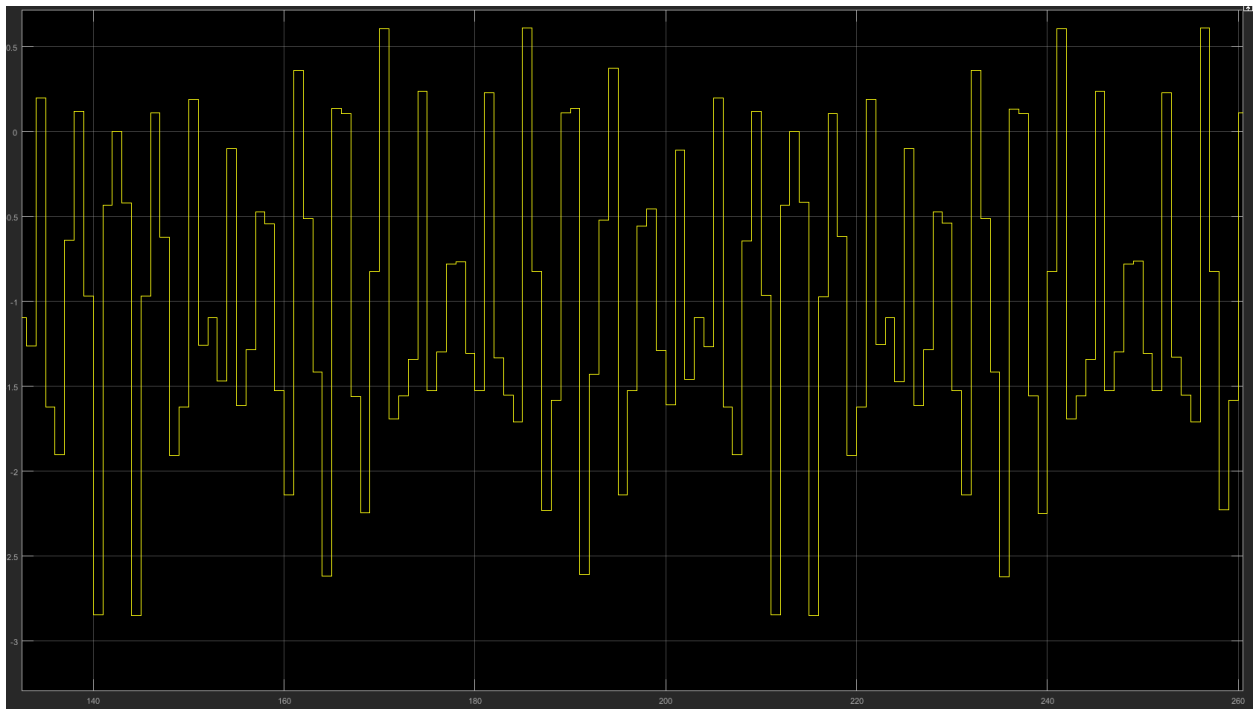


Рисунок 1.7 – Графік отриманого сигналу

Оцінемо на моделі енергетичні параметри полігармонійного сигналу. Для цього додамо до схеми наступні блоки, як показано на рис. 1.8.

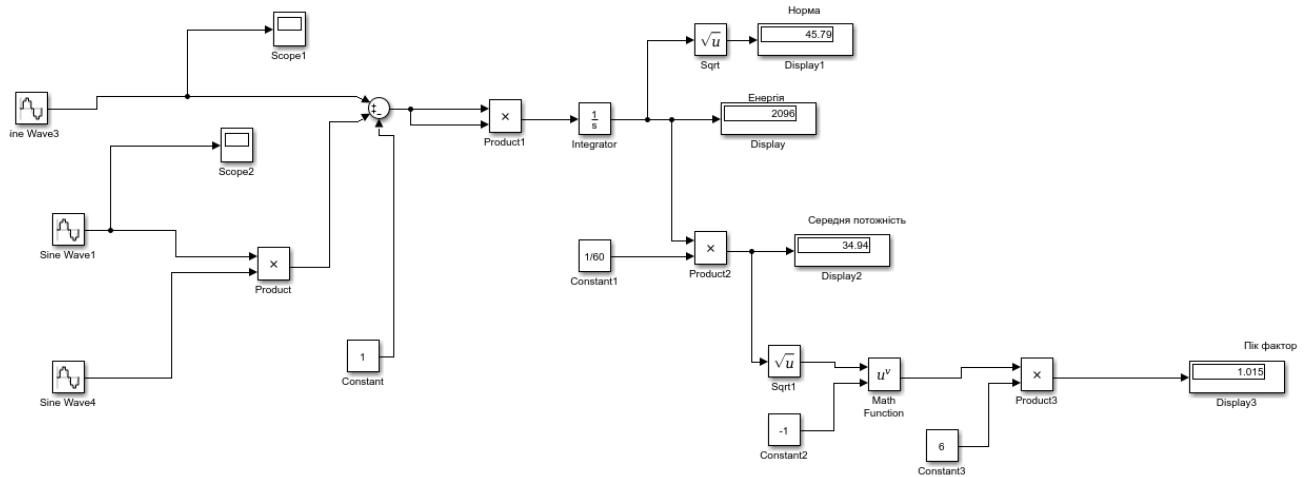
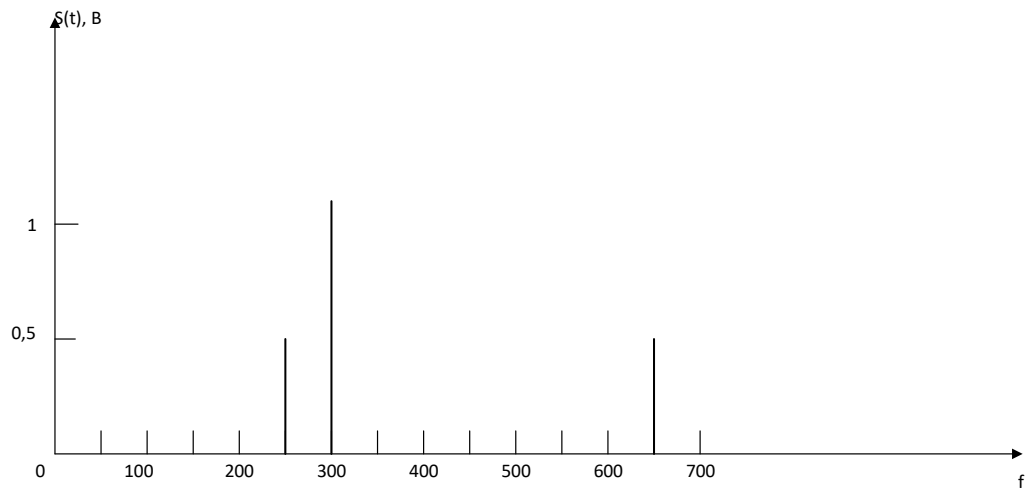


Рисунок 1.8 – Модель оцінки енергетичних параметрів полігармонійного сигналу

Аналітично оцінемо спектральний склад даного сигналу й обґрунтуємо вибір частоти дискретизації.



Вихідний сигнал:

$$S(t) = \cos(2\pi 300t) + \sin(2\pi 450t) \sin(2\pi 200t) - 1 = \cos(2\pi 300t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 250t) - \frac{1}{2} \cos(2\pi 650t)$$

Частота дискретизації = 1300 Гц, за теоремою Котельнікова:

$$F_{\text{диск}} \geq 2F_{\text{пвх}}.$$

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.
3. Графіки сигналів, отриманих відповідно до завдань практичної роботи.
4. Використовувані в аналітичних розрахунках формули з коментарями й результати розрахунків.
4. Висновки за результатами досліджень практичної роботи.

Контрольні питання

1. Дайте визначення поняттю «сигнал». Наведіть класифікацію сигналів.
2. Перелічіть й охарактеризуйте різні блоки Simulink для генерації сигналів.
3. Опишіть основні енергетичні характеристики сигналів.
4. Опишіть математичні моделі, властивості й характеристики з типових періодичних сигналів (гармонійні сигнали, послідовності прямокутних і трикутних імпульсів).
5. Опишіть математичні моделі, властивості й характеристики типових неперіодичних сигналів (одиначний прямокутний імпульс, дельта функція, функція Хевісайда).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [4], [5], [14].

2. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

ОЦІНКА СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ У ПАКЕТІ SIMULINK

Мета роботи: вивчити методи цифрового спектрального аналізу сигналів, засновані на перетворенні Фур'є.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, MATLAB, Simulink.

Завдання:

1. Використовуючи блоки базової бібліотеки Simulink і бібліотеки DSP Blockset створити модель (див. рис. 2.1) і настроїти її. Модель містить джерело полігармонійного сигналу й канал розрахунку спектра потужності сигналу. Полігармонійний сигнал описується наступною математичною моделлю $s(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t) + A_3 \cos(2\pi f_3 t)$. Параметри даної мат. моделі наведені в таблиці 2.1. Розмір буфера (Output buffer size) визначає тривалість аналізованої ділянки сигналу - установлюється 1024. Розмір перекриття сусідніх ділянок сигналу (Buffer overlap) установлюється 0. Тип вікна, що згладжує, - Hamming. Параметр FFT length блоку Magnitude FFT установлюється такий же, як розмір буфера. Час моделювання повинне бути більше чим добуток тривалості аналізованої ділянки в отсчетах на Sample time.

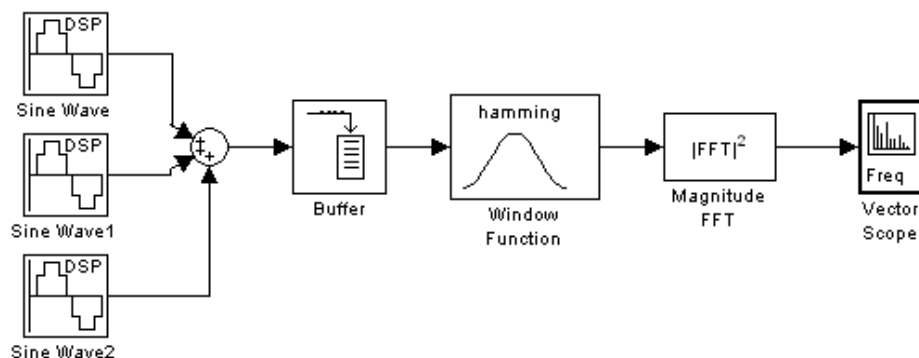


Рисунок 2.1 – Схема моделі для завдання 1

2. Одержати графік спектра сумарного сигналу й по ньому визначити різницю в потужності й амплітуді окремих гармонік. Для цього необхідно різницю із дБ перевести в рази. Порівняти отриманий результат з теоретичним.

3. Провести дослідження впливу розміру аналізованої ділянки сигналу на форму одержуваного спектра. Для цього провести моделювання з розмірами аналізованої ділянки сигналу в 1024, 2048 і 4096 відліків. Описати результати порівняльного аналізу.

4. Провести дослідження впливу типу вікна, що згладжує, на форму одержуваного спектра. Для цього провести моделювання з

вікнами Ханна, Блекмена, Кайзера. Розмір аналізованої ділянки сигналу встановити 2048 відліків.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань

№ варіанта	Завдання						
	A ₁ , В	f ₁ , Гц	A ₂ , В	f ₂ , Гц	A ₃ , В	f ₃ , Гц	Sample time
1	14	100	1	105	5	200	1/1000
2	3	25	16	23	10	40	1/100
3	2	65	50	68	9	100	1/500
4	5	70	35	73	10	6	1/500
5	50	15	6	13	6	25	1/100
6	5	120	70	125	50	200	1/500
7	2	480	30	485	20	300	1/1000
8	60	30	9	28	40	40	1/100
9	7	170	100	175	50	50	1/500
10	3	105	50	100	50	200	1/1000
11	1	20	60	16	10	10	1/100
12	100	100	8	98	60	10	1/500
13	5	400	100	395	40	100	1/1500
14	2	40	50	42	20	20	1/400
15	80	140	2	143	30	20	1/700

5. Провести моделювання без вікна, що згладжує. Описати результати порівняльного аналізу використання різних вікон.

6. Визначити мінімально можливу частоту дискретизації даного сигналу. Провести моделювання з даною частотою дискретизації.

7. Додати в модель джерело шуму й налаштувати його (див. рис. 2.2). Параметр Sample time (крок дискретизації) повинен мати таке ж значення, що в інших блоках моделі. Отримати графік спектра й проаналізувати його.

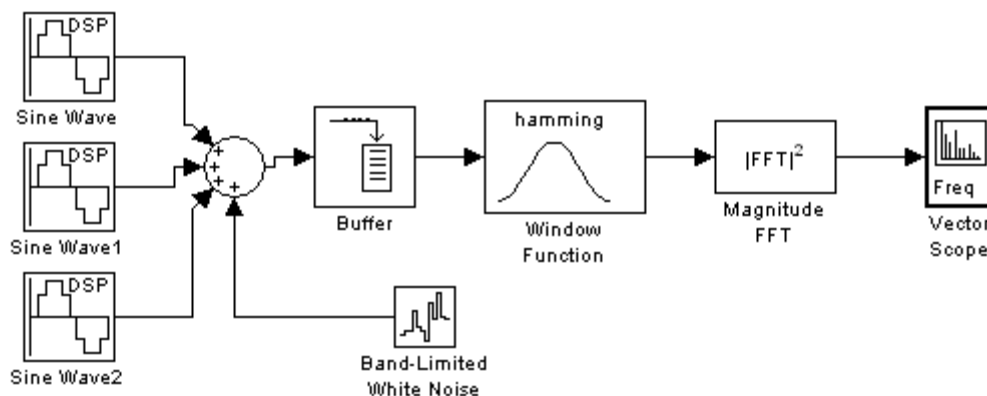


Рисунок 2.2 – Схема моделі з джерелом шуму

8. Змінити потужність шуму у два рази й чотири рази. Провести порівняльний аналіз графіків часової реалізації й спектра сигналу, отриманих для різних налаштувань моделі.

9. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Спектральна (частотна) форма подання сигналів використовує розкладання сигнальних функцій на періодичні складові.

Базовою операцією спектрального аналізу, виконуваною над послідовностями відліків сигналу, є пряме й зворотнє перетворення Фур'є, що дозволяє здійснити перенесення сигналу з амплітудно-часової області в представлення амплітуда-частота й зворотньо.

$$\dot{S}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt ; \quad (2.1)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f)e^{j2\pi ft} df . \quad (2.2)$$

При виконанні даного перетворення цифровими методами інтегрування по всьому діапазоні замінюється підсумовуванням - звичайної для обчислювальної техніки операцією.

Дискретний аналог, тобто дискретне перетворення Фур'є, аналогічне (2.1) і (2.2), має вигляд:

$$\dot{S}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k)e^{-j2\pi nk/N} ; \quad (2.3)$$

$$s(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{S}(n)e^{j2\pi nk/N} , \quad (2.4)$$

при $j = 0, 1, \dots, N-1$ і $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Алгоритм, що дозволяє скоротити об'єми необхідних обчислень, відоме як швидке перетворення Фур'є - ШПФ (Fast Fourier Transform - FFT). Сутність методу полягає в тому, що при підсумовуванні деякого обмеженого часового інтервалу відліків у силу періодичності послідовності N точок може бути виражена через послідовності $N/2$ крапок, причому процедура може бути застосована рекурсивно.

При аналізі реальних сигналів виникає ефект розтікання спектрів (явище витоків), викликаний кінцевою тривалістю аналізованих даних. Для мінімізації впливу цього ефекту перед процедурою ШПФ аналізована ділянка сигналу множать на вікно, що згладжує. Найбільше поширення одержали вікна: Хеммінга, Ханна, Кайзера, Бартлета, Блекмена. Застосування вікон, що зважають, небагато спотворює (розмиває) спектральні піки сигналів.

Використовуючи блоки базової бібліотеки Simulink і бібліотеки DSP Blockset створемо модель і налаштуємо її. Параметри моделі наступні:

$A_1=30$ В, $f_1=190$ Гц, $A_2=2$ В, $f_2=195$ Гц, $A_3=4$ В, $f_3=300$ Гц, Sample time=1/1000.

Отримаємо графік спектра сумарного сигналу й по ньому визначимо різницю в потужності й амплітуді окремих гармонік. Для цього необхідно різницю із дБ перевести в рази. Порівняємо отриманий результат з теоретичним.

Графік спектру потужності сумарного полігамонічного сигналу (рис. 2.3).

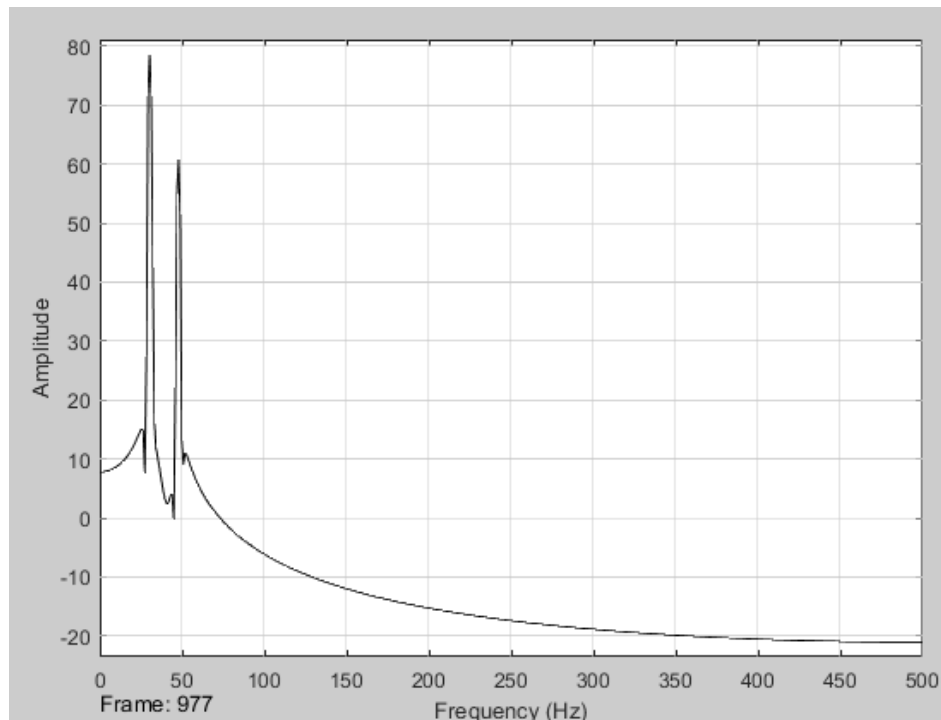


Рисунок 2.3 – Графік спектру потужності сумарного полігамонічного сигналу

Графік спектру амплітуд сумарного полігармонічного сигналу (рис. 2.4).

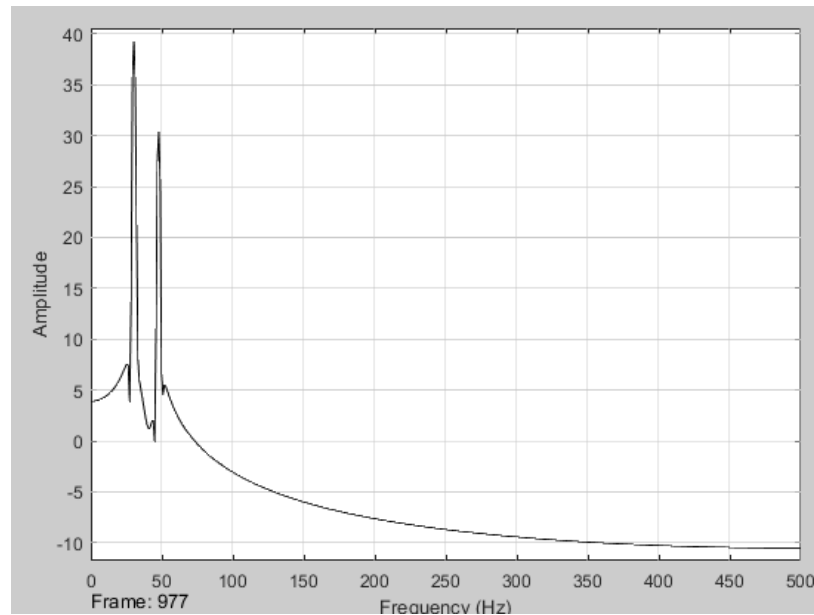


Рисунок 2.4 – Графік спектру амплітуд сумарного полігармонічного сигналу

Визначаємо різницю в потужності отриманих гармонік. За нульовий рівень беремо значення: $P_0=15$ дБ, $P_1=78$ дБ, $P_2=61$ дБ. Отже,

$$m_1 = 10^{0,1(P_1-P_0)} = 10^{0,163} = 10^{6,3} = 1995262 \text{ раз};$$

$$m_2 = 10^{0,1(P_2-P_0)} = 10^{0,146} = 10^{4,6} = 39810,7 \text{ раз};$$

$$m_3 = 10^{0,1(P_1-P_2)} = 10^{0,117} = 10^{1,7} = 20,11 \text{ раз}.$$

Побудуємо теоретичний спектр потужності (рис. 2.5).

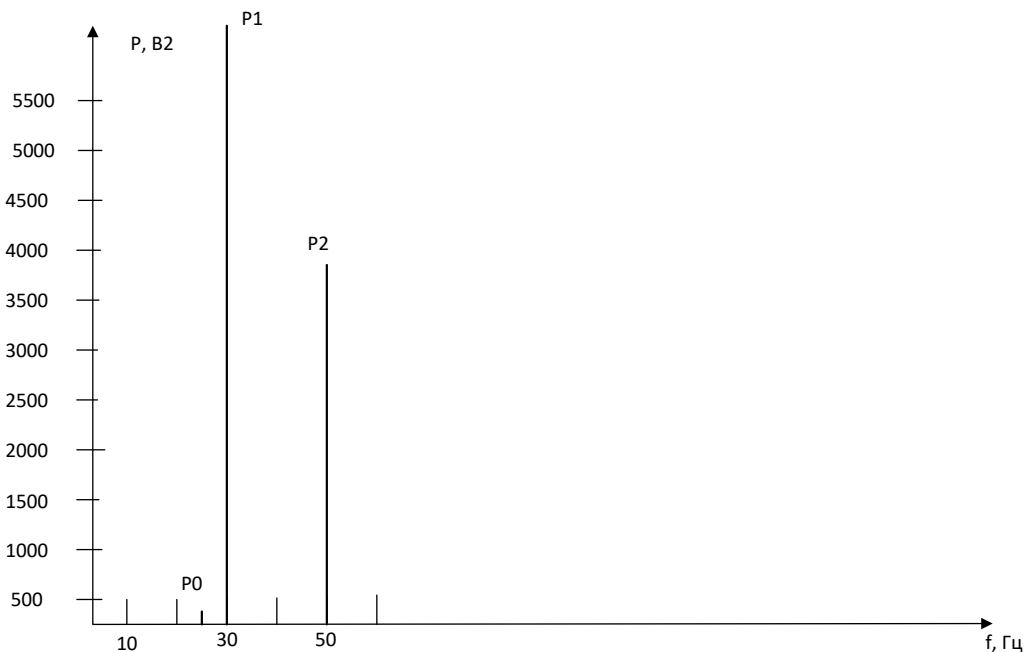


Рисунок 2.5 – Теоретичний спектр потужності

Переведемо потужність з B^2 у децибели:

$$P_{0дБ} = 10 \lg \frac{P_0}{P_0} = 0 \text{ дБ};$$

$$P_{1дБ} = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} = 10 \lg \frac{6084}{225} = 10 \lg 27,04 = 14,32 \text{ дБ};$$

$$P_{2дБ} = 10 \lg \frac{P_2}{P_0} = 10 \lg \frac{3721}{56,25} = 10 \lg 16,53 = 12,18 \text{ дБ}.$$

$$m_1 = 10^{0,1(P_1 - P_0)} = 10^{0,1 \cdot 14,32} = 10^{1,432} = 27,03 \text{ раз};$$

$$m_2 = 10^{0,1(P_2 - P_0)} = 10^{0,1 \cdot 12,18} = 10^{1,218} = 16,52 \text{ раз};$$

$$m_3 = 10^{0,1(P_1 - P_2)} = 10^{0,1 \cdot 2,14} = 10^{0,214} = 1,6 \text{ раз}.$$

Визначаємо різницю в амплітуді окремих гармонік. За нульовий рівень беремо значення: $A_0=7 \text{ В}$, $A_1=38 \text{ В}$, $A_2=30 \text{ В}$. Отже,

$$m_1 = 10^{0,1(A_1 - A_0)} = 10^{0,1 \cdot 31} = 10^{3,1} = 1258,9 \text{ раз};$$

$$m_2 = 10^{0,1(A_2 - A_0)} = 10^{0,1 \cdot 23} = 10^{2,3} = 199,5 \text{ раз};$$

$$m_3 = 10^{0,1(A_1 - A_2)} = 10^{0,1 \cdot 8} = 10^{0,8} = 6,3 \text{ раз}.$$

Побудуємо теоретичний спектр амплітуд (рис. 2.6).

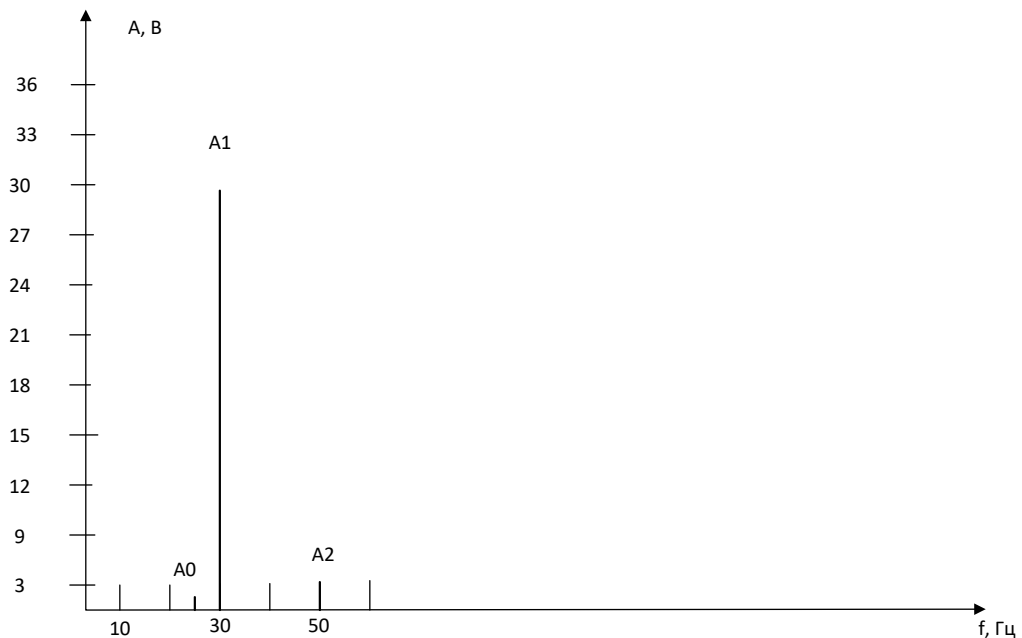


Рисунок 2.6 – Теоретичний спектр амплітуд

Переведемо амплітуду з В у децибели:

$$A_{0дБ} = 10 \lg \frac{A_0}{A_0} = 0 \text{ дБ};$$

$$A_{1дБ} = 10 \lg \frac{A_1}{A_0} = 10 \lg \frac{30}{2} = 10 \lg 15 = 11,76 \text{ дБ};$$

$$A_{2дБ} = 10 \lg \frac{A_2}{A_0} = 10 \lg \frac{4}{2} = 10 \lg 2 = 3,01 \text{ дБ}.$$

$$m_1 = 10^{0,1(A_1 - A_0)} = 10^{0,1 \cdot 11,76} = 10^{1,176} = 14,99 \text{ раз};$$

$$m_2 = 10^{0,1(A_2 - A_0)} = 10^{0,1 \cdot 3,01} = 10^{0,301} = 2 \text{ раз};$$

$$m_3 = 10^{0,1(A_1 - A_2)} = 10^{0,1 \cdot 8,75} = 10^{0,875} = 7,5 \text{ раз}.$$

Різниця в амплітуді і потужності окремих гармонік для теоретичних і практичних значень відрізняються.

Проведемо дослідження впливу розміру аналізованої ділянки сигналу на форму одержуваного спектра. Для цього проведемо моделювання з розмірами аналізованої ділянки сигналу в 1024, 2048 і 4096 відліків.

Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 1024 відліка (рис. 2.7).

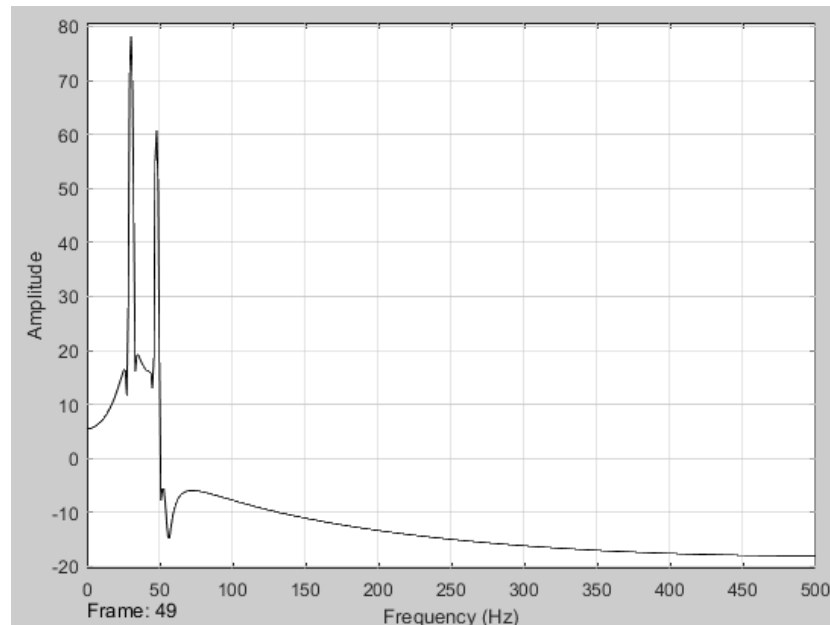


Рисунок 2.7 – Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 1024 відліка

Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 2048 відліків (рис. 2.8).

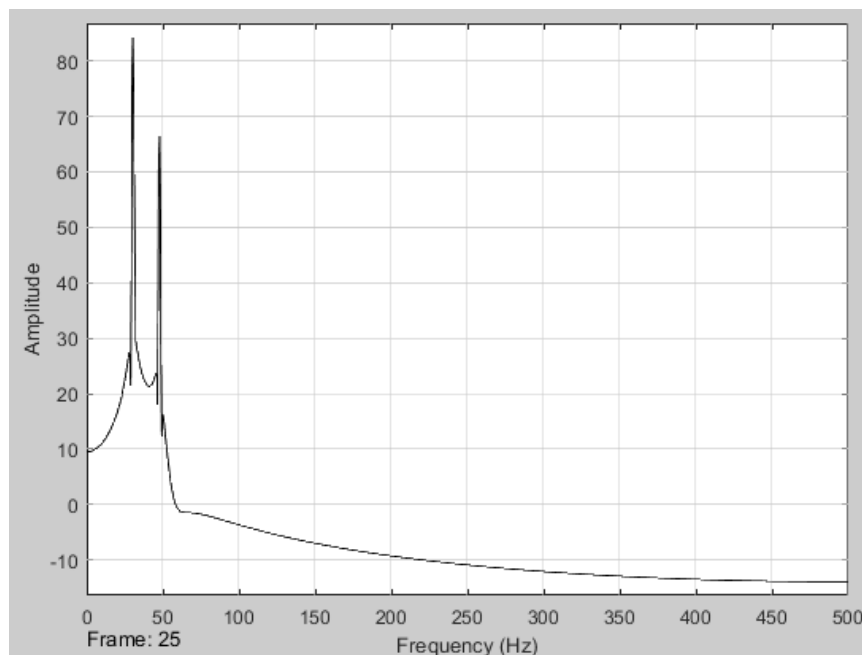


Рисунок 2.8 – Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 2048 відліка

Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 4096 відліків (рис. 2.9).

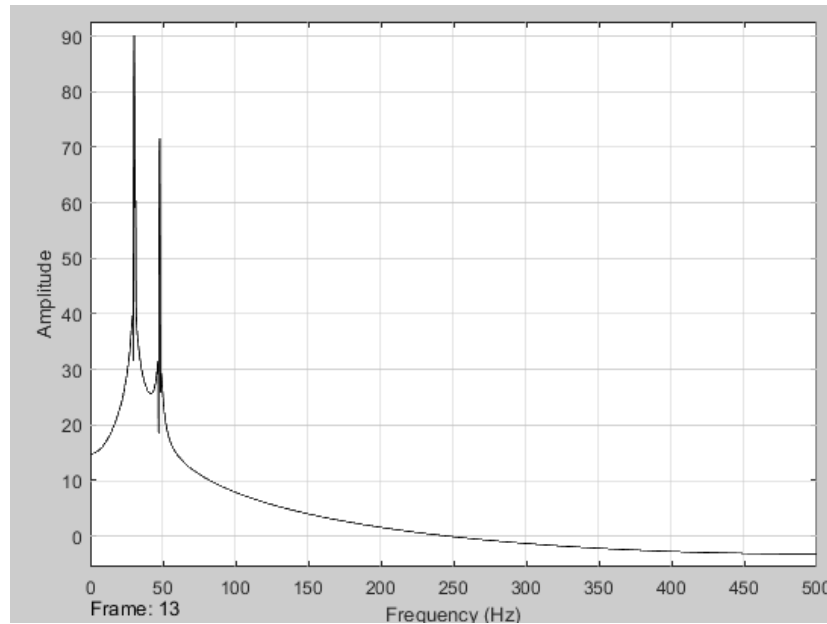


Рисунок 2.9 – Графік спектру сумарного сигналу при розмірі аналізуючого вікна в 4096 відліка

Розмір аналізуючої ділянки впливає на форму отриманого спектру таким чином, що при збільшенні розміру аналізуючої ділянки збільшуються вершини піків спектру, що призводить до важкості спектрального аналізу. При збільшенні ділянки в 2 рази помітний приріст вершин піків спектру, а при збільшенні аналізуючої ділянки в 4 рази, помітний стрімкий приріст піків. Також з'являються шуми.

Проведемо дослідження впливу типу вікна, що згладжує, на форму одержуваного спектра. Для цього проведемо моделювання з вікнами Ханна, Блекмена, Кайзера. Розмір аналізованої ділянки сигналу встановимо 2048 відліків (рис. 2.10).

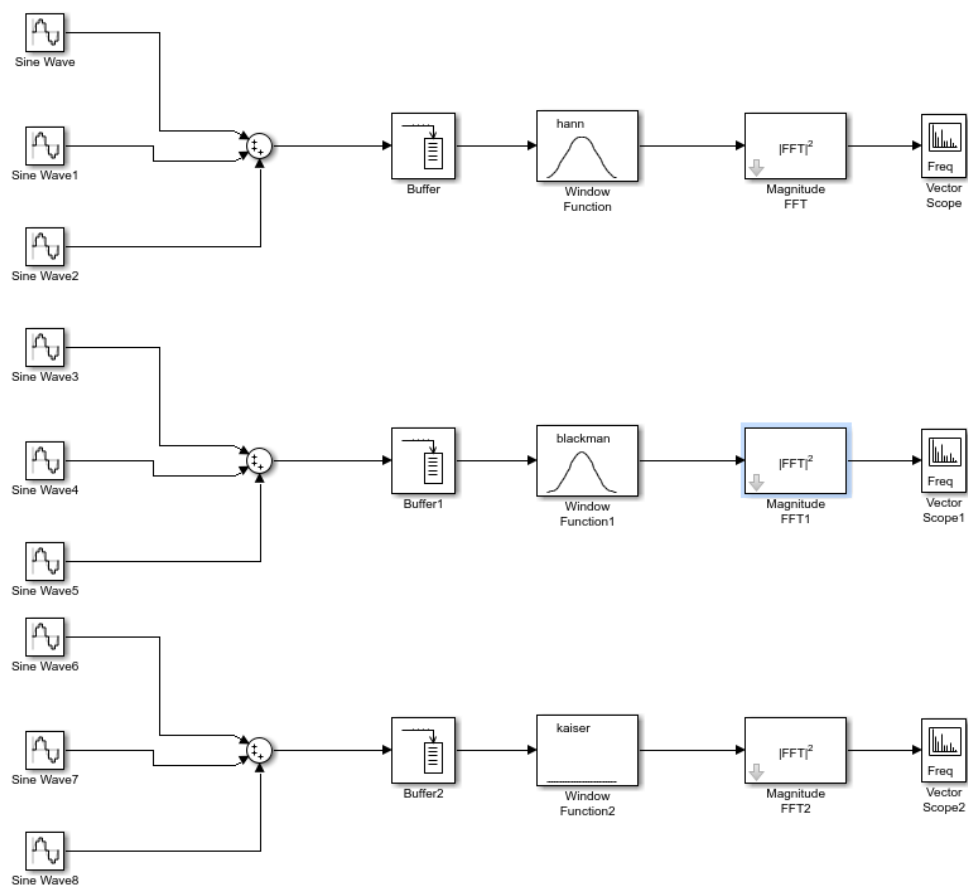


Рисунок 2.10 – Схема моделі дослідження впливу типу вікна, що згладжує, на форму одержуваного спектра

Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Ханна (рис. 2.11).

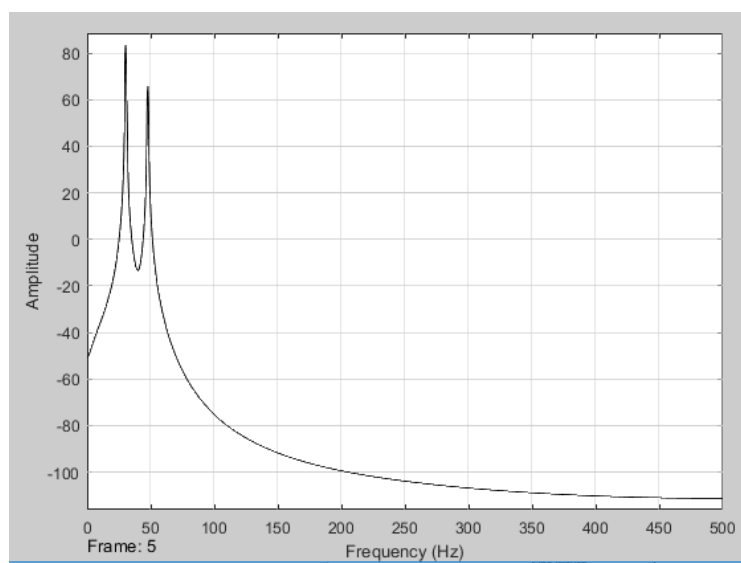


Рисунок 2.11 – Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Ханна

Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Блекмена (рис. 2.12).

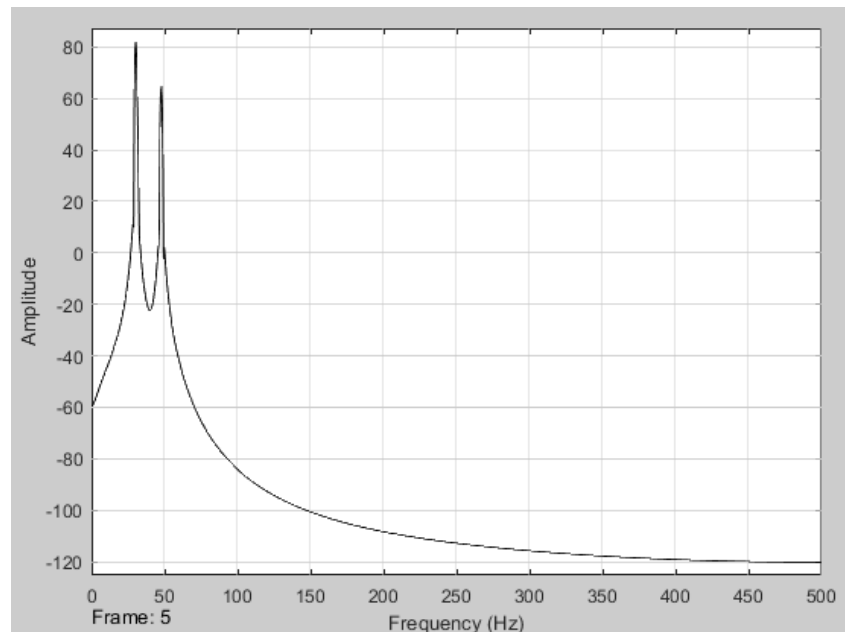


Рисунок 2.12 – Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Блекмена

Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Кайзера (рис. 2.13).

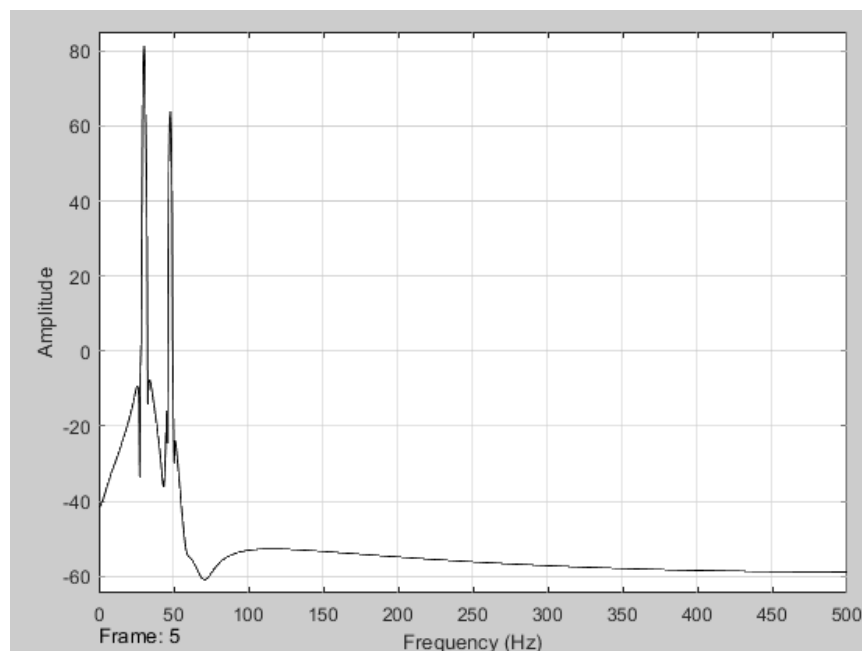


Рисунок 2.13 – Графік спектру сумарного сигналу з використанням вікна Кайзера

В даному випадку при використанні різних вікон отримали різний рівень розтікання. Так в першому і другому випадку маємо однаковий

рівень розтікання, хоча вікна Ханна і Блекмена мають різну знижуючу здатність рівня бокових пелюсток.

Проведемо моделювання без вікна, що згладжує (рис. 2.14).

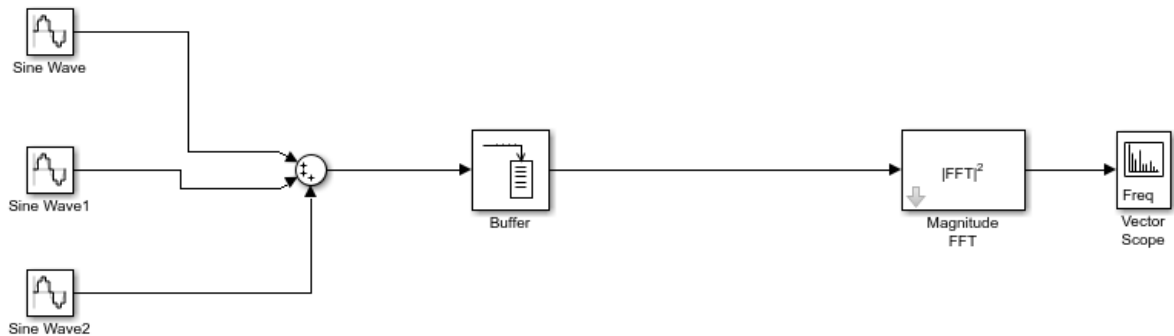


Рисунок 2.14 – Схема моделі моделювання без вікна, що згладжує

Графік спектру сумарного сигналу без використання згладжувальних вікон (рис. 2.15).

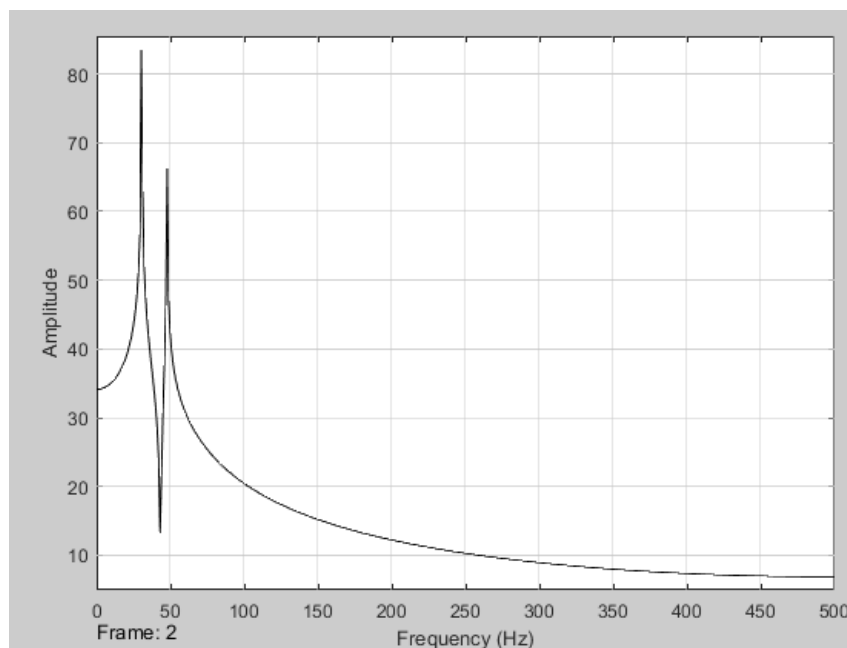


Рисунок 2.15 – Графік спектру сумарного сигналу без використання згладжувальних вікон

Згладжувальні вікна дуже ефективні при спектральному аналізі стаціонарних сигналів. Також без використання згладжувальних вікон не доступний сам спектральний аналіз, з'являється ефект розтікання, через що на графіку важко визначити склад вхідного сигналу.

Визначимо мінімально можливу частоту дискретизації даного сигналу.

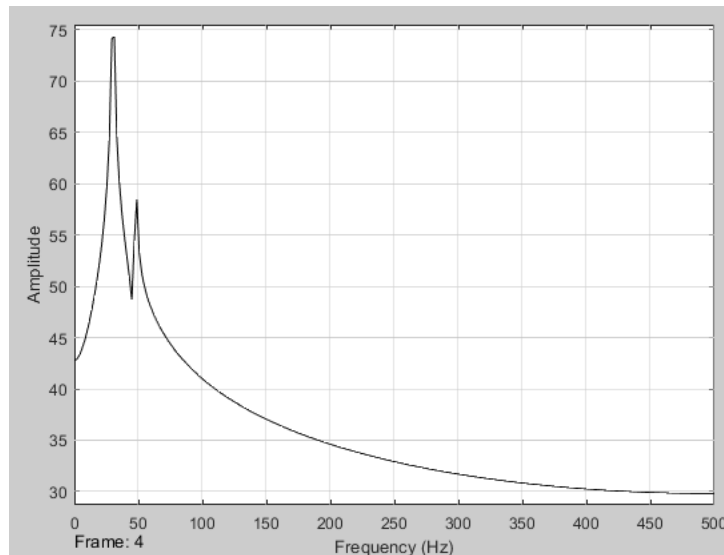


Рисунок 2.16 – Графік спектру сумарного сигналу

Даний сумарний полігармонічний сигнал побудовано при мінімально допустимій частоті дискретизації в 600. Так як в теорії частота дискретизації вхідного сигналу дорівнює 300. То за теоремою Котельнікова мінімально допустима частота дискретизації дорівнює $F_s = 2F_{\max} = 2 \cdot 300 = 600$.

Додамо в модель джерело шуму (рис. 2.17). Параметр Sample time (крок дискретизації) повинен мати таке ж значення, що в інших блоках моделі.

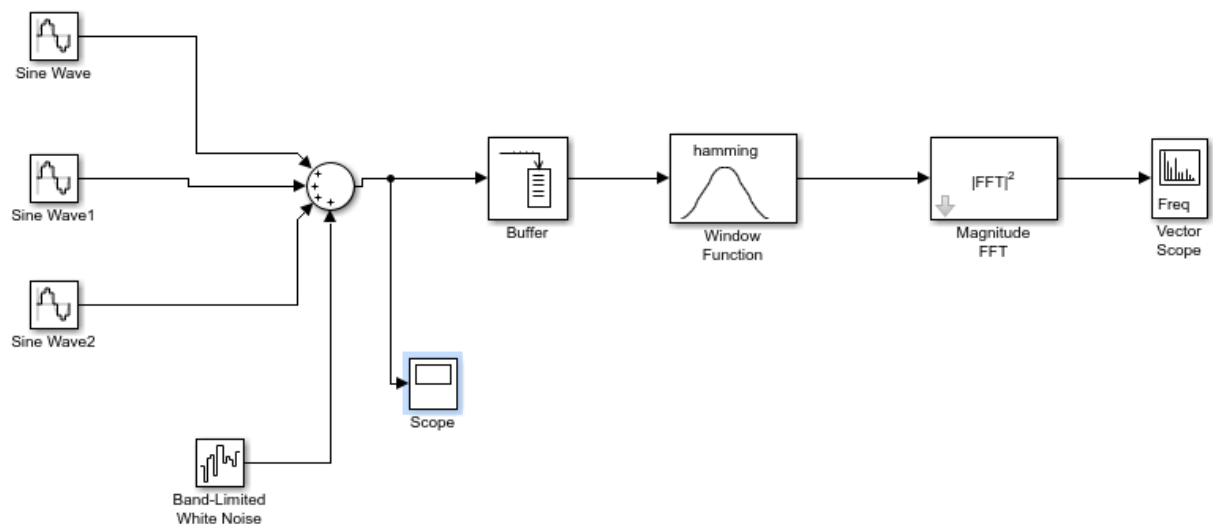


Рисунок 2.17 – Схема моделі з додаванням шуму

Отримуємо графік сигналу з додаванням шуму (рис. 2.18) та його спектр (рис. 2.19). Рівень білого шуму становить 0,1.

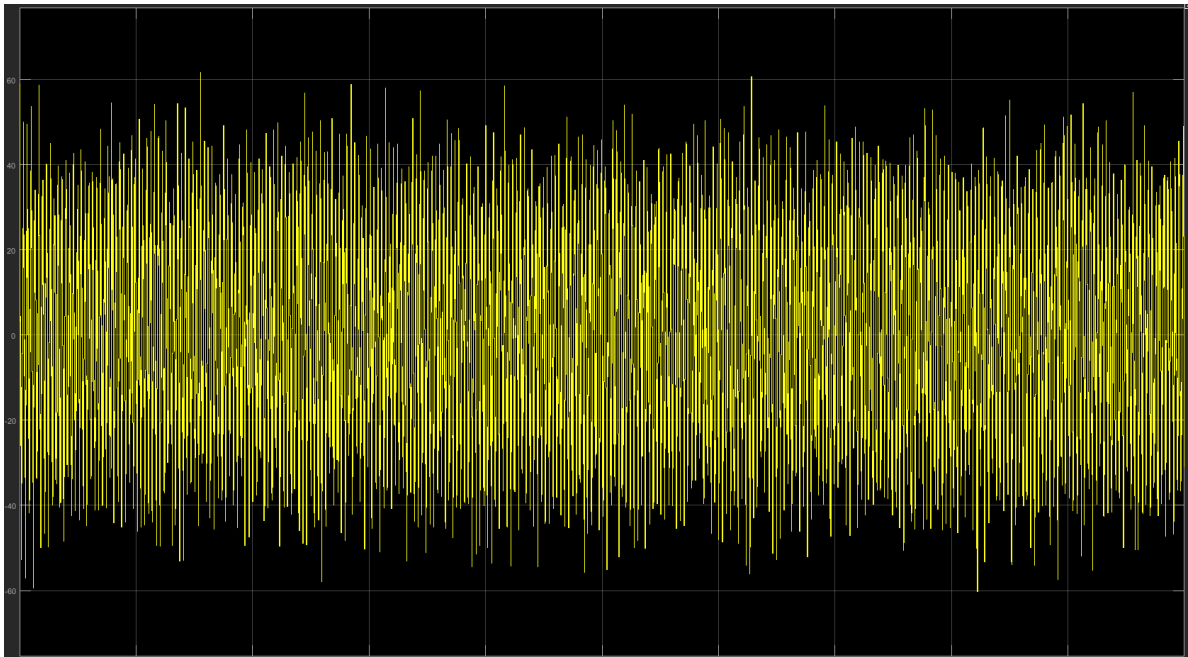


Рисунок 2.18 – Графік сигналу з додаванням шуму

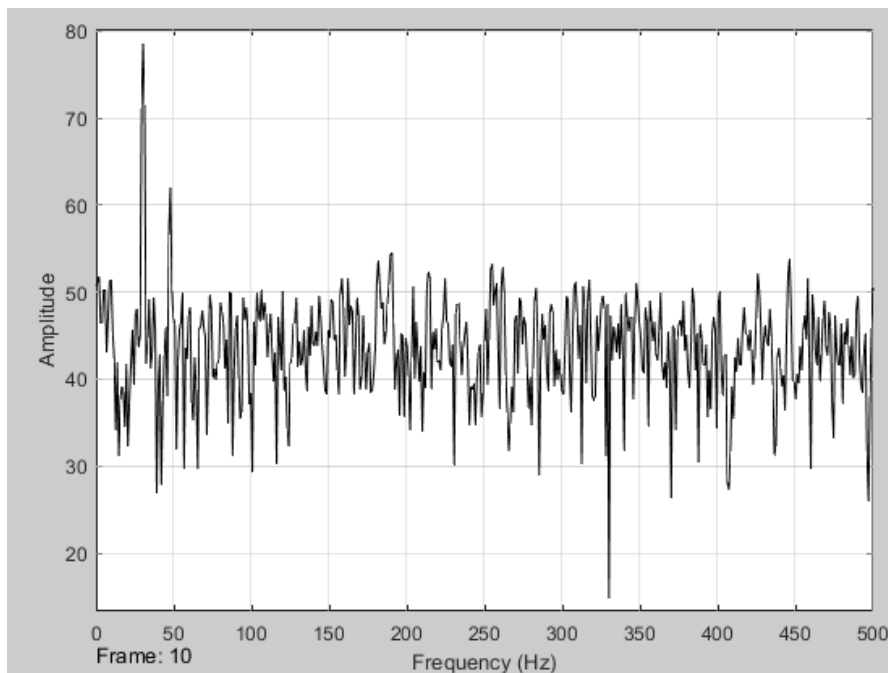


Рисунок 2.19 – Графік спектра сигналу з додаванням шуму

З графіку спектра чітко видно 3 піки синусоїд вхідного сигналу, а також бокові компоненти. Також видно, що при використанні згладжувального вікна Хемінга спектр розширився.

Змінимо потужність шуму у два рази й чотири рази. Проведемо порівняльний аналіз графіків часової реалізації й спектра сигналу, отриманих для різних налаштувань моделі.

Графік сигналу та його спектру, потужність шуму – 1 (рис. 2.20-2.21).

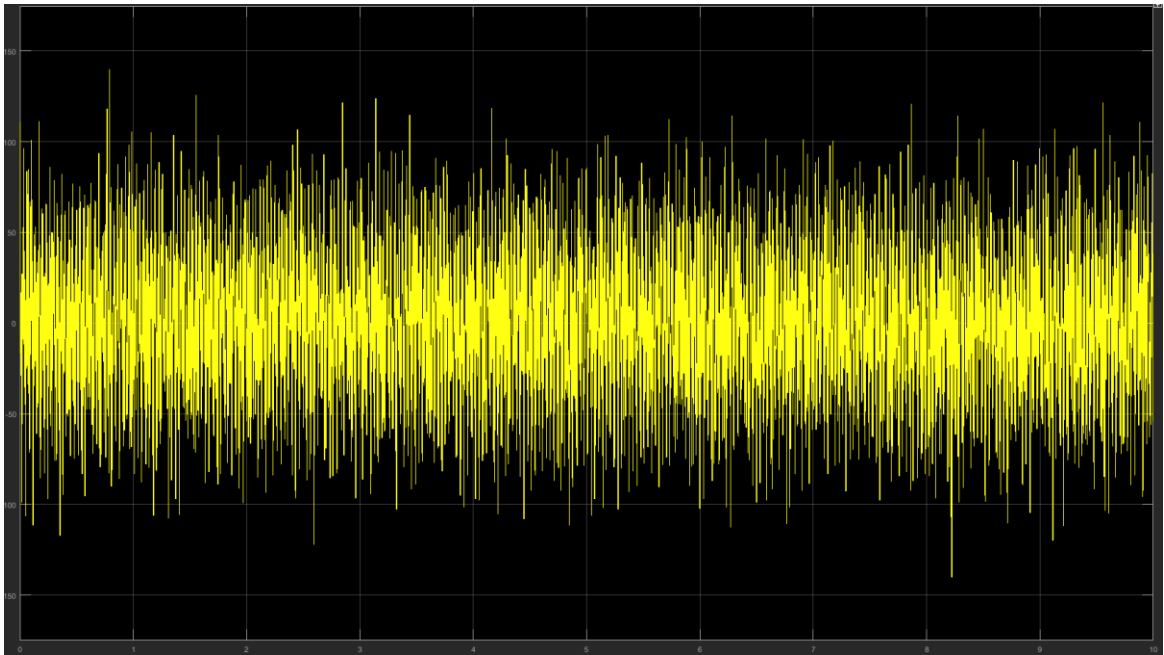


Рисунок 2.20 – Графік сигналу, потужність шуму – 1

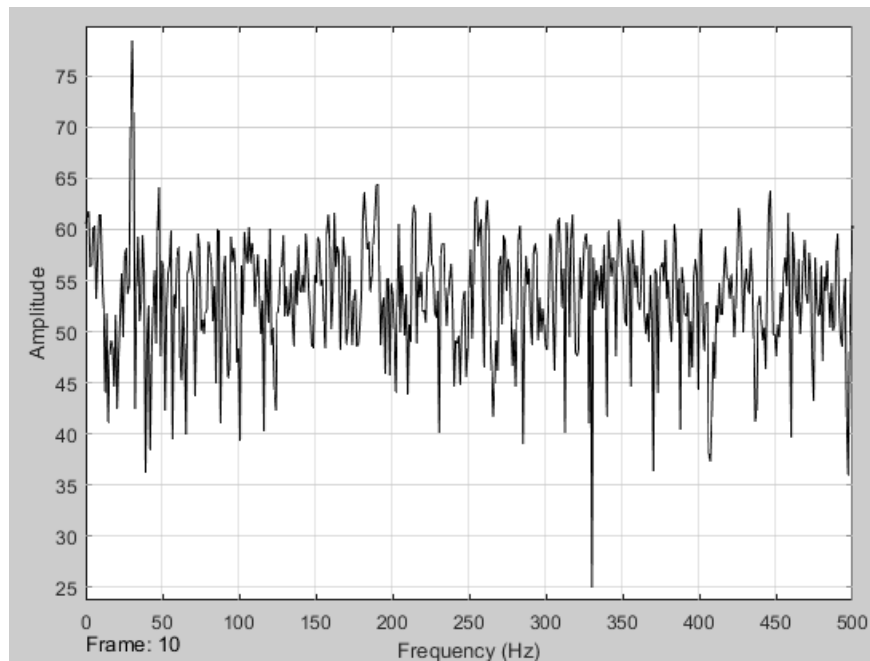


Рисунок 2.21 – Графік спектру сигналу, потужність шуму – 1

Графік сигналу та його спектру, потужність шуму – 4 (рис. 2.22-2.23).

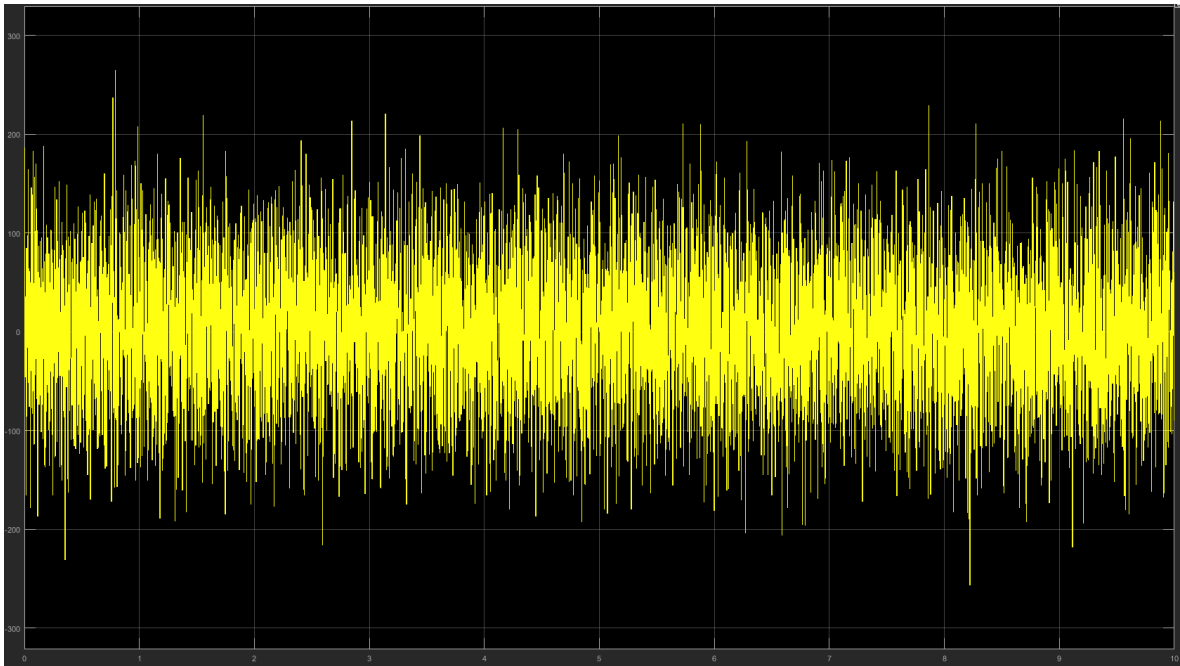


Рисунок 2.22 – Графік сигналу, потужність шуму – 4

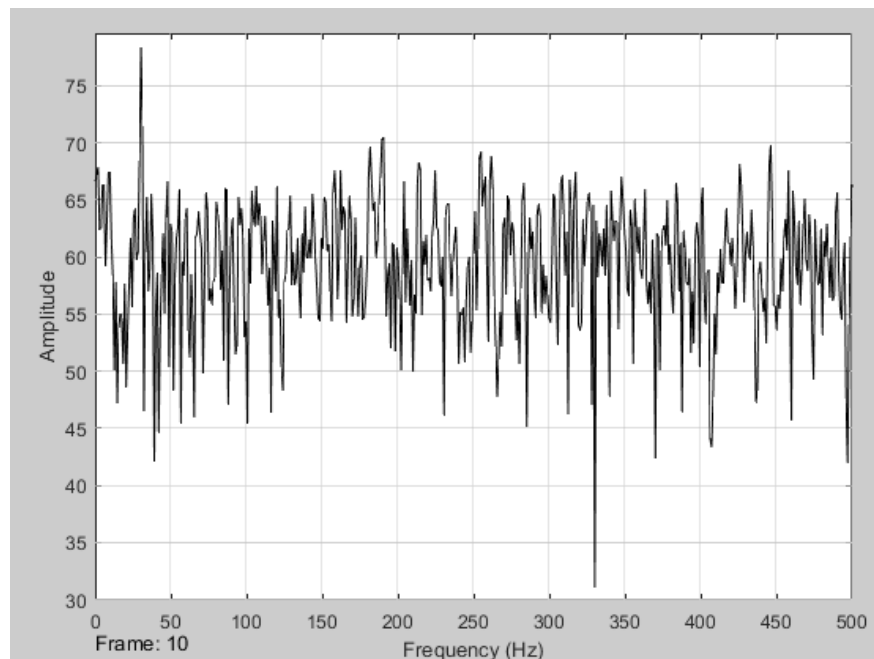


Рисунок 2.23 – Графік спектру сигналу, потужність шуму – 4

З отриманих графіків спектрів видно, що в полігармонічному сигналі збільшується ріст бокових компонент. При збільшенні рівня шуму в 2, 4 рази важко оцінити спектральний склад сигналу, так як вершини спектра зливаються з боковими компонентами, навіть з використанням згладжувального вікна.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.

3. Використовувані в аналітичних розрахунках формули з коментарями й результати розрахунків.

4. Висновки за результатами досліджень практичної роботи.

Контрольні питання

1. Розкрийте поняття ортогонального базису. Приведіть приклади.
2. Опишіть принципи розкладання сигналів у ряд Фур'є.
3. Опишіть суть прямого й зворотного перетворення Фур'є.
4. Опишіть властивості перетворення Фур'є.
5. Які різновиди спектрів сигналів існують? Як вони обчислюються?
6. Приведіть висновок рівності Парсеваля. Опишіть його фізичний зміст.
7. Опишіть принципи визначення спектра дискретизованого сигналу.
8. Опишіть суть дискретного перетворення Фур'є і його властивості.
9. Опишіть алгоритм використання функції ШПФ для побудови спектрів реальних сигналів.
10. Опишіть суть ефекту «розтікання» спектрів і способи боротьби з ним.
11. Дайте класифікацію вікон, що зважують, і опишіть їхні характеристики. Для чого вони використовуються?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [2], [3], [4], [7], [10].

3. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ І ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ У ПАКЕТІ SIMULINK

Мета роботи: вивчити методи синтезу й аналізу цифрових фільтрів, а також основи застосування цифрової фільтрації сигналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, MATLAB, Simulink.

Завдання:

1. Завантажити додаток FDATool (див. рис. 3.1) пакета MATLAB і ознайомитися з його можливостями й налаштуваннями. Даний додаток можна завантажити або набравши в командному вікні команду *fdatool*, або завантаживши відповідний блок бібліотеки *DSPblockset\Filtering\Filter design* пакета SIMULINK.

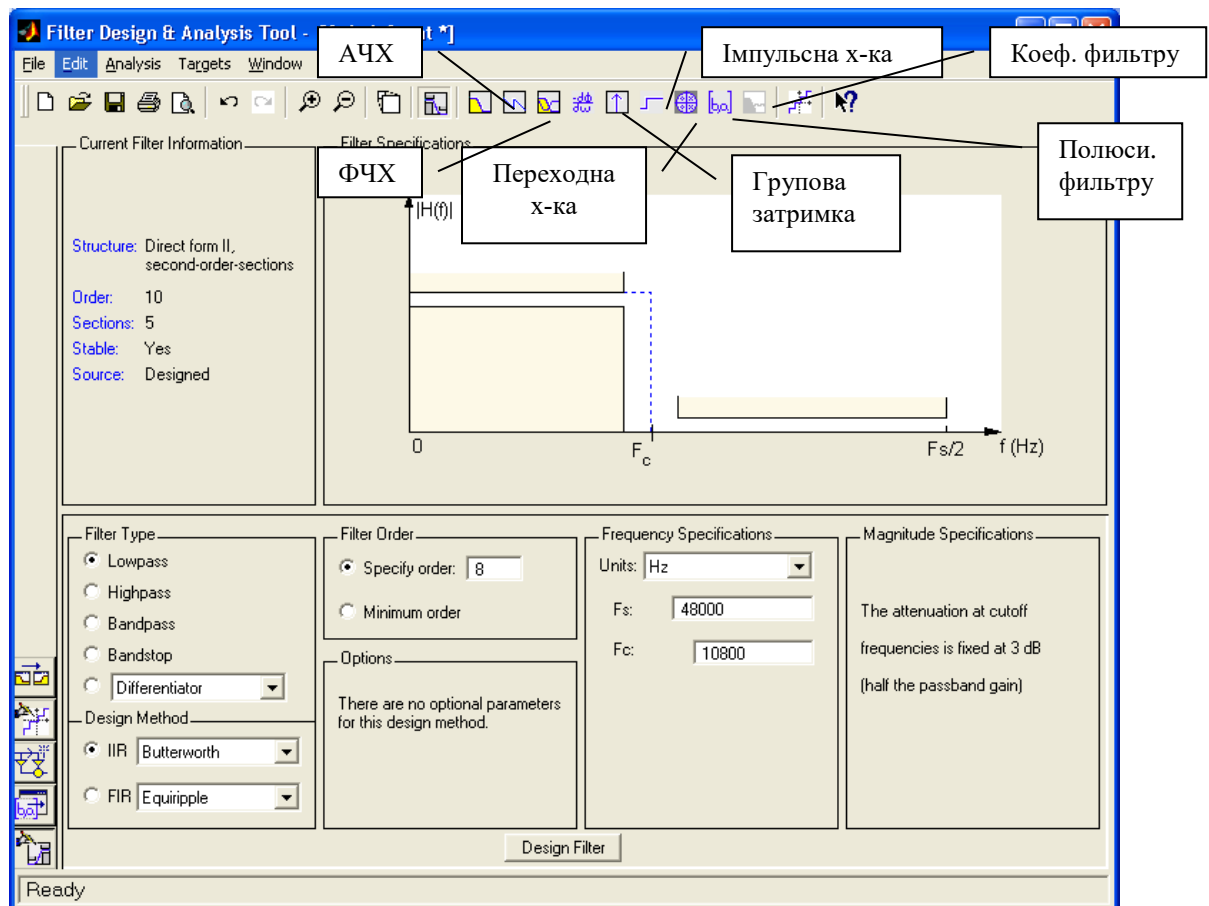


Рисунок 3.1 – Вікно додатка FDATool

2. Дослідити залежності форми АЧХ і ФЧХ фільтра від порядку (Filter Order). Використовувати порядки - 4, 6, 10. Тип фільтра й частоту зрізу (F_c) взяти відповідно до таблиці варіантів (див. табл. 3.1). Частота дискретизації (F_s) дорівнює 1000 Гц.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

№ варіанта	Характер фільтра	Тип фільтра	Порядок фільтра	Частота зрізу, Гц
1	ФНЧ	Баттерворта	5	$F_s/5$
2	ФВЧ	Чебишева 1	6	$F_s/5$
3	СФ	Чебишева 2	4	$F_s/3, F_s/4$
4	ЗФ	Баттерворта	8	$F_s/3, F_s/4$
5	ФНЧ	Чебишева 2	9	$F_s/4$
6	ФВЧ	Баттерворта	10	$F_s/4$
7	СФ	Еліптич.	11	$F_s/5, F_s/6$
8	ЗФ	Чебишева 1	6	$F_s/5, F_s/6$
9	ФНЧ	Баттерворта	6	$F_s/7$
10	ФВЧ	Чебишева 1	7	$F_s/7$
11	СФ	Чебишева 2	8	$F_s/6, F_s/7$
12	ЗФ	Еліптич	12	$F_s/6, F_s/7$
13	ФНЧ	Чебишева 2	10	$F_s/8$
14	ФВЧ	Баттерворта	11	$F_s/8$
15	СФ	Еліптич	4	$F_s/6, F_s/8$

* Позначення, прийняті в таблиці: ФВЧ - фільтр високих частот; ФНЧ - фільтр низьких частот; СФ - смуговий фільтр; ЗФ - загороджувальний фільтр; F_s - частота дискретизації.

3. Отримати аналітичний опис комплексного коефіцієнта передачі фільтра. Для цього використати інформацію про нулі й полюси даного фільтра.

4. Навести формулу алгоритму реалізації даного фільтра. Для цього використовувати інформацію про коефіцієнти фільтра.

5. Побудувати імпульсну й перехідну характеристики, а також графік групової затримки заданого фільтра. Проаналізувати дані характеристики й описати їхнє фізичне значення.

6. Дослідити залежність виду АЧХ і ФЧХ від типу фільтра (Баттерворта, Чебишева 1 роду, Чебишева 2 роду, еліптичний). Описати особливості й сферу застосування кожного типу фільтра. При дослідженні використати фільтри одного порядку.

7. У пакеті SIMULINK зібрати схему представлену на рис. 2.2. За допомогою її генерується модель зашумленого полігармонійного (інформаційного) сигналу з практичної роботи №2. Установити параметр *Sample time* відповідно до заданої частоти дискретизації.

8. За допомогою засобу Fdatool синтезувати систему фільтрів, погоджену з інформаційним сигналом (див. рис. 3.2). Таким чином метою системи фільтрів придушення широкосмугового шуму при низовині характеристик інформаційного сигналу. Провести моделювання й оцінити його якість.

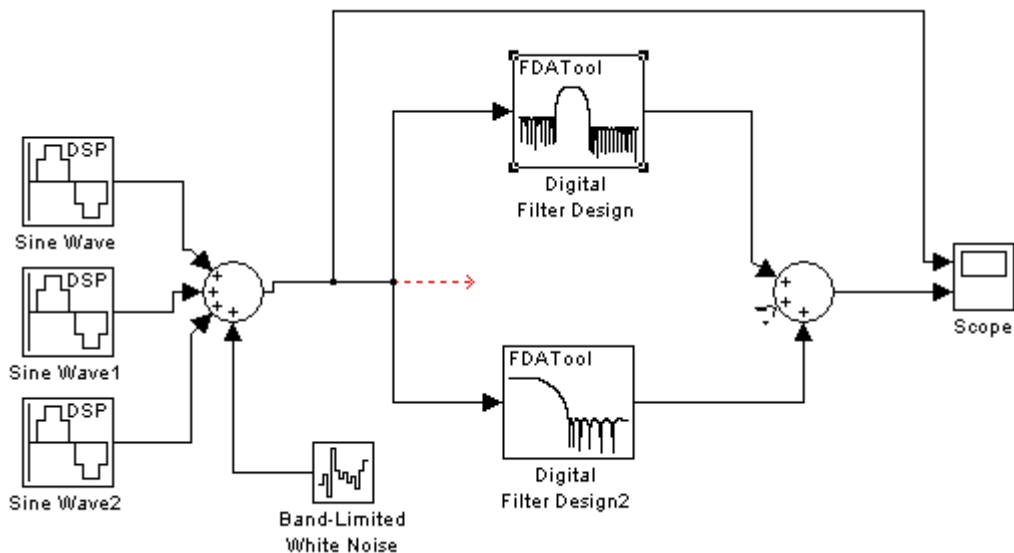


Рисунок 3.2 – Схема моделі з інформаційним сигналом

9. Порівняти графіки часових реалізацій і спектрів сигналів до фільтрації й після фільтрації. Для одержання спектрів можна використовувати моделі другої практичної роботи.

10. Замість однієї із синусоїд поставити генератор пилоподібних (для парних варіантів) або прямокутних (для непарних варіантів) імпульсів тієї ж частоти й повторити пункти 8 і 9.

11. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Дослідимо залежності форми АЧХ і ФЧХ фільтра від порядку (Filter Order). Використовуємо порядок фільтра - 8. Тип фільтра – ЗФ, частота зрізу $F_c = F_s/3$, $F_s/4$. Частота дискретизації $F_s = 1000$ Гц.

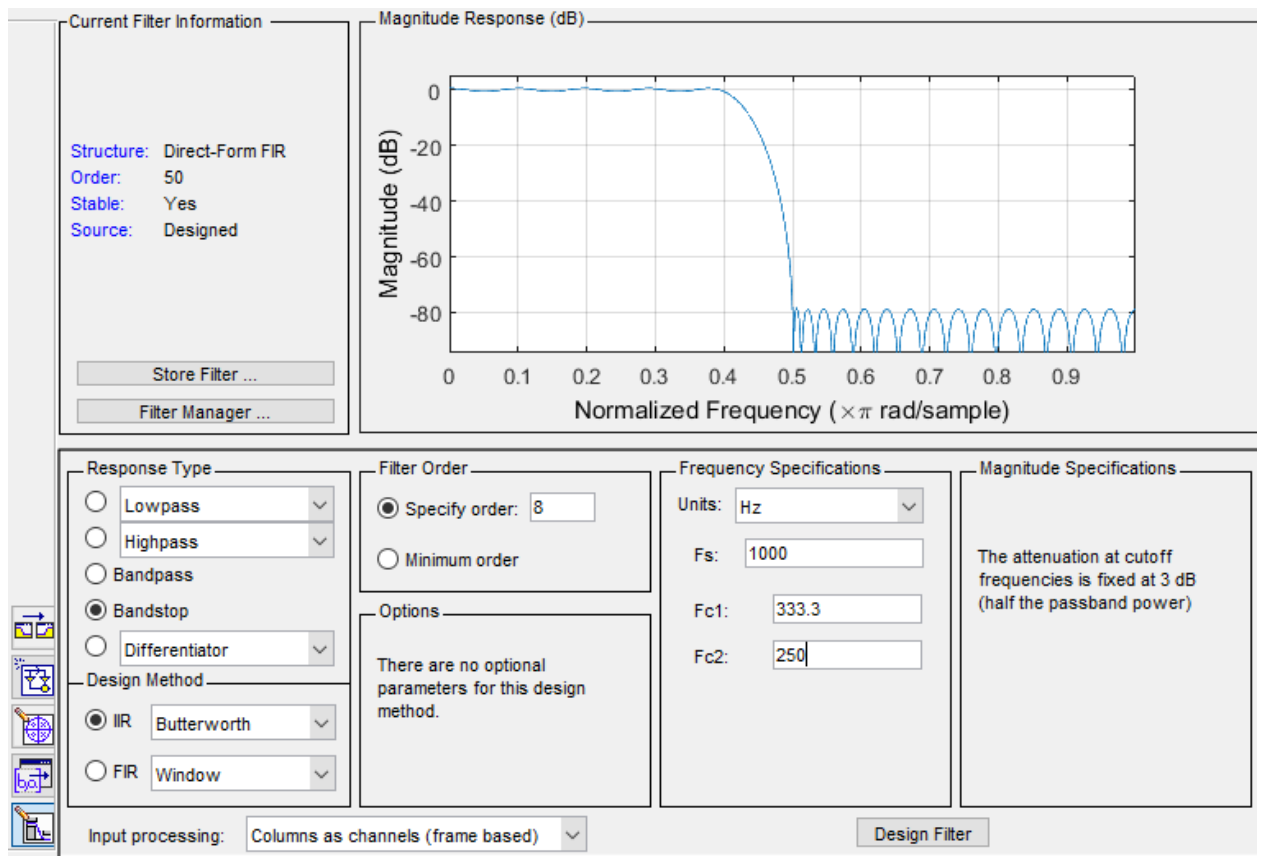


Рисунок 3.3 – АЧХ фільтру, порядок 8

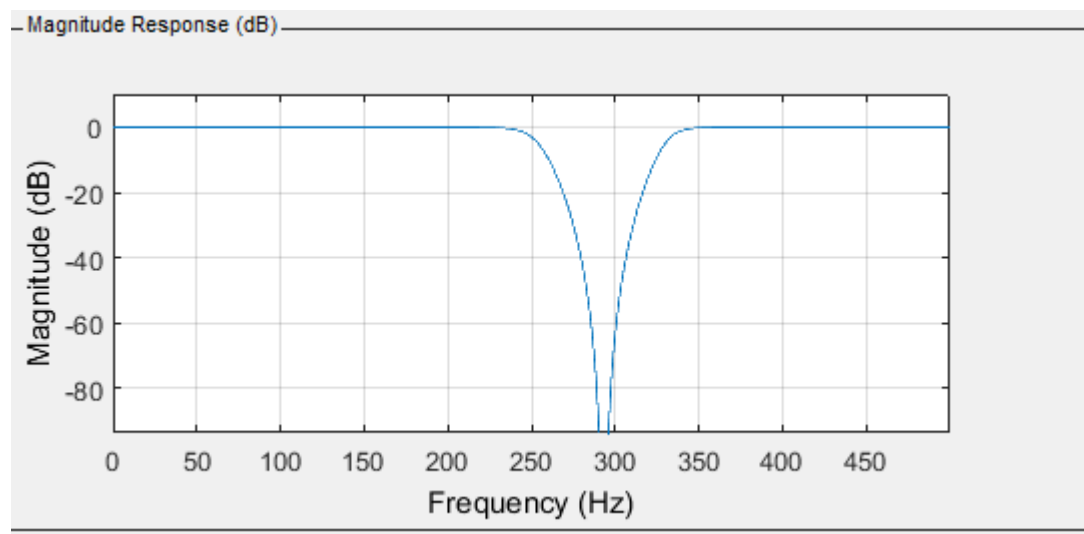


Рисунок 3.4 – ФЧХ фільтру, порядок 8

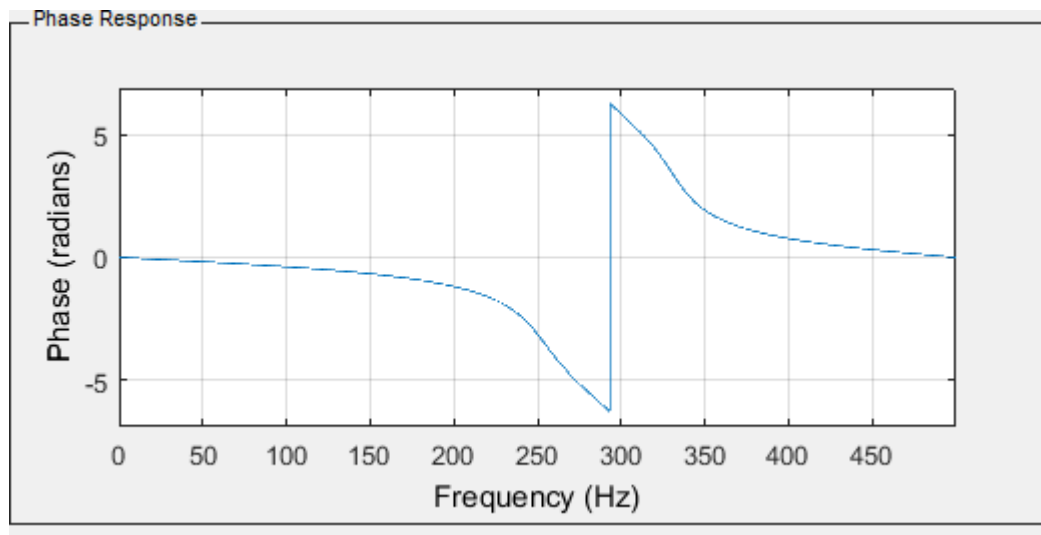


Рисунок 3.5 – АЧХ фільтру, порядок 4

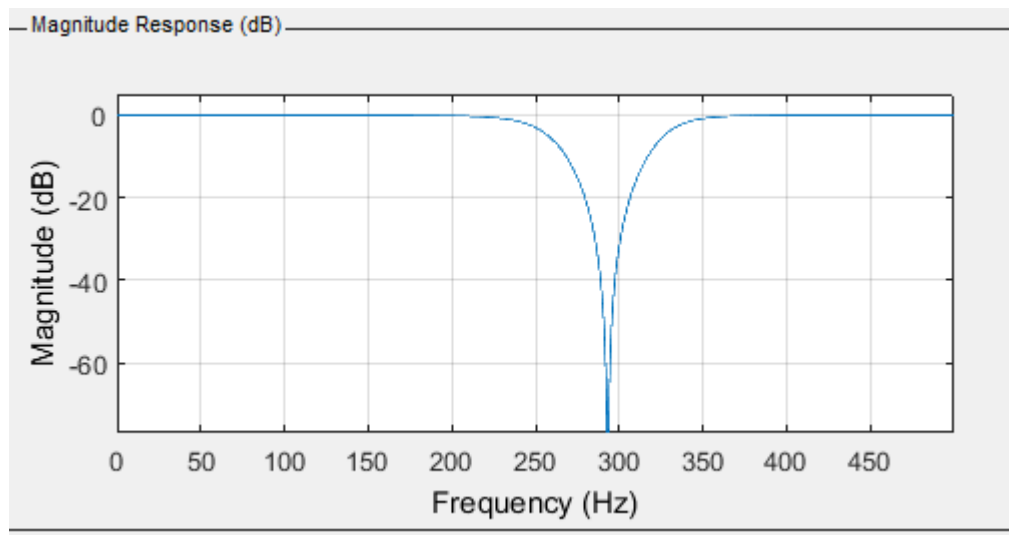


Рисунок 3.6 – ФЧХ фільтру, порядок 4

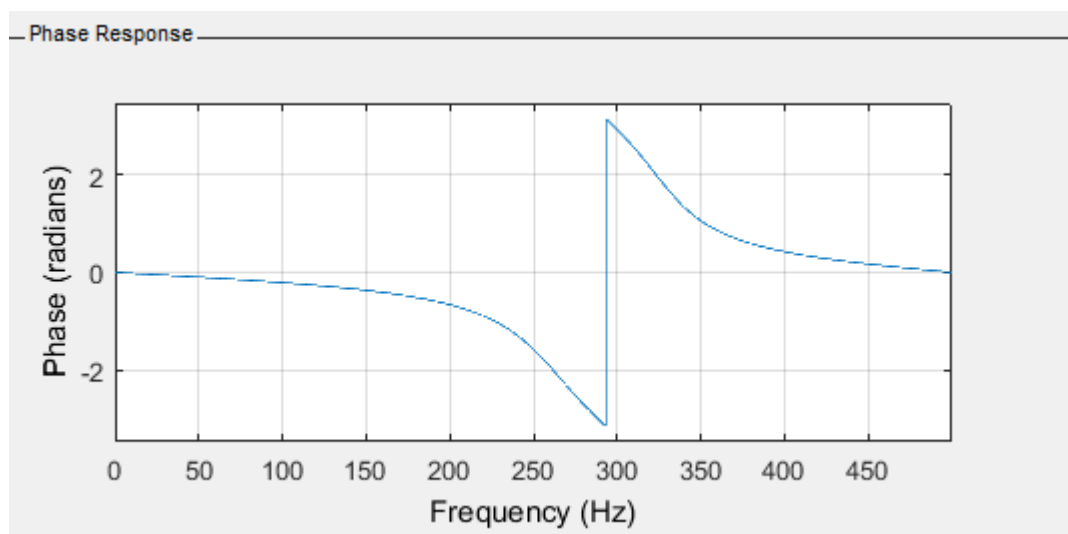


Рисунок 3.7 – АЧХ фільтру, порядок 6

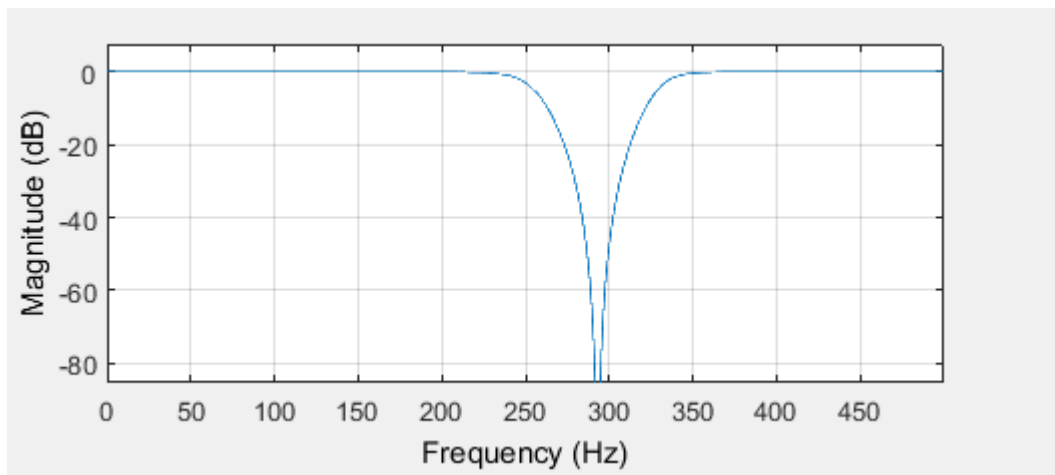


Рисунок 3.8 – ФЧХ фільтру, порядок 6

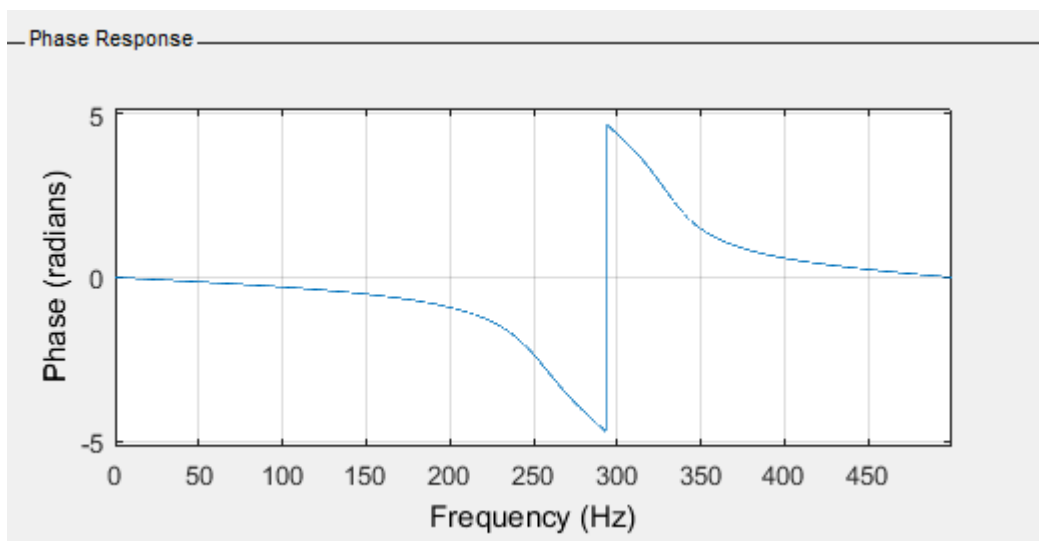


Рисунок 3.9 – АЧХ фільтру, порядок 10

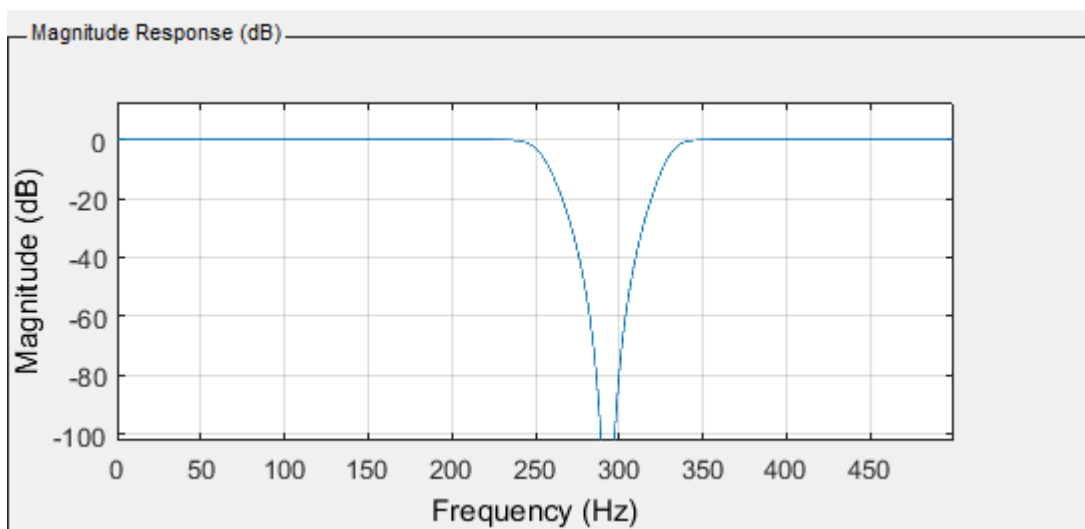


Рисунок 3.10 – ФЧХ фільтру, порядок 10

Отримавши графіки АЧХ і ФЧХ в залежності від порядку фільтру, можна зробити висновок, що при збільшенні порядку фільтру зростає амплітудний і фазовий зсув.

Отримаємо аналітичний опис комплексного коефіцієнта передачі фільтра. Для цього використовуємо інформацію про нулі й полюси даного фільтра.

Нулі і полюси фільтру (рис. 3.11).

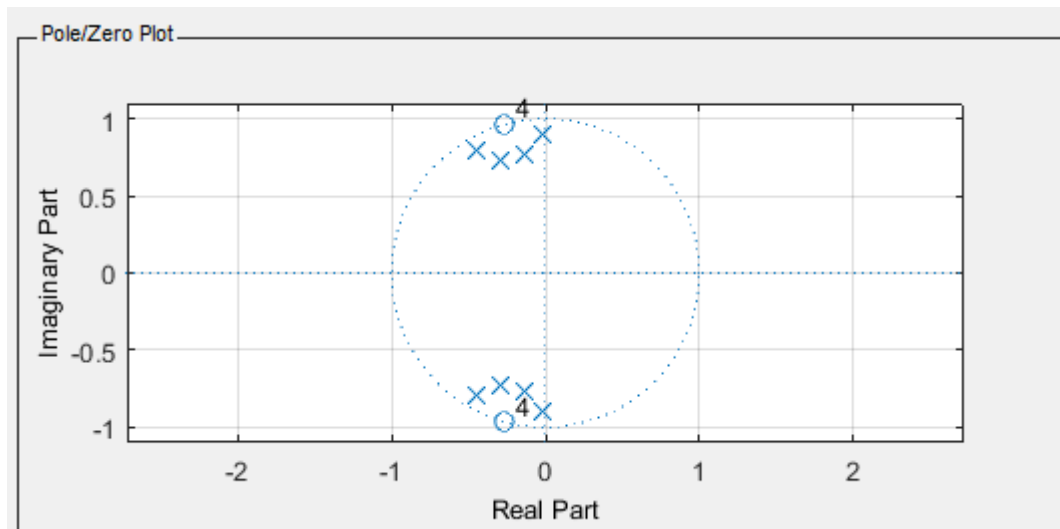


Рисунок 3.11 – Нулі і полюси фільтру

Наведемо формулу алгоритму реалізації даного фільтра. Для цього використовуємо інформацію про коефіцієнти фільтра (рис. 3.12).

```

=====
Section #1
-----
Numerator:
1
0.5356739145694378
1
Denominator:
1
0.89049119595884108
0.83476158548738533
Gain:
0.88501460915077357

Section #2
-----
Numerator:
1
0.5356739145694378
1
Denominator:
1
0.03465144316782437
0.81325888922845058
Gain:
0.88501460915077357
=====

```

Section #3	

Numerator:	
1	
0.5356739145694378	
1	
Denominator:	
1	
0.5922619543072305	
0.61612095693172375	
Gain:	
0.79894358703266866	

Section #4	

Numerator:	
1	
0.5356739145694378	
1	
Denominator:	
1	
0.26080977987514309	
0.59761359021670335	
Gain:	
0.79894358703266866	

Рисунок 3.12 – Коефіцієнти фільтра

Побудуємо імпульсну й перехідну характеристики, а також графік групової затримки заданого фільтра. Проаналізуємо дані характеристики й опишемо їхнє фізичне значення.

Імпульсна характеристика – це реакція фільтра на дельта функцію (рис. 3.13).

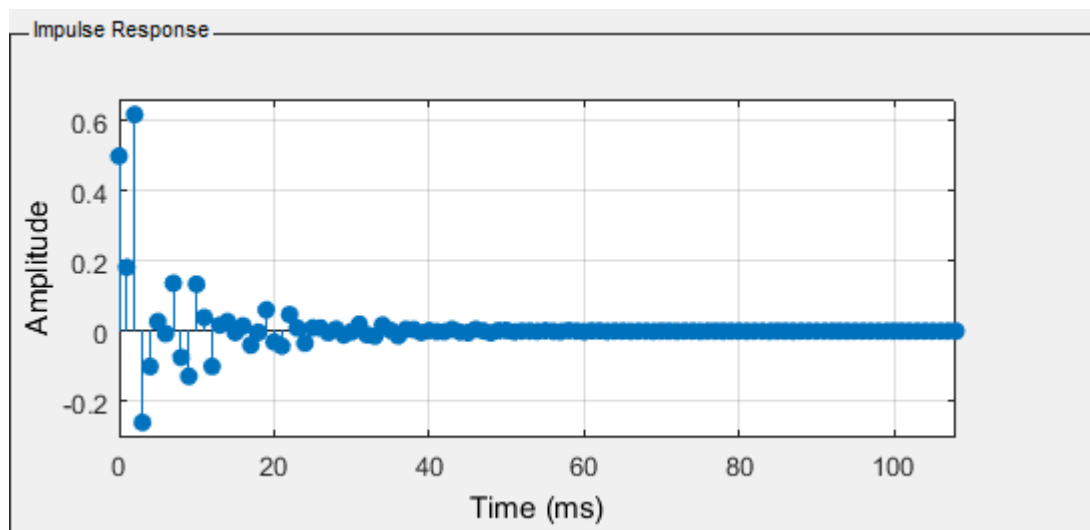


Рисунок 3.13 – Імпульсна характеристика

Перехідна характеристика – це реакція фільтра на заданий ступеневий вплив (рис. 3.14).

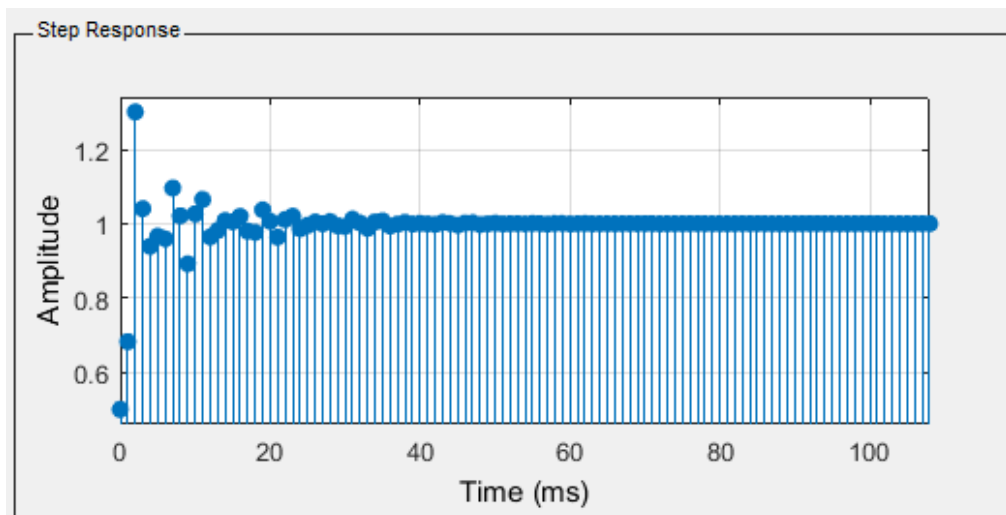


Рисунок 3.14 – Перехідна характеристика

Групова затримка – це затримка, що огинає вузькочастотний сигнал з середньою частотою (рис. 3.15).

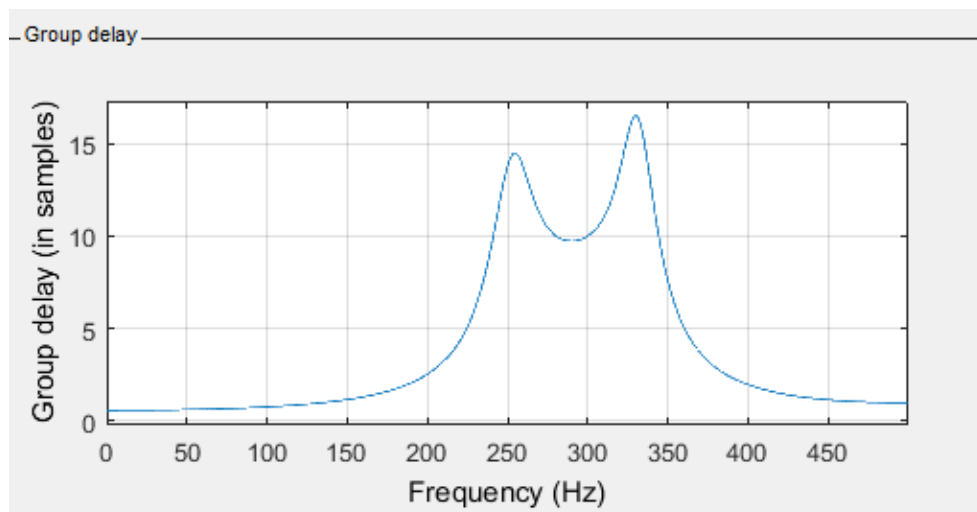


Рисунок 3.15 – Групова затримка

Дослідимо залежність виду АЧХ і ФЧХ від типу фільтра (Баттерворта, Чебишева 1 роду, Чебишева 2 роду, еліптичний), їх особливості й сферу застосування кожного типу фільтра. При дослідженні використовуємо фільтри одного порядку.

АЧХ і ФЧХ фільтра Баттерворта (рис. 3.16).

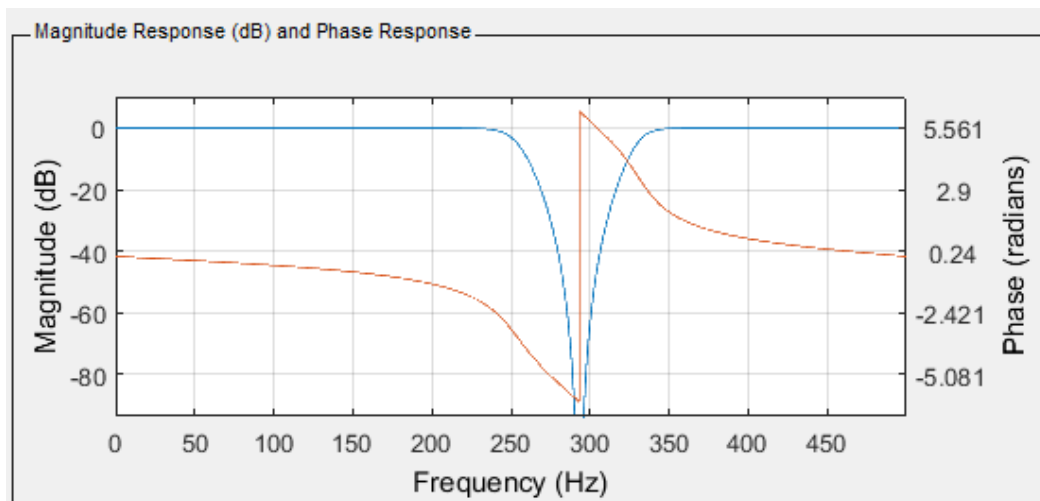


Рисунок 3.16 – АЧХ і ФЧХ фільтра Баттєворта

АЧХ і ФЧХ фільтра Чебишева 1 роду (рис. 3.17).

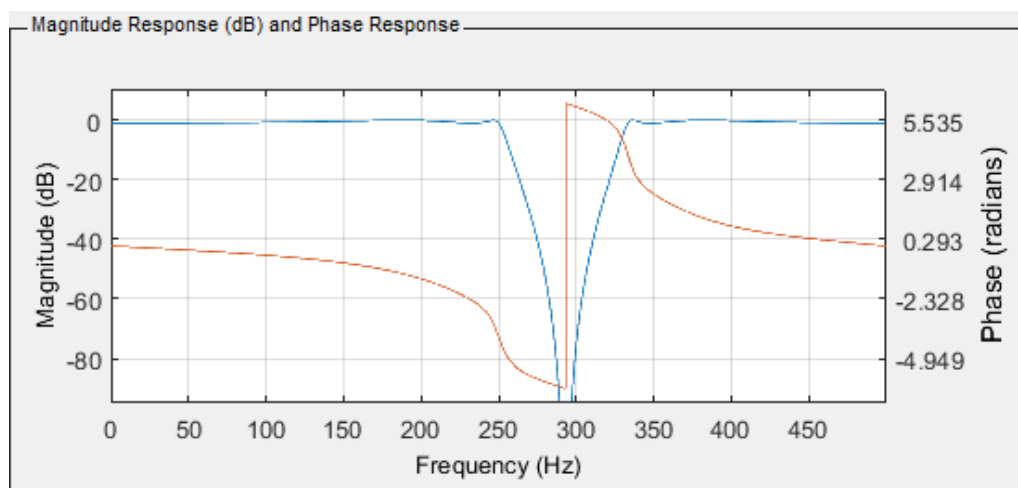


Рисунок 3.17 – АЧХ і ФЧХ фільтра Чебишева 1 роду

АЧХ і ФЧХ фільтра Чебишева 2 роду (рис. 3.18).

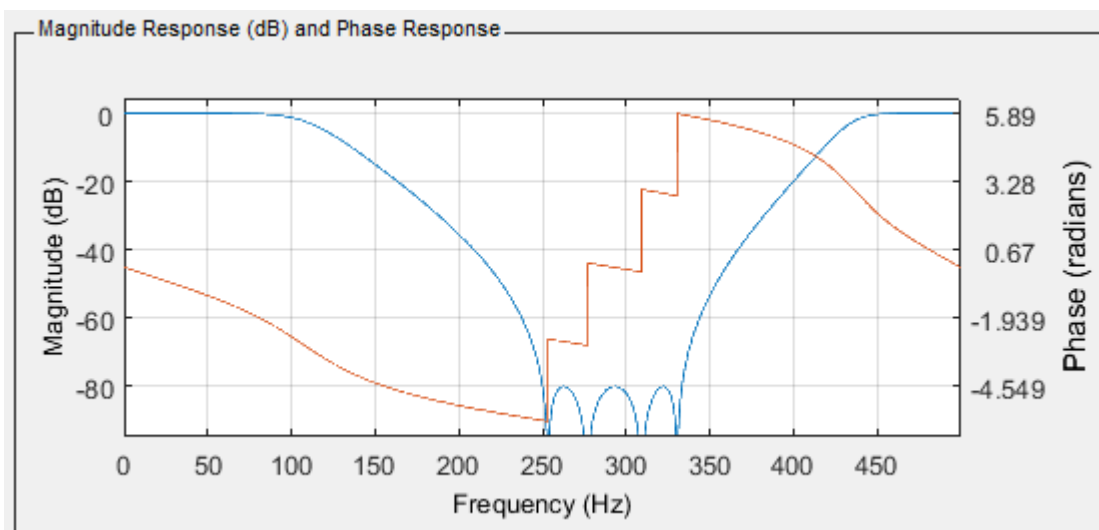


Рисунок 3.18 – АЧХ і ФЧХ фільтра Чебишева 2 роду

АЧХ і ФЧХ еліптичного фільтра (рис. 3.19).

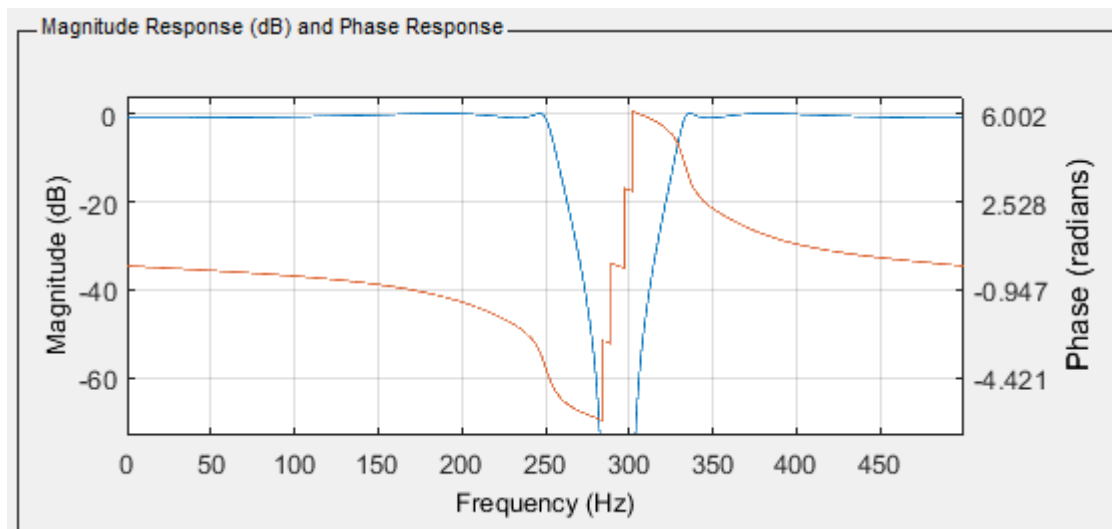


Рисунок 3.19 – АЧХ і ФЧХ еліптичного фільтра

Виконавши порівняння всіх трьох типів фільтрів, можна зробити висновок, фільтр Чебишева 2 роду має спотворення в смузі пропускання, але не має пульсацій в смузі загородження. Еліптичний фільтр має пульсації в смузі пропускання. Фільтр Батерворта має довготривалу затримку.

У пакеті SIMULINK збирається схема, за допомогою якої генерується модель зашумленого полігармонійного (інформаційного) сигналу з практичної роботи №2. Параметри наступні: $A_1=30$ В, $f_1=190$ Гц, $A_2=2$ В, $f_2=195$ Гц, $A_3=4$ В, $f_3=300$ Гц, Sample time=1/1000.

За допомогою засобу FDatool синтезуємо систему фільтрів, погоджену з інформаційним сигналом. Таким чином метою системи фільтрів придушення широкосмугового шуму при низовині характеристик інформаційного сигналу (рис. 3.20). Проведемо моделювання й оцінимо його якість.

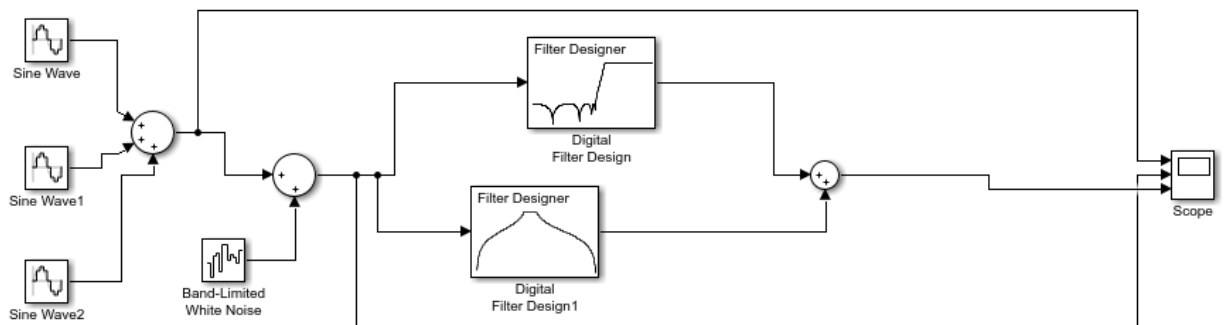


Рисунок 3.20 – Схема досліджуваної моделі

Графіки часових реалізацій (рис. 3.21).

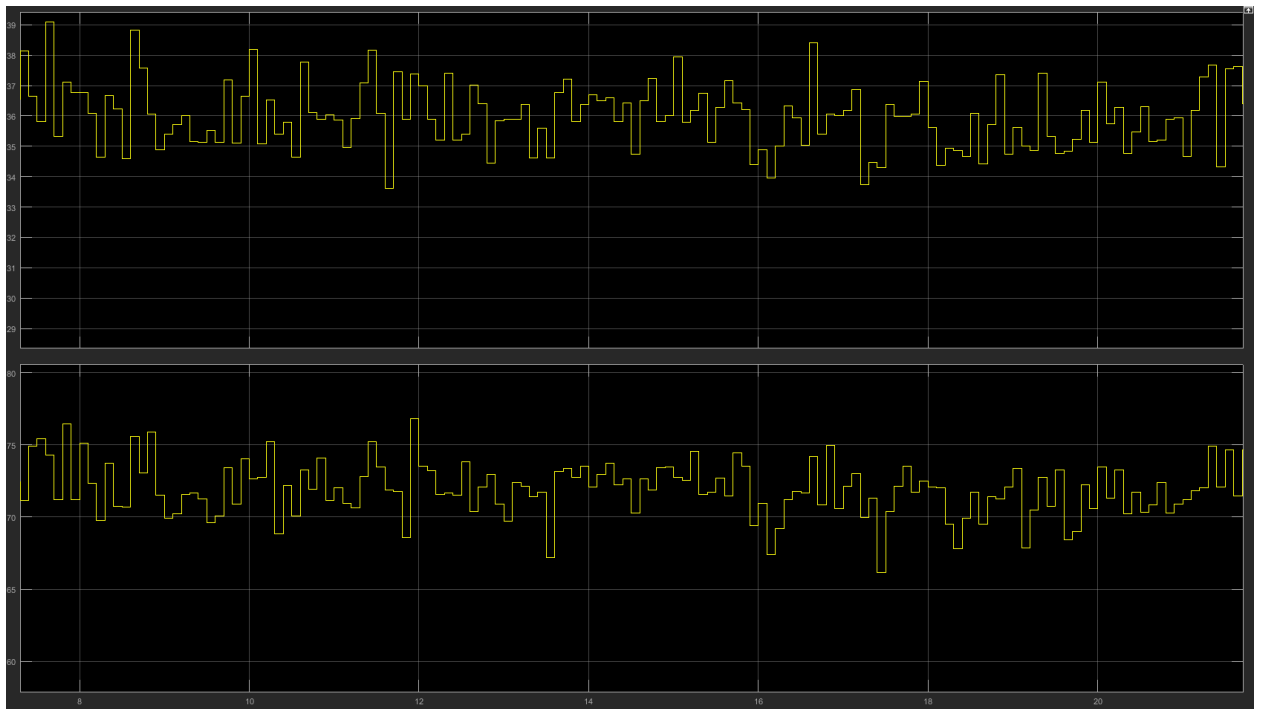


Рисунок 3.21 – Графіки часових реалізацій

Для отримання графіків спектрів сигналів до фільтрації й після фільтрації застосовуємо наступну схему (рис. 3.22).

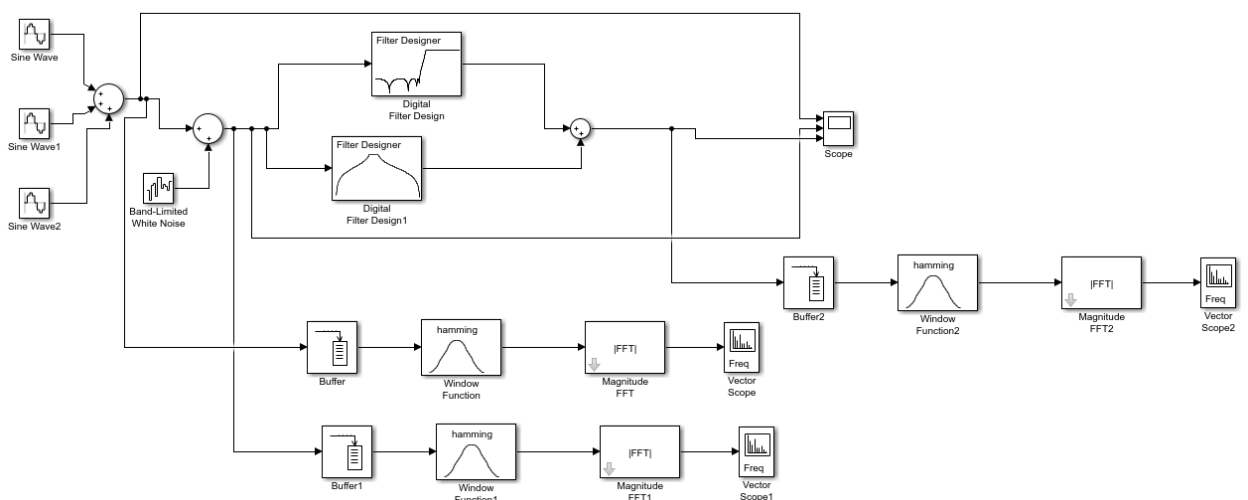


Рисунок 3.22 – Схема досліджуваної моделі

На рис. 3.23-3.25 представлено спектри сигналів без шуму, до та після фільтрації.

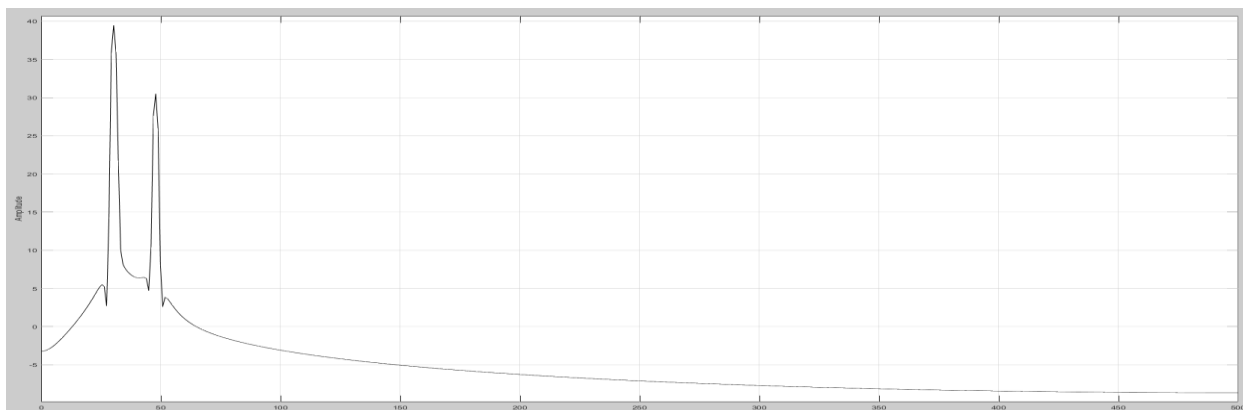


Рисунок 3.23 – Спектр амплітуд сигналу без шуму

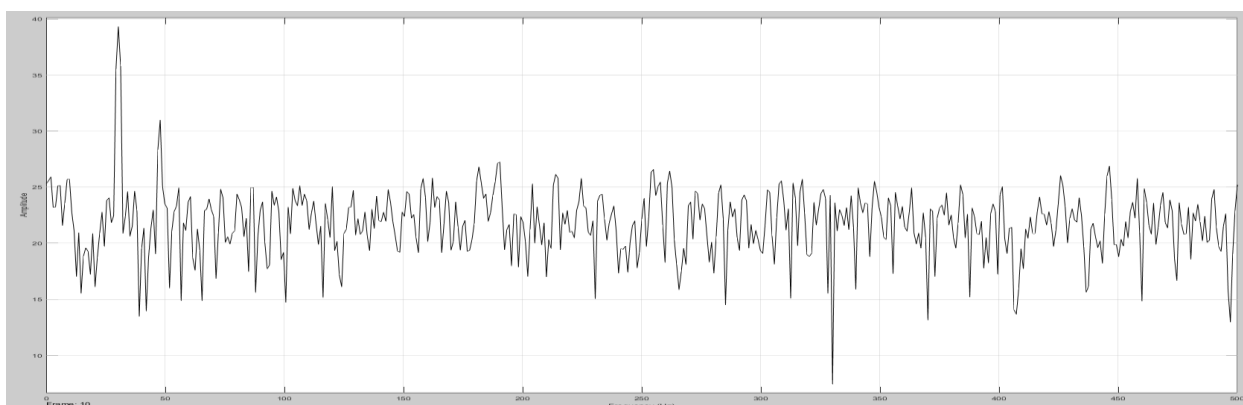


Рисунок 3.24 – Спектр амплітуд сигналу с шумом до фільтрації

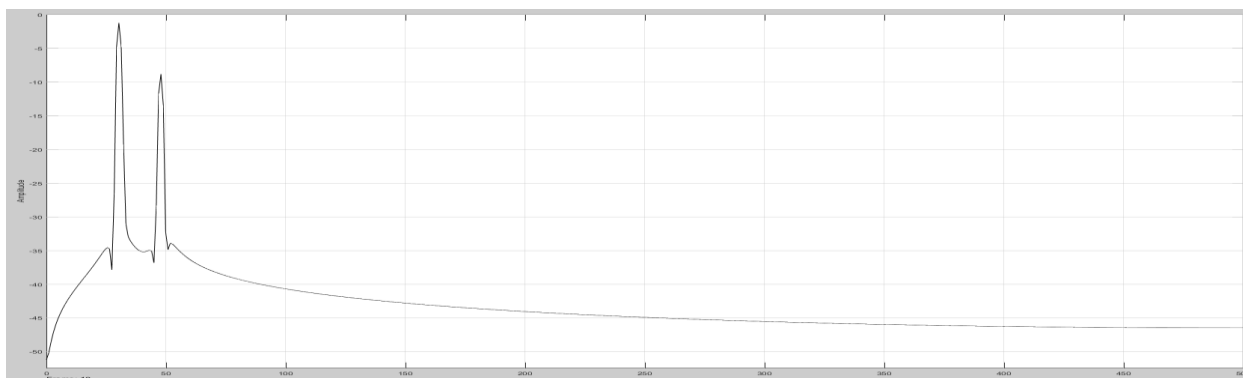


Рисунок 3.25 – Спектр амплітуд сигналу с шумом після фільтрації

Порівнявши графіки спектрів полігармонічного сигналу без шуму, з шумом до фільтрації та після фільтрації, можна зробити висновок, що правильно синтезована система фільтрів дозволяє подавити шум, що вносить спотворення.

Замість однієї із синусоїд поставимо генератор пилкоподібних імпульсів тієї ж частоти (рис. 3.26).

На рис. 3.27-3.29 представлено спектри сигналів без шуму, до та після фільтрації для заданої моделі.

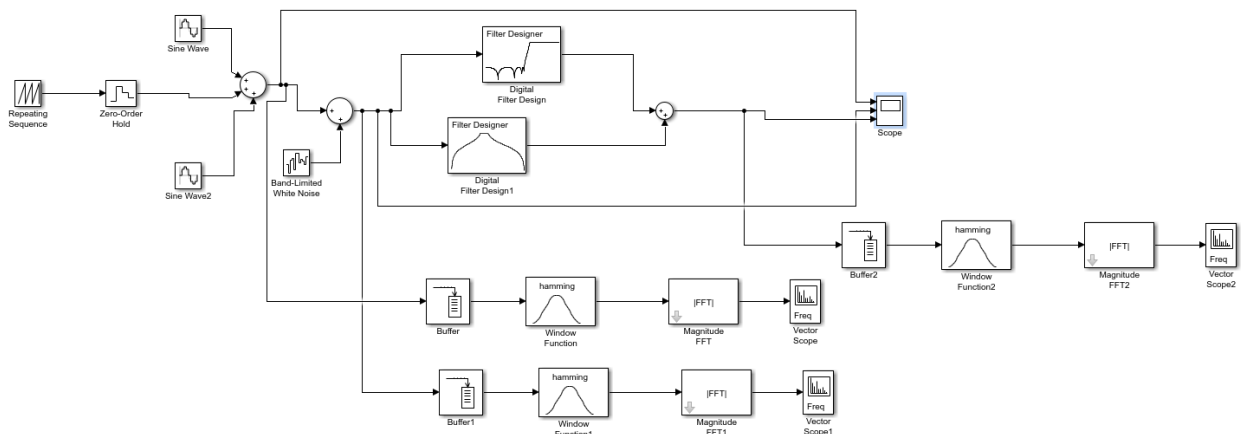


Рисунок 3.26 – Схема досліджуваної моделі

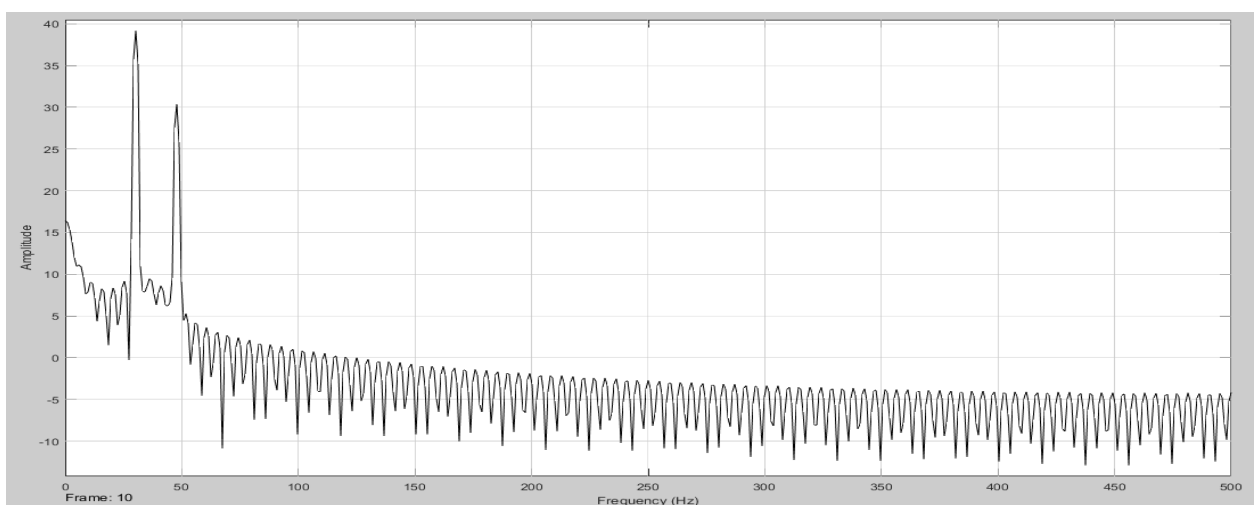


Рисунок 3.27 – Спектр амплітуд сигналу без шуму

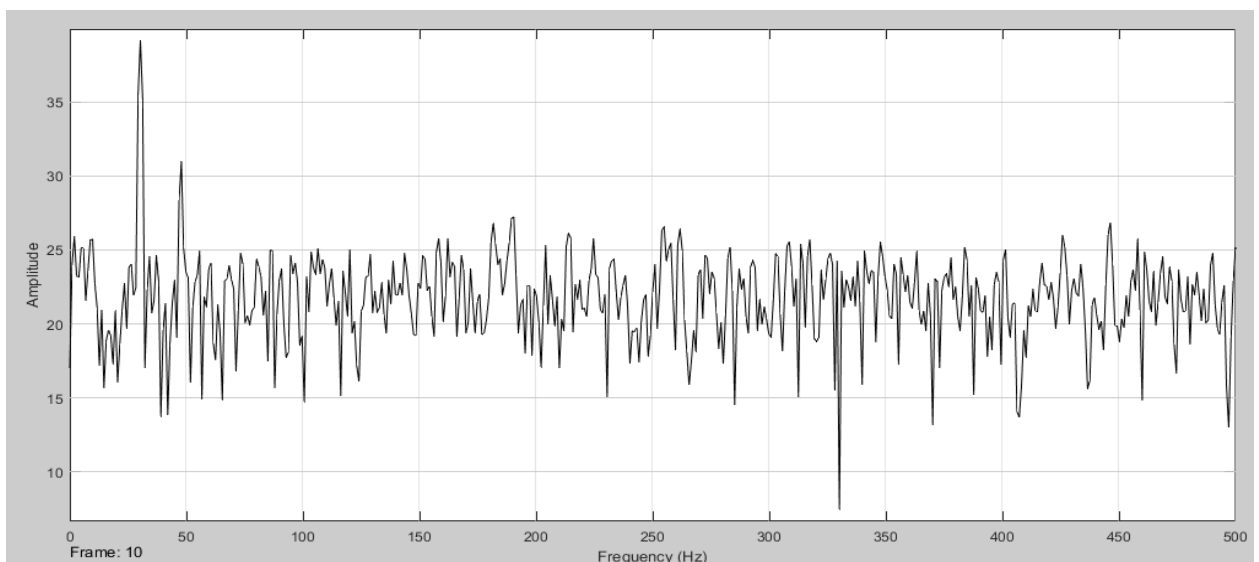


Рисунок 3.28 – Спектр амплітуд сигналу з шумом до фільтрації

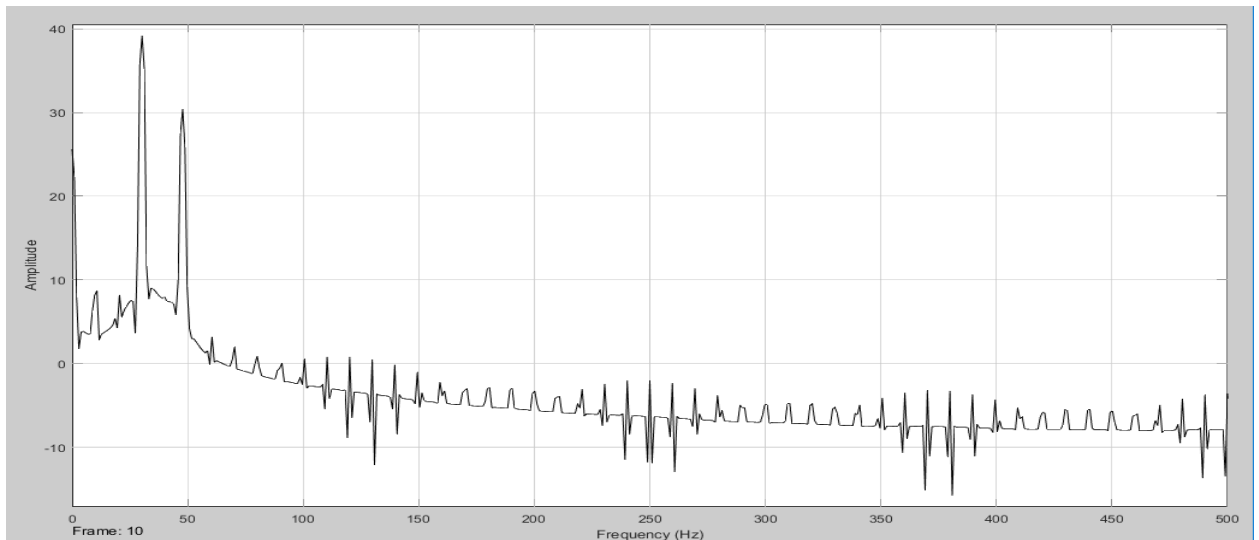


Рисунок 3.29 – Спектр амплітуд сигналу з шумом після фільтрації

Графік часової реалізації заміщеного сигналу без шуму, з шумом до і після фільтрації (рис. 3.30).

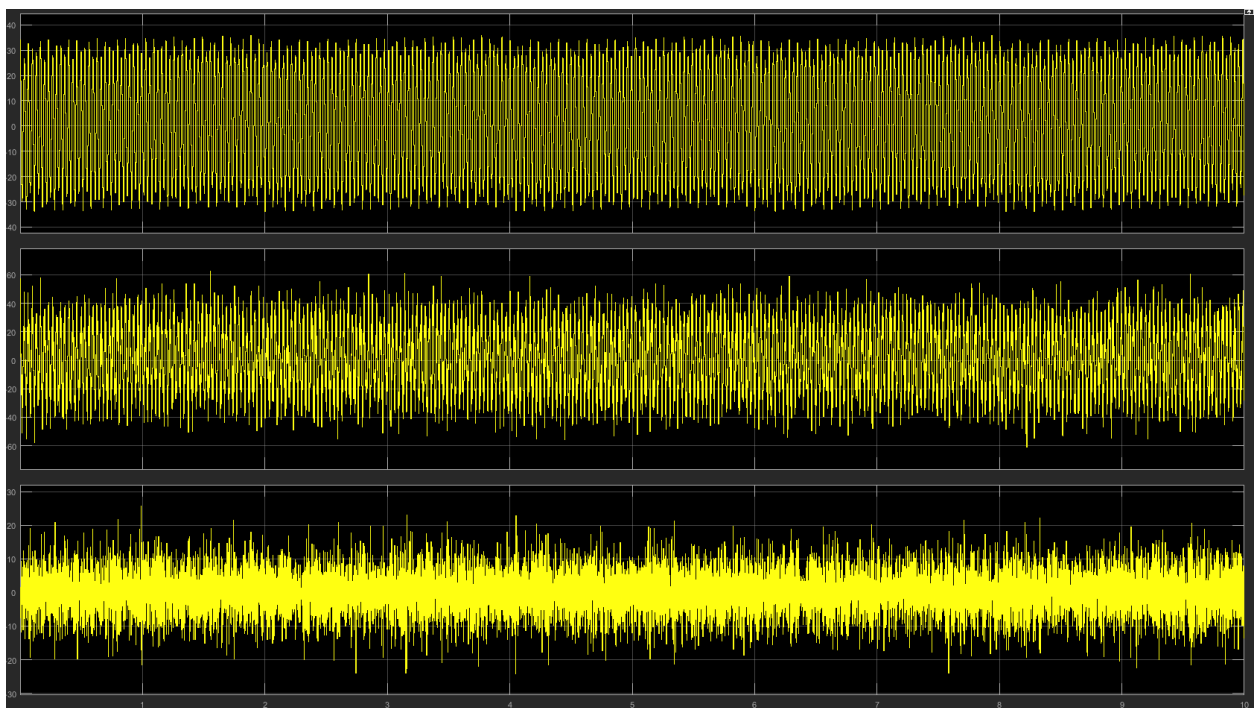


Рисунок 3.30 – Графік часової реалізації заміщеного сигналу без шуму, з шумом до і після фільтрації

Порівнявши графіки спектрів амплітуд та часових реалізацій можна зробити висновок, що система фільтрів синтезована вірно, так як спектр амплітуд має близьку форму до заміщеного спектру амплітуд без шуму.

Зміст звіту

1. Мета роботи.

2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.

3. Графіки АЧХ і ФЧХ досліджуваних фільтрів, а також їхній порівняльний аналіз.

4. Графіки часових і спектральних подань сигналів до й після фільтрації. Аналіз даних графіків.

5. Використовувані в аналітичних розрахунках формули з коментарями й результати розрахунків.

6. Висновки за результатами досліджень практичної роботи.

Контрольні питання

1. Дайте визначення, опишіть характеристики й способи опису безперервних ЛПВ систем.
2. Дайте визначення, опишіть характеристики й способи опису дискретних ЛПВ систем.
3. Дайте визначення й приведіть класифікацію аналогових фільтрів. Опишіть їхні характеристики й основні принципи синтезу.
4. Опишіть принципи цифрової фільтрації сигналів (узагальнений алгоритм цифрової фільтрації).
5. Приведіть класифікацію цифрових фільтрів. Опишіть схеми різних типів фільтрів
6. Опишіть класифікацію, особливості побудови й використання нерекурсивних фільтрів.
7. Опишіть класифікацію, особливості побудови й використання рекурсивних фільтрів. Опишіть умови стійкості даних фільтрів.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [2], [6], [8], [9], [13].

4. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛІВ У ПАКЕТІ MATLAB

Мета роботи: вивчити основи кореляційного аналізу стохастичних і детермінованих сигналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, MATLAB, Simulink.

Завдання:

1. Використовуючи блоки базової бібліотеки Simulink і бібліотеки DSP Blockset створити модель (див. рис. 4.1) і настроїти її. Модель містить джерело гармонійного сигналу із частотою F_1 і джерело обмеженого по частоті білого шуму із середньою потужністю P_1 (див. табл. 4.1). Ці два сигнали складаються. Шум пропускається через смуговий фільтр (параметри фільтра вибрати самостійно). Частота дискретизації 1000 Гц. У результаті роботи моделі формується чотири сигнали (y_1 , y_2 , y_3 , y_4), які виводяться в робочий простір пакета Matlab.

Таблиця 4.1 – Таблиця варіантів

№						
	F_1 , Гц	P_1 , В ²	K_1	K_3	T_1 , сек.	T_2 , сек.
1	100	0,1	0,5	0,7	0,5	1,3
2	50	0,5	0,9	0,2	0,3	0,6
3	30	0,4	0,8	1,2	1,0	0,4
4	30	0,6	0,6	0,9	0,4	1,0
5	70	0,8	0,2	0,2	1,6	2,5
6	95	1,0	1,2	0,6	1,3	0,5
7	120	0,3	1,9	0,5	0,6	0,3
8	160	0,1	0,2	0,9	0,4	1,0
9	175	0,5	0,6	0,8	0,1	0,9
10	40	0,4	0,5	1,5	2,5	1,6
11	20	0,6	0,9	0,7	0,5	1,3
12	250	0,8	0,8	0,2	0,3	0,6
13	25	1,0	0,7	1,2	1,0	0,4
14	55	0,3	0,2	1,9	0,9	0,1
15	10	0,1	1,2	0,2	1,6	2,5

2. Одержати й проаналізувати графіки автокореляційних функцій для чотирьох отриманих сигналів. Для цього може використатися наступна Matlab програма:

```
Fs=1000; % Частота дискретизації
Acorr_y1=xcorr(y_1); % Розрахунок автокореляційної функції
сигналу y_1
```

```

N=length(Acorr_y1); % Довжина функції в отсчетах
tau=(fix(-N/2):fix(N/2))/Fs; % Розрахунок осі часу
plot(tau,Acorr_y1); zoom on; grid on; %Висновок графіка
title('Autocorraletion function y_1');
xlabel('Tau, sec');
ylabel('Rs, V^2*sec');

```

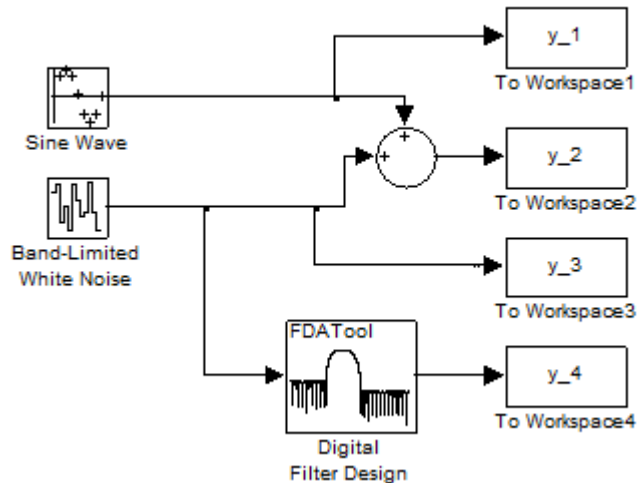


Рисунок 4.1 – Схема моделі

3. Дослідити залежність ширини головного пелюстка автокореляційної функції від ширини смуги пропускання фільтра. Побудувати графік даної залежності. Для цього повторити пункт 1 три рази з різною шириною смуги пропускання фільтра ($f = 300, 150, 50 \text{ Гц}$). Обґрунтувати результати.

4. Отримати й проаналізувати графіки взаємокореляційних функцій для пар сигналів $y_1 - y_3$, $y_1 - y_2$, $y_2 - y_3$, $y_3 - y_4$. Для цього може використатися наступна Matlab програма:

```

Fs=1000; % Частота дискретизації
Ccorr_y1_y3=xcorr(y_1,y_3); % Розрахунок взаємокореляційної
функції сигналів y_1 і y_3
N=length(Ccorr_y1_y3); % Довжина функції у відліках
tau=(fix(-N/2):fix(N/2))/Fs; % Розрахунок осі часу
plot(tau,Ccorr_y1_y3); zoom on; grid on; %Висновок графіка
title('Crosscorraletion function y_1 and y_3');
xlabel('Tau, sec');
ylabel('R12, V^2*sec');

```

5. Провести порівняльний аналіз всіх отриманих графіків і впевнитися у виконанні властивостей авто й взаємокореляційних функцій.

6. Розрахувати коефіцієнт кореляції між сигналами y_1 і y_2 . Побудувати й проаналізувати залежність даного коефіцієнта від співвідношення сигнал-шум (SNR).

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}, d.$$

Для цього повторити процес моделювання для декількох значень потужності шуму (P_n) при $SNR = [20 \ 10 \ 0 \ -10 \ -20] d$.

Для розрахунку коефіцієнта кореляції можна використати функцію

$$r = \text{corrcoef}(y_1, y_2).$$

Значення коефіцієнта кореляції будуть розташовуватися на бічній діагоналі матриці r .

7. Використовуючи блоки базової бібліотеки Simulink і бібліотеки DSP Blockset створити модель (див. рис. 4.2) і налаштувати її. Значення коефіцієнтів підсилення ДО1, ДО3 і затримок $T1$, $T2$ наведені в таблиці варіантів. Коефіцієнт підсилення ДО2=0. Тривалість вхідного випадкового сигналу визначається налаштуванням блоку Switch і дорівнює 1 секунді.

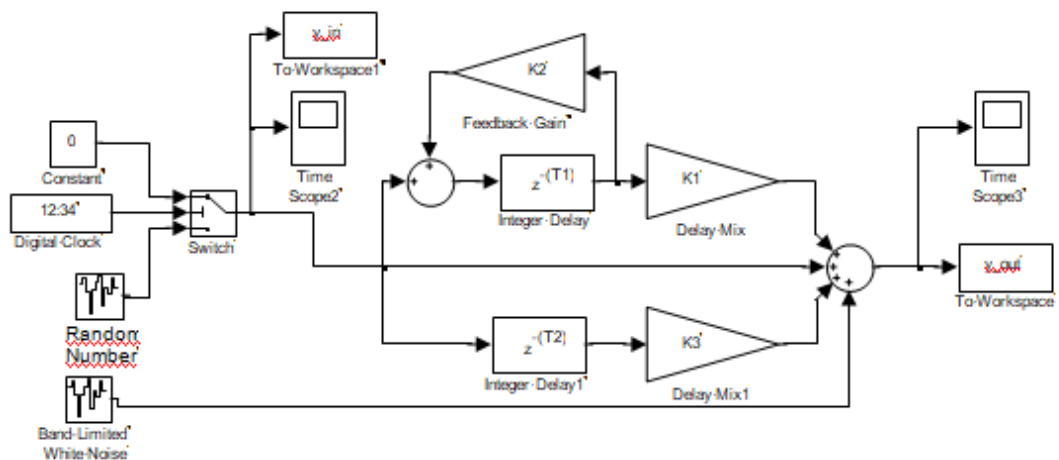


Рисунок 4.2 – Схема моделі з коефіцієнтами підсилення

Дана модель дозволяє проводити дослідження багатопроменевого поширення сигналу через систему. Зверніть увагу на те, що затримка в моделі задається в інтервалах дискретизації, а в таблиці варіантів вона задана в секундах. Отже, для одержання затримки в інтервалах дискретизації затримку в секундах необхідно помножити на частоту дискретизації.

8. Необхідно за допомогою автокореляційних і взаємкореляційних функцій сигналів y_{in} і y_{out} провести ідентифікацію каналів розповсюдження й оцінку затримок у даній системі.

9. Встановити значення коефіцієнта підсилення $DO2=0.5$ і повторити дослідження пункту 8.

10. За допомогою моделі побудувати спектри потужності сигналів y_{in} і y_{out} ґрунтуючись на їх автокореляційних функціях. Для розрахунку спектрів можна використати наступну програму

```
NFFT=1024;           %розмірність ШПФ
WINDOW=hamming(NFFT); %тип вікна, що згладжує
% функція розрахунку спектральної щільності потужності
[Pxx_y_in,Fr]=psd(Acor_y_in,NFFT,Fs,WINDOW);
plot(Fr,10*log10(Pxx/max(Pxx))); zoom on; grid on; %Вивід графіка
спектра
title('Spectr of y in');
xlabel('Frequency, Hz');
ylabel('Power, V^2');
```

11. Побудувати й проаналізувати взаємний спектр сигналів y_{in} і y_{out} ґрунтуючись на їх взаємокореляційній функції.

12. Зробити висновки.

Теоретичні відомості. Кореляційний аналіз поряд зі спектральним відіграє більшу роль у теорії й практиці обробки сигналів.

Основу кореляційного аналізу, як і спектрального, становить інтегральне вираження. Кореляційний аналіз заснований на дослідженні наступних характеристик (функцій) сигналів:

- коефіцієнта кореляції:

$$\rho_{AB} = \frac{M[(a(t) - m_a)(b(t) - m_b)]}{\sqrt{M[(a(t) - m_a)^2]} \sqrt{M[(b(t) - m_b)^2]}} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B}; \quad (4.1)$$

- автокореляційної функції:

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)dt; \quad (4.2)$$

- взаємокореляційної функції:

$$R_{AB}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)b(t-\tau)dt; \quad (4.3)$$

- взаємного спектра сигналів:

$$S_{AB}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{AB}(\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau; \quad (4.4)$$

- функції когерентності:

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{AB}(f)|^2}{S_A(f)S_B(f)}. \quad (4.5)$$

Використовуючи блоки базової бібліотеки Simulink і бібліотеки DSP Blockset створити модель і налаштуємо її (рис. 4.1). Параметри обираємо наступні: $F_1=200$ Гц, $P_1=0,6$ В², $K_1=0,7$, $K_3=1,9$, $T_1=0,9$ сек, $T_2=0,7$ сек. Частота дискретизації 1000 Гц. У результаті роботи моделі формується чотири сигнали (y_1 , y_2 , y_3 , y_4), які виводяться в робочий простір пакета Matlab.

Одержати й проаналізувати графіки автокореляційних функцій отриманих чотирьох сигналів (рис. 4.3-4.6).

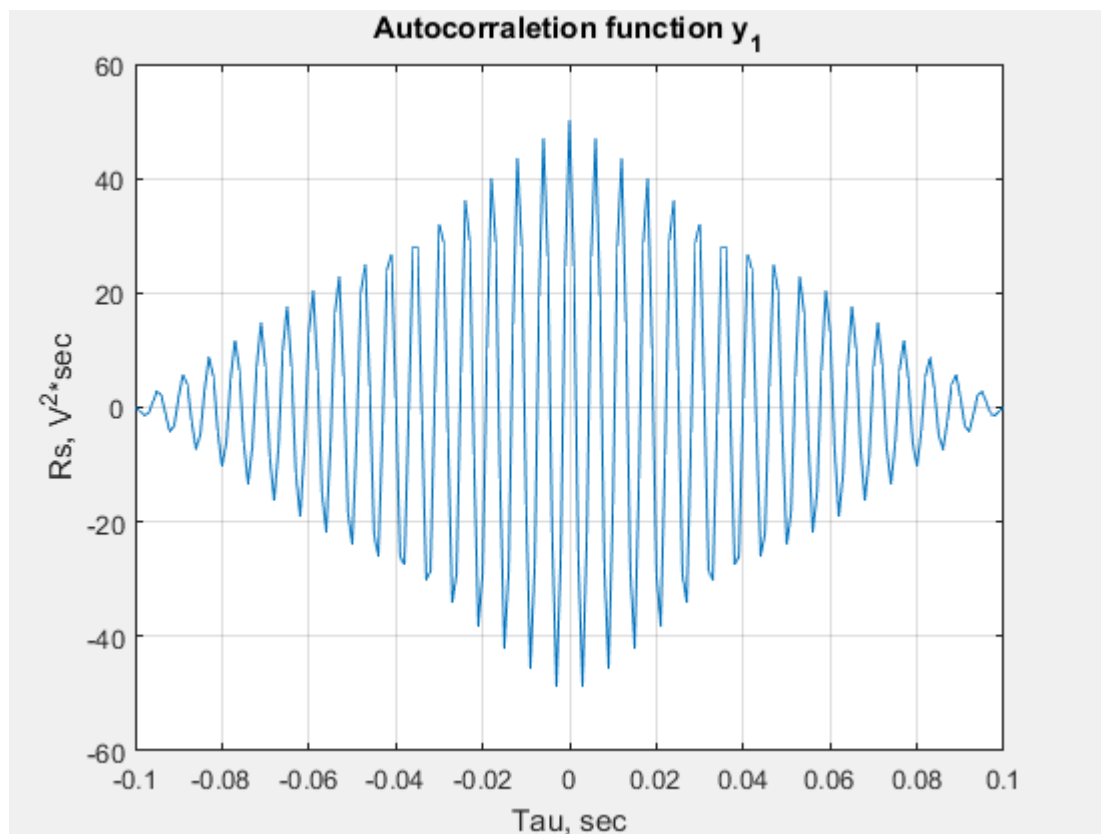


Рисунок 4.3 – Графік автокореляційної функції y_1

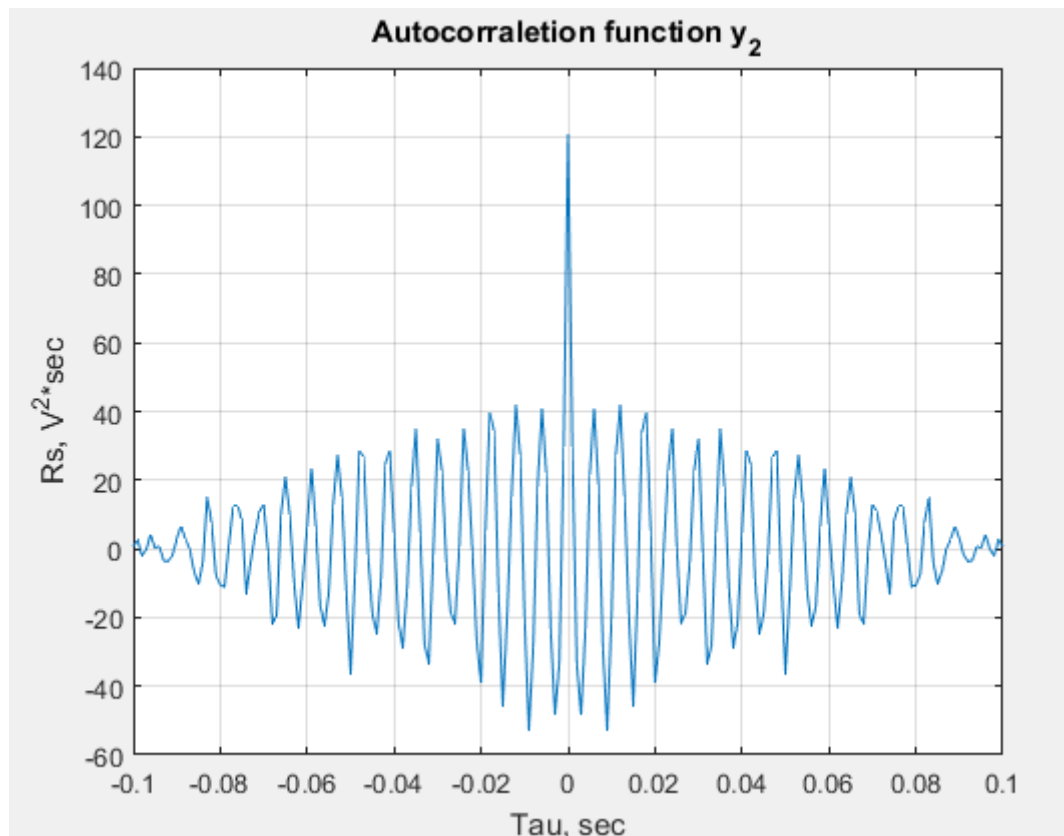


Рисунок 4.4 – Графік автокореляційної функції y_2

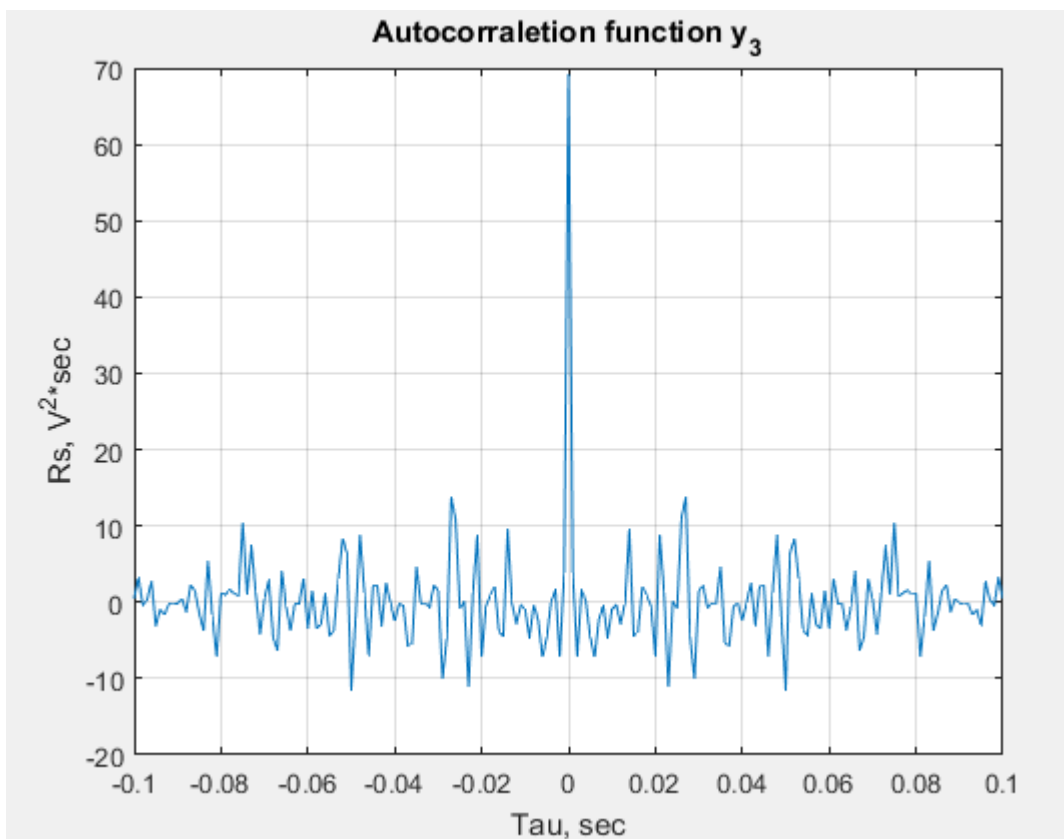


Рисунок 4.5 – Графік автокореляційної функції y_3

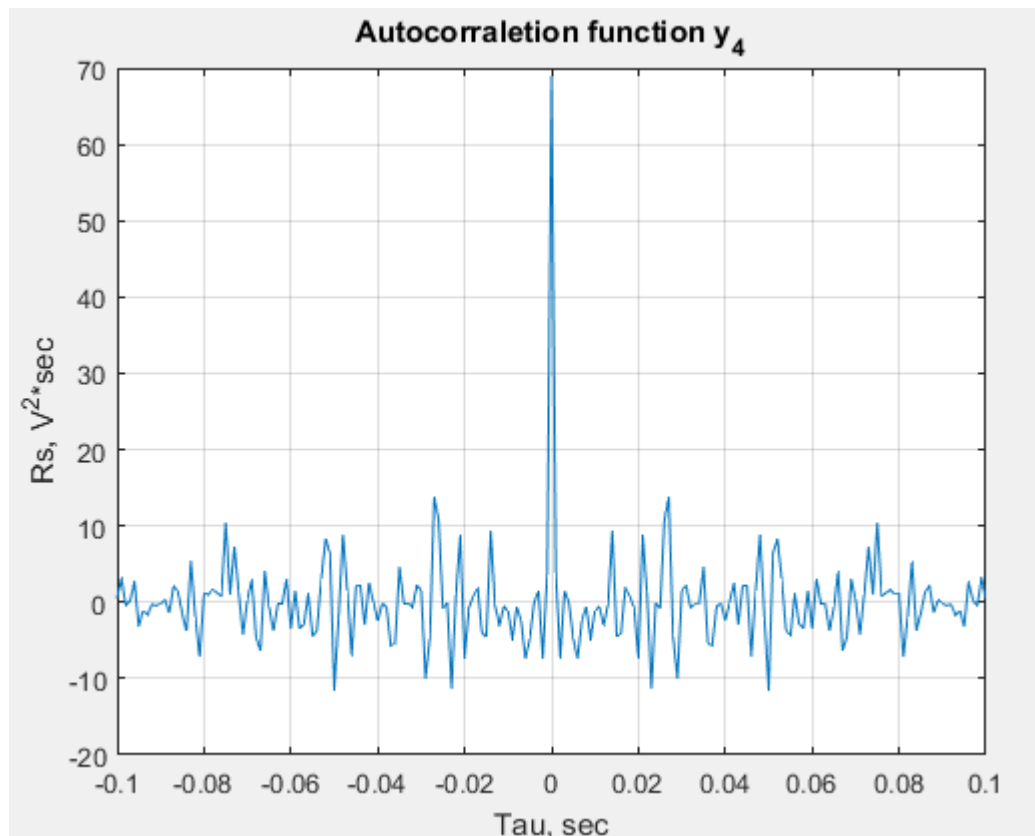


Рисунок 4.6 – Графік автокореляційної функції y_4

Дослідимо залежність ширини головного пелюстка автокореляційної функції від ширини смуги пропущення фільтра. Побудуємо графік даної залежності. Для цього проведемо попереднє дослідження три рази з різною шириною смуги пропущення фільтра ($f = 300, 150, 50$ Гц) (рис. 4.7-4.9).

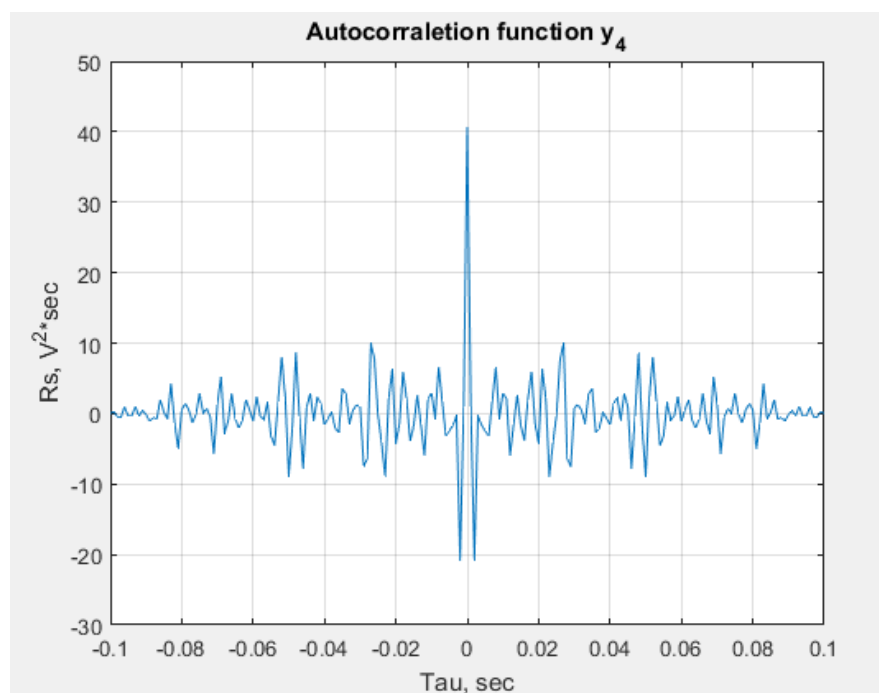


Рисунок 4.7 – Графік автокореляційної функції y_4 для $f = 300$ Гц

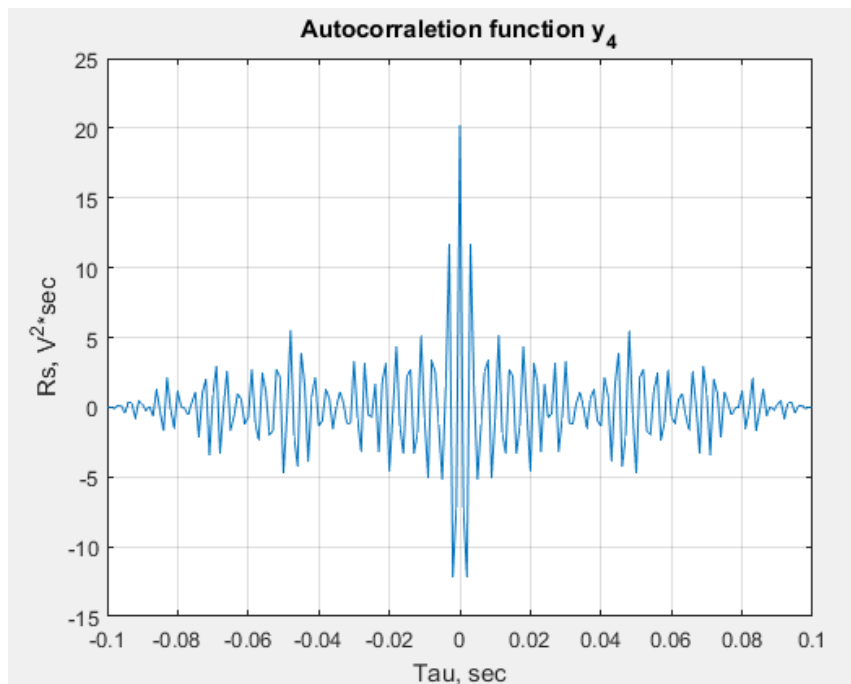


Рисунок 4.8 – Графік автокореляційної функції y_4 для $f = 150$ Гц

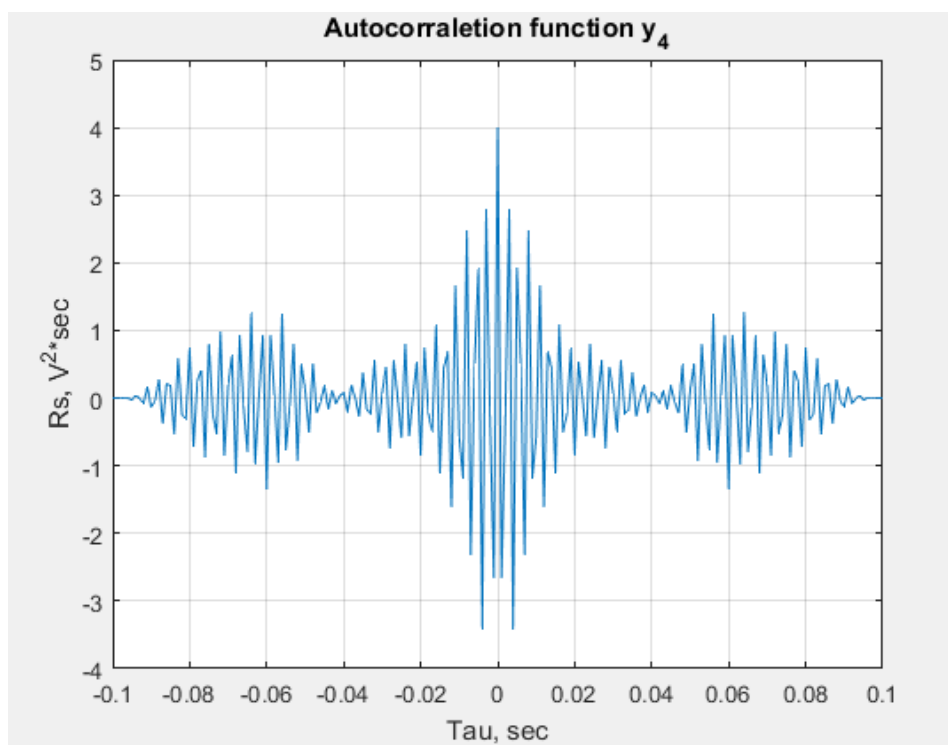


Рисунок 4.9 – Графік автокореляційної функції y_4 $f = 50$ Гц

Отримаємо графіки взаємкореляційних функцій для пар сигналів $y_1 - y_3$, $y_1 - y_2$, $y_2 - y_3$, $y_3 - y_4$ (рис. 4.10-4.13).

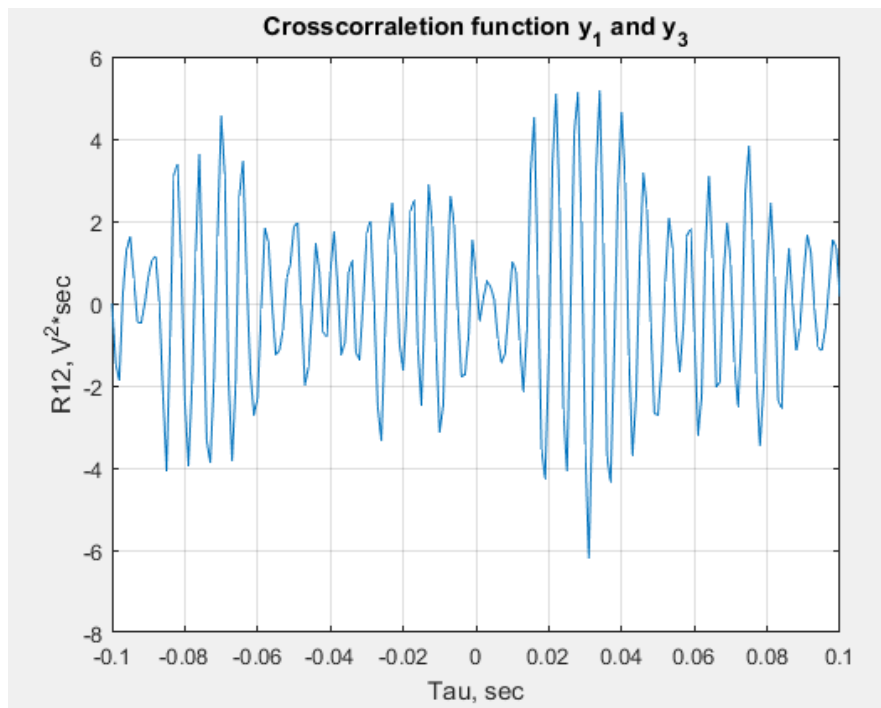


Рисунок 4.10 – Графік взаємкореляційних функцій для пар сигналів y_1 - y_3

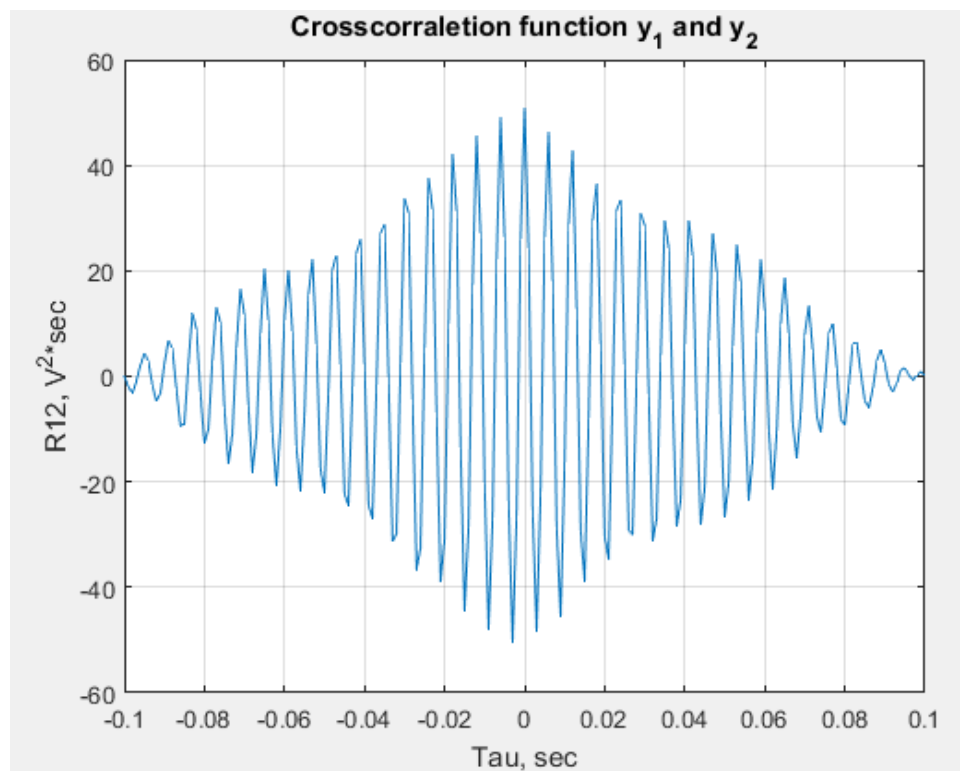


Рисунок 4.11 – Графік взаємкореляційних функцій для пар сигналів y_1 - y_2

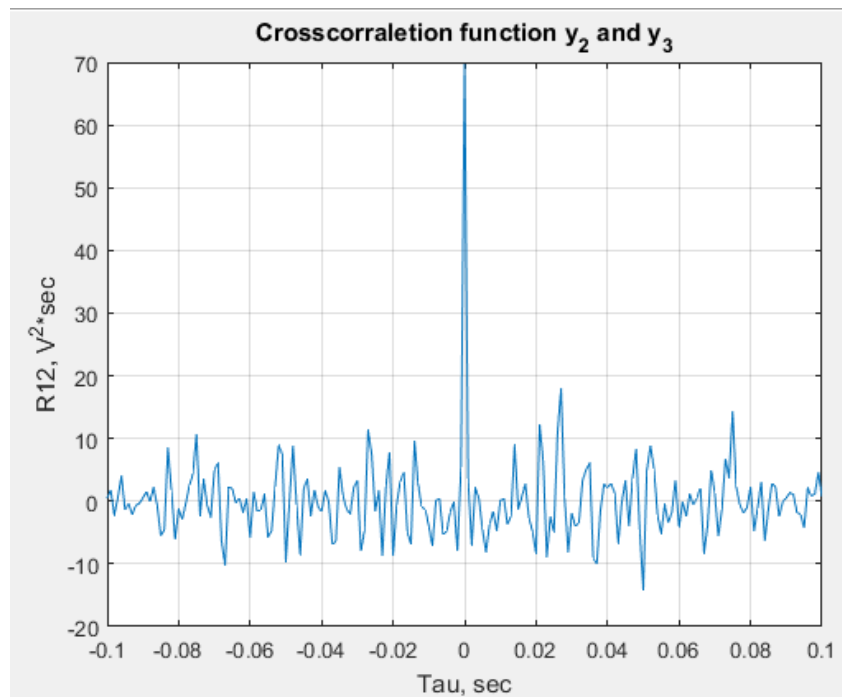


Рисунок 4.12 – Графік взаємкореляційних функцій для пар сигналів y_2 - y_3

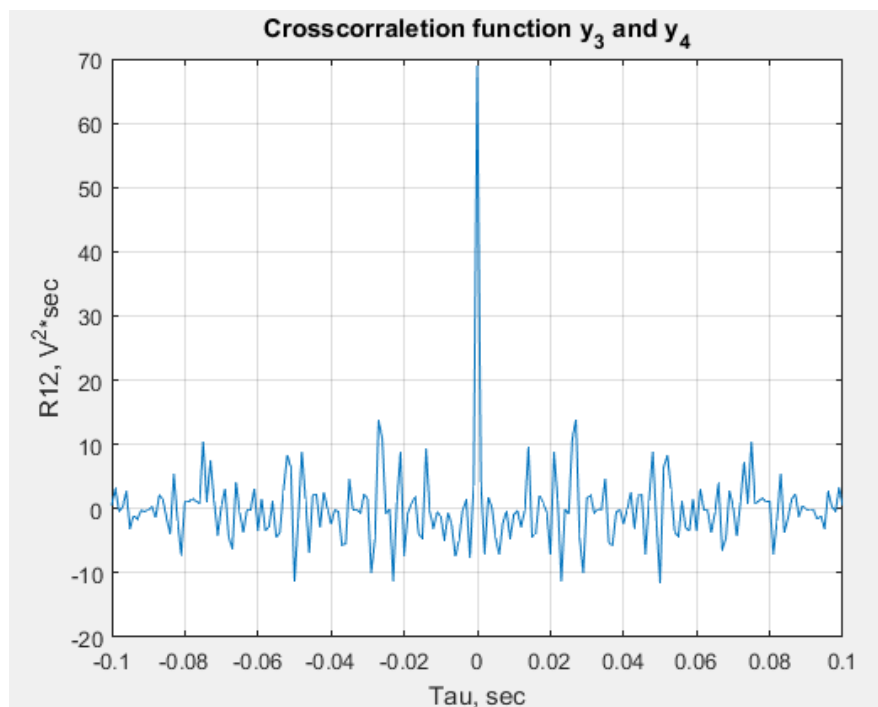


Рисунок 4.13 – Графік взаємкореляційних функцій для пар сигналів y_3 - y_4

Проведемо порівняльний аналіз всіх отриманих графіків і дослідимо властивості авто й взаємкореляційних функцій.

Властивості АКФ:

- якщо $\tau = 0$, то $B_s(0) = E$.
- АКФ – парна функція: $B_s(\tau) = B_s(-\tau)$.

На прикладі заданого сигналу бачимо, що графік АКФ симетричний відносно осі ординат. Отже, АКФ- парна функція.

Значення АКФ в нульовій точці є максимально можливим: $B_s(0) \geq B_s(\tau)$.

Також по графікам видно, що максимальне значення АКФ в нулі.

Для сигналів з кінцевою енергією АКФ є згасаючою: $\lim_{|\tau| \rightarrow \infty} B_s(\tau) = 0$.

Так як у нашого сигналу кінцева енергія, то і графік АКФ цього сигналу є згасаючим за часом.

Якщо сигнал не має неоднорідностей у вигляді дельта-функції, то АКФ є безперервною.

В ході виконання роботи з'ясувалося, що сигнал, який не має неоднорідностей у вигляді дельта-функції, має безперервну АКФ.

Властивості ВКФ:

- якщо $\tau = 0$, то $R_{12}(0) = \dot{S}_1(\omega) \dot{S}_2(\omega)$

Це необов'язкове максимальне значення функції. Максимальне значення ВКФ досягається в будь-якій точці.

Не на всіх графіках ВКФ максимальне значення досягається в нульовій точці.

- симетрія: $R_{12}(\tau) = R_{21}(-\tau)$

Але ВКФ не є парною функцією. З ростом абсолютного значення τ ВКФ для сигналів з кінцевою енергією згасає: $\lim_{|\tau| \rightarrow \infty} R_{12}(\tau) = 0$.

Усі сигнали в роботі є кінцевими, тому вони всі згасають.

Якщо у сигналу відсутня дельта-функція, то ВКФ – безперервна функція.

Розрахуємо коефіцієнт кореляції між сигналами y_1 і y_2 . Проаналізуємо залежність даного коефіцієнта від співвідношення сигнал-шум (SNR). Для цього необхідно повторити процес моделювання для декількох значень потужності шуму (P_n) при SNR=[20 10 0 -10 -20] дБ.

Значення коефіцієнта кореляції будуть розташовуватися на бічній діагоналі матриці r .

Використовуючи формулу $SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n}$, дБ, знаходимо P_n : $P_n = \frac{P_s}{10^{\frac{SNR}{10}}}$

SNR=20, $P_n=0.001$;

SNR=10, $P_n=0.01$;

SNR=0, $P_n=0.1$;

SNR=-10, $P_n=1$;

SNR=-20, $P_n=10$;

Змінюючи в моделі значення P_n , знаходимо коефіцієнти кореляції.

При $P_n=0.001$, $r=0.6000$

При $P_n=0.01$, $r=0.2568$

При $P_n=0.1$, $r=0.1119$

При $P_n=1$, $r=0.0640$
При $P_n=10$, $r=0.0488$.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.
3. Графіки кореляційних функцій, отриманих відповідно до завдань практичної роботи. Аналіз даних графіків.
4. Використовувані в аналітичних розрахунках формули з коментарями й результати розрахунків.
5. Висновки за результатами досліджень практичної роботи.

Контрольні питання

1. Кореляційний аналіз сигналів: його суть і реалізація. Приведіть приклади застосування кореляційного аналізу сигналів.
2. Автокореляційна функція і її властивості. Для рішення яких задач дана функція може використовуватися на практиці?
3. Взаємокореляційна функція і її властивості. Для рішення яких задач дана функція може використовуватися на практиці?
4. Розкрийте поняття «ергодичний випадковий процес». Що таке нормована кореляційна функція і як вона обчислюється?
5. Теорема Вінера-Хінчина і її фізичний зміст.
6. Кореляційні функції випадкових процесів. Приведіть графіки автокореляційної функції й частотного спектра білого шуму.
7. Для чого на практиці використовується функція когерентності й взаємний спектр?.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ: [1], [4], [11], [12], [13].

5. ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5 МОДУЛЯЦІЯ Й ДЕМОДУЛЯЦІЯ СИГНАЛІВ

Мета роботи: вивчити принципи найпростіших способів модуляції сигналів і особливості побудови систем зв'язку із частотним поділом каналів.

Устаткування, комплектуючі та програмне забезпечення персональний комп'ютер, MATLAB, Simulink.

Завдання:

1. Об'єктом дослідження в даному завданні є модель двоканальної системи зв'язку з амплітудною модуляцією (див. рис. 5.1). Повідомлення (інформаційні сигнали) у моделі представлені низькочастотними гармонійними коливаннями.

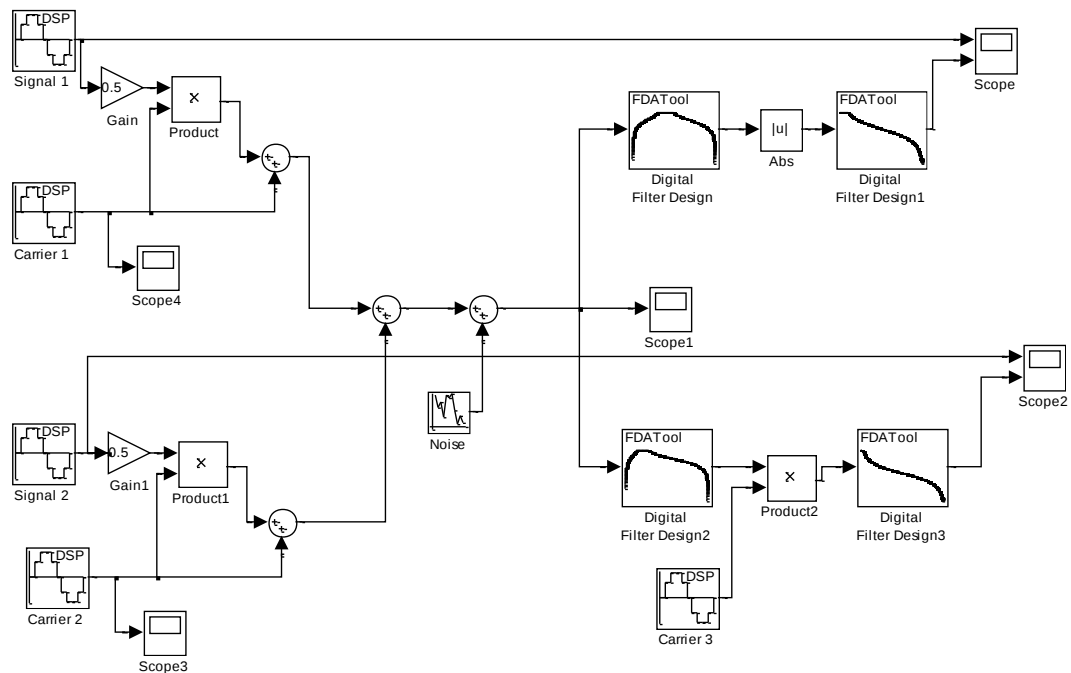


Рисунок 5.1 – Структура моделі двоканальної системи зв'язку з АМ

До складу моделі системи входять модулі передавачів, представлених на лівій частині рисунку і приймачів – на правій частині. Приймачі побудовані з використанням різних способів прийому повідомлень – когерентного й не когерентного. Середовище розповсюдження - лінія зв'язку, представлена суматором і джерелом шуму, у центральній частині рисунка.

Створити модель системи зв'язку згідно рис. 5.1. Налаштувати моделі передавачів сигналів (частоти інформаційних сигналів і несучих див. у табл. 5.1). Зафіксувати структуру моделі, записати параметри її модулів і параметри системного часу Simulink.

Таблиця 5.1 – Таблиця варіантів

№	Завдання								
	F_{sig1} , Гц	F_{sig2} , Гц	F_{car1} , кГц	F_{car2} , кГц	S	З, д	В, д	T, с	β
1	100	70	3	1	00110	10	8	2	30
2	50	95	0,9	2	11010	80	60	8	10
3	30	120	2,8	1,2	10111	41	15	10	50
4	200	160	2,5	1,9	01110	84	75	1	60
5	70	175	1,2	0,2	10101	9	6	0,5	35
6	95	40	1,2	0,6	10100	4	3	6	80
7	120	20	1,9	2,5	10111	8	6	18	62
8	30	120	0,9	2	11100	55	50	8	80
9	175	25	3	1	11010	55	50	7	63
10	40	55	0,9	2	10011	10	8	3	81
11	20	10	2,8	1,2	00110	80	60	16	70
12	250	100	2,5	1,9	11010	41	15	25	56
13	25	50	1,2	0,2	10111	84	75	3	30
14	55	30	1,2	0,6	01110	9	6	10	10
15	10	200	1,9	2,5	10101	4	3	0,5	50

2. Обґрунтувати вибір параметрів демодуляторів (частоти зрізу фільтрів, частота генератора). Налаштувати моделі приймачів сигналів. Перевірити працездатність моделі при нульовій потужності шуму.

3. Отримати й проаналізувати графіки модульованих сигналів і їхні спектри. Для побудови спектрів можна використати структури з практичної роботи №2.

4. Отримати графік сигналу в лінії зв'язку й спектр цього сигналу. Оцінити ступінь перекриття спектрів сигналів різних передавачів. Зробити висновки про можливість поділу сигналів. Оцінити можливості зближення частот несучих коливань обох передавачів без порушення умов частотного поділу. Обґрунтувати значення несучих коливань для випадку припустимого перекриття спектрів на рівні -20дБ.

5. Отримати графіки прийнятих повідомлень на виходах приймачів і порівняти їх з переданими. Оцінити час поширення повідомлень в каналі зв'язку (затримка в каналі зв'язку) і описати чим вона викликана.

6. Описати процедури визначення глибини модуляції за графіком сигналу і його спектру. Збільшити глибину модуляції в три рази й проаналізувати, як це відіб'ється на прийнятих сигналах. Описати що таке перемодуляція.

7. Виконати п. 5 для середньої потужності шуму 0.01 В^2 і 0.1 В^2 . Описати, як впливають перешкоди на виконання системою функцій поділу сигналів.

8. Порівняти між собою дві схеми демодуляції АМ сигналу за наступними критеріями:

- чутливість до перемодуляції;

- чутливість до перешкод у каналі зв'язку.

9. Опишіть що необхідно змінити в досліджуваній моделі щоб одержати SSB і DSB амплітудні модуляції.

10. Аналітично побудувати графіки АМ, ЧМ, ФМ і ОФМ сигналів для передачі бінарного повідомлення S заданого в таблиці варіантів.

11. Зробити висновки по роботі.

Теоретичні відомості. Модуляція полягає в зміні параметрів несучого сигналу за допомогою інформаційного сигналу (повідомлення). Зазвичай в якості несучого сигналу застосовується гармонійне коливання, тому інформаційний сигнал змінює або амплітуду, або фазу несучого - звідси різні способи модуляції. Модуляція застосовується для підвищення якості передачі інформації.

У даній роботі досліджується амплітудна модуляція сигналів на прикладі двоканальної системи зв'язку з частотним поділом каналів (рис. 5.1), коли є два передавачі і два приймача інформації. Приймачі використовують різні способи прийому інформації - когерентний і некогерентний, і налаштовані на відповідні передавачі. Когерентний прийом передбачає, що відомі (в даному випадку) частота і початкова фаза несучого сигналу; некогерентний - параметри відомі приблизно. В якості інформаційних сигналів обрані низькочастотні гармонійні коливання: $F_{s1} = 160 \text{ Hz}$, $F_{s2} = 250 \text{ Hz}$. Частоти несучих: $F_{c1} = 3,2 \text{ kHz}$, $F_{c2} = 2,3 \text{ kHz}$. Амплітуди інформаційних і несучих сигналів обрані для простоти 1 [V], тому коефіцієнти модуляції можна бачити в лівій частині моделі (рис. 5.2).

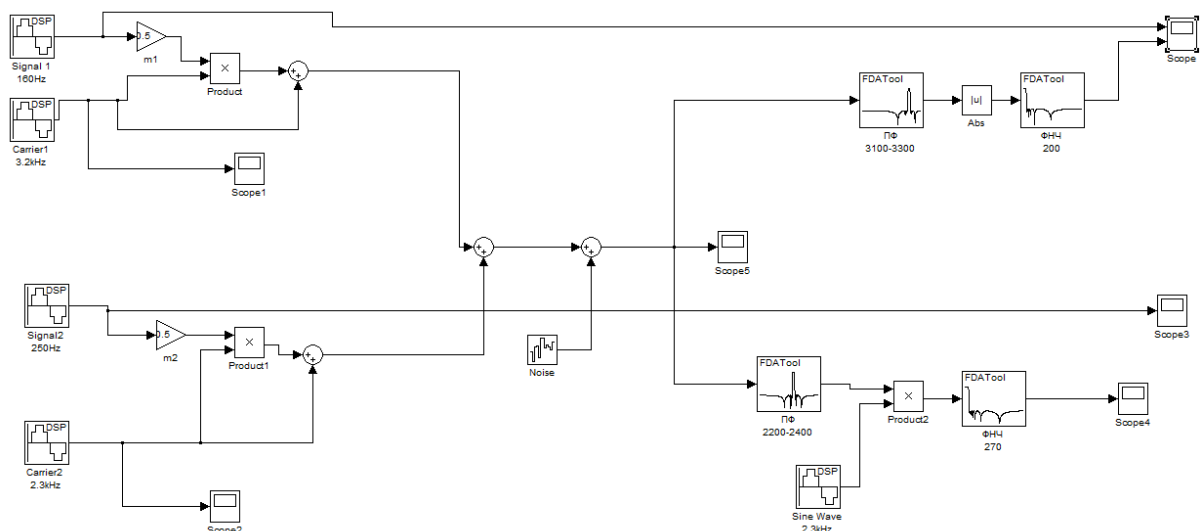


Рисунок 5.2 – Модель дослідження ($T = 1 \text{ c}$, $F_s = 8 \text{ kHz}$)

Після формування модульованих сигналів вони подаються в канал зв'язку, на який діють перешкоди. Далі зашумлені сигнали надходять в приймачі. Некогерентний приймач містить два фільтри і амплітудний детектор і налаштовується на прийом першого сигналу (160 Гц). Нехай

відома частота несучої 3100 - 3300 Гц і частота інформаційного сигналу - нижче 200 Гц, тоді перший (вхідний) фільтр повинен пропускати сигнали з частотами, що лежать в смузі 2900 - 3500 Гц. Після проходження через амплітудний детектор, в спектрі сигналу з'являється безліч різних частот, які затримуються вихідним фільтром (цим фільтром також затримується постійна складова). Аналогічним чином налаштовуються параметри фільтрів когерентного приймача, з урахуванням того, що параметри сигналу відомі більш точно. Частота генератора, що входить до складу когерентного приймача, приймається рівною частоті несучої другого інформаційного сигналу - 2300 Гц.

Нехай коефіцієнти модуляції рівні 0,5 і перешкоди в КЗ відсутні; спектри демодульованих сигналів зображені на рис. 5.3 і рис. 5.4.

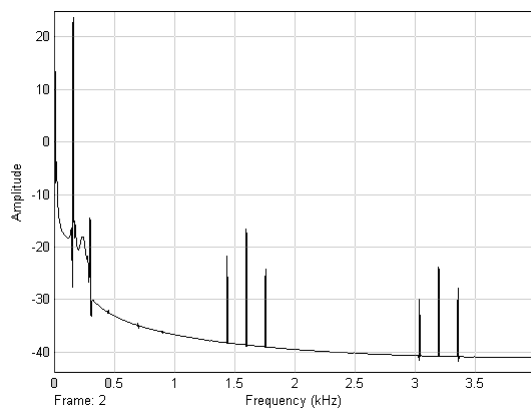


Рисунок 5.3 – Спектр демодульованого сигналу (некогерентний прийом)

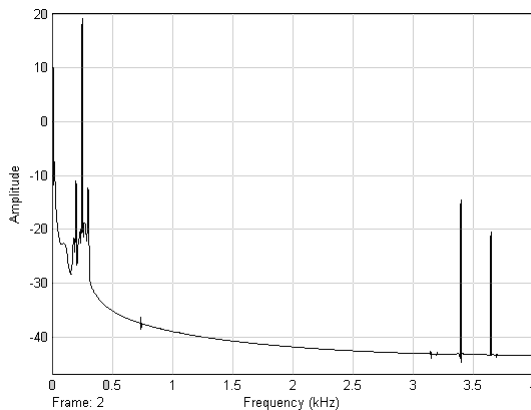


Рисунок 5.4 – Спектр демодульованого сигналу (когерентний прийом)

Спектри отримані з використанням вікон Кайзера, $N = 4096$.

В отриманих спектрах найбільшу амплітуду мають складові з частотами 160 і 250 Гц відповідно, інші складові незначні, тому демодуляція проведена задовільно.

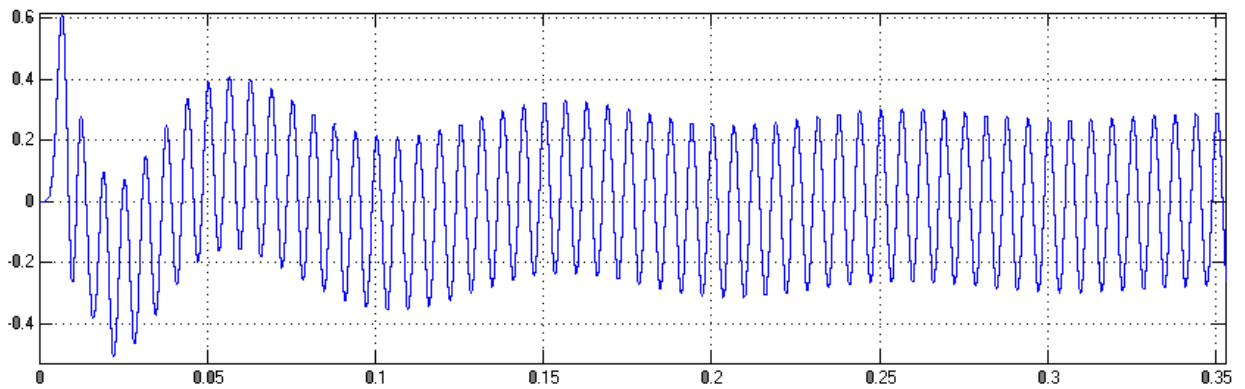


Рисунок 5.5 – Графік демодульованого сигналу (некогерентний прийом)

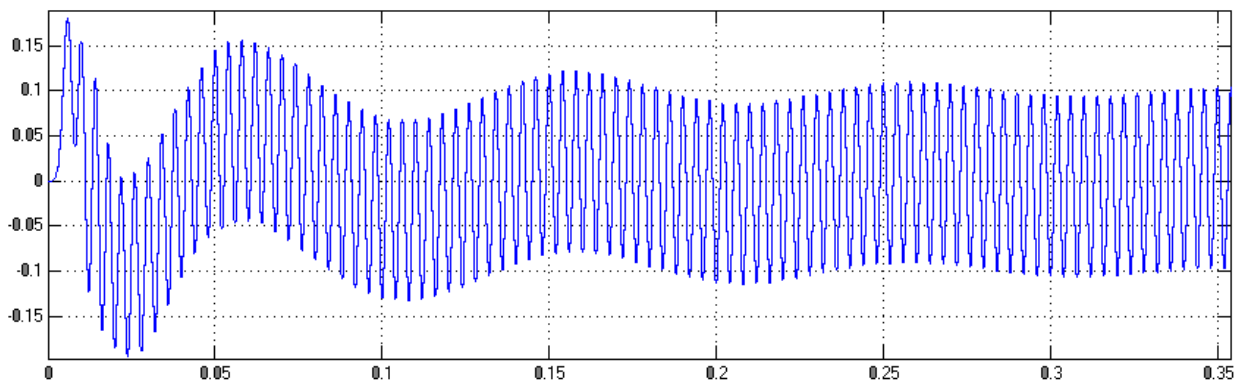


Рисунок 5.6 – Графік демодульованого сигналу (когерентний прийом)

За отриманими графіками можна зробити висновок, що демодулювати сигнали мають меншу амплітуду, ніж інформаційні, тобто частина енергії втрачена при передачі; ККД некогерентного приймача для даного коефіцієнта модуляції становить 8,4%, когерентного - 1%, тобто амплітудна модуляція не вигідна з енергетичної точки зору. Також є досить тривалий перехідний процес і затримки сигналу, обумовлені властивостями фільтрів. Для некогерентного прийому затримка приблизно дорівнює 5 мс, для когерентного - 1 мс.

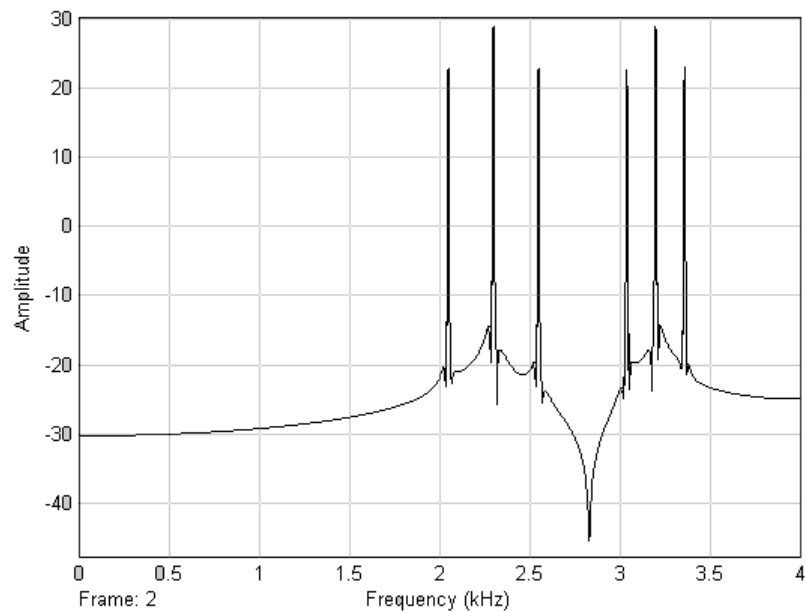


Рисунок 5.7 – Спектр сигналу в КЗ

На графіку спектра сигналу в КЗ видно, спектри модульованих сигналів не перекриваються, тому демодуляція проходить коректно. При цьому між крайніми складовими модульованих сигналів є вільна смуга частот, в якій може перебувати додатковий інформаційний сигнал. Частоти несучих можна зближувати, але до певної межі, яка становить теоретично для даних інформаційних сигналів 410 Гц. Якщо спектри модульованих сигналів перекриваються, то демодулювати їх не можна. Для рівня перекриття спектрів модульованих сигналів -20 дБ частоти несучих можуть бути рівні 3200 і 2760 Гц, або 2750 і 2300 Гц (рис. 5.8).

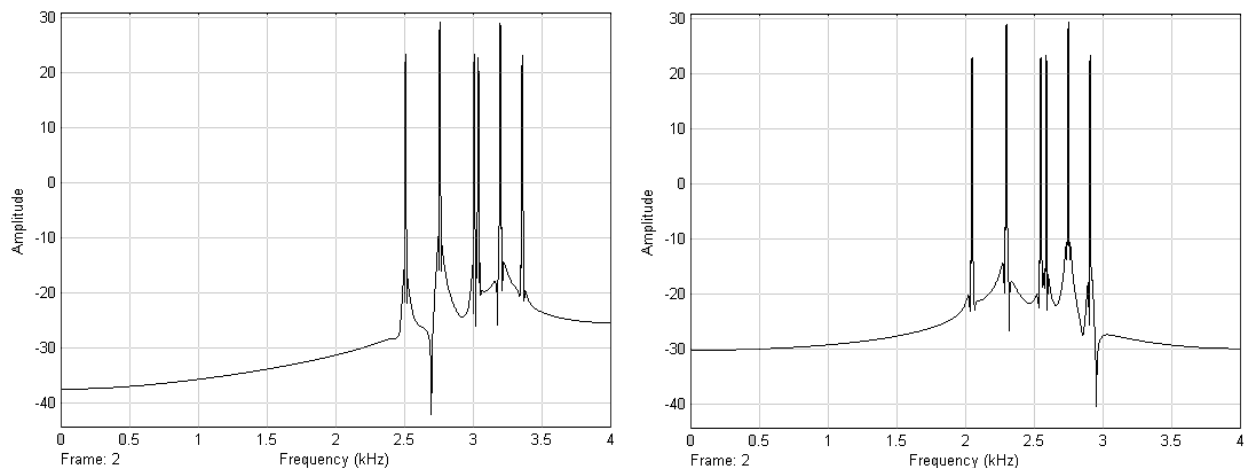


Рисунок 5.8 – Спектри сигналу в КЗ при зближенні частот несучих коливань

Коефіцієнт модуляції – це відношення амплітуд модулюючого і несе сигналів. Якщо він дорівнює нулю, то інформаційний сигнал не

передається, а при значеннях, більших одиниці спостерігається перемодуляція.

За спектром модульованого сигналу можна визначити коефіцієнт модуляції, знаючи, що рівень бічних смуг в спектрі дорівнює $A_{0m}/2$ (рис. 5.7). де A_0 – рівень несучої.

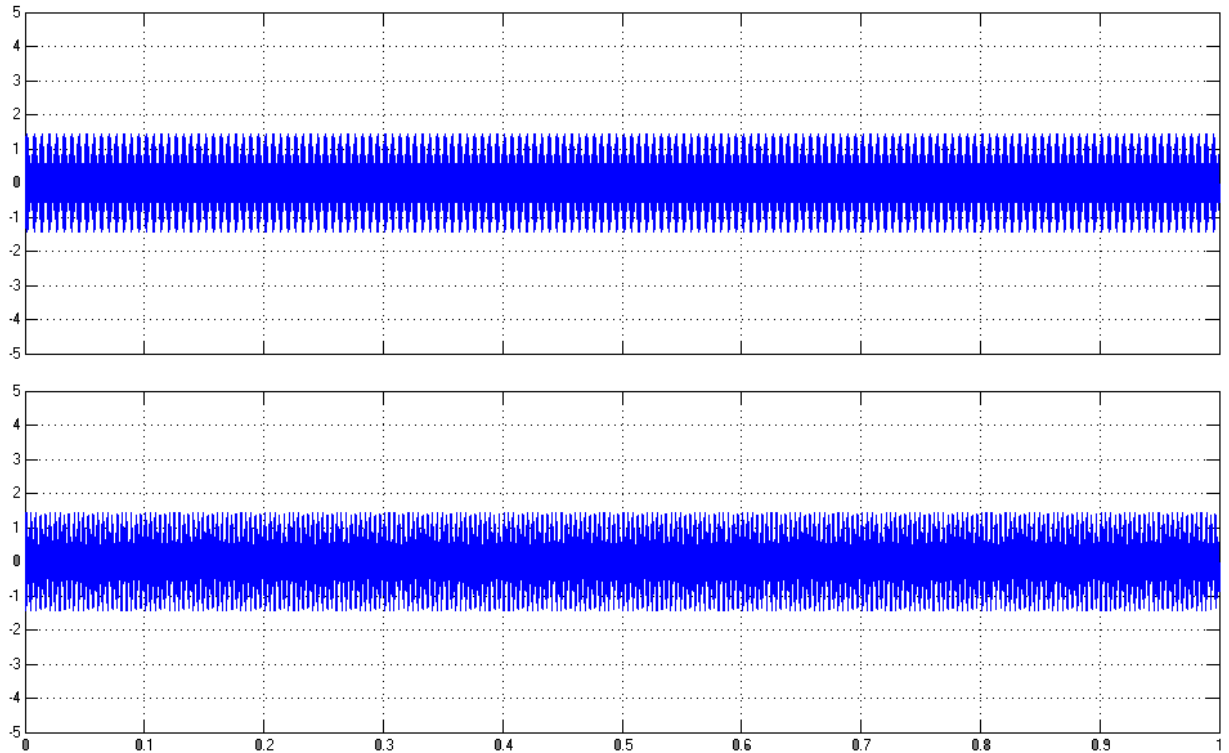


Рисунок 5.9 – Графіки модульованих сигналів

При сильній перемодуляції правильно відновити сигнал некогерентним приймачем можна, але можна когерентним. Наприклад, при коефіцієнті модуляції 5, демодульований сигнал когерентного приймача відрізняється від попереднього (рис. 5.6) тільки амплітудою, а некогерентного - ще і формою, тобто некогерентний приймач відновив сигнал некоректно (рис. 5.10); на графіку спектра отриманого сигналу видно складову (з частотою близько 320 Гц), яка найбільше впливає на форму сигналу.

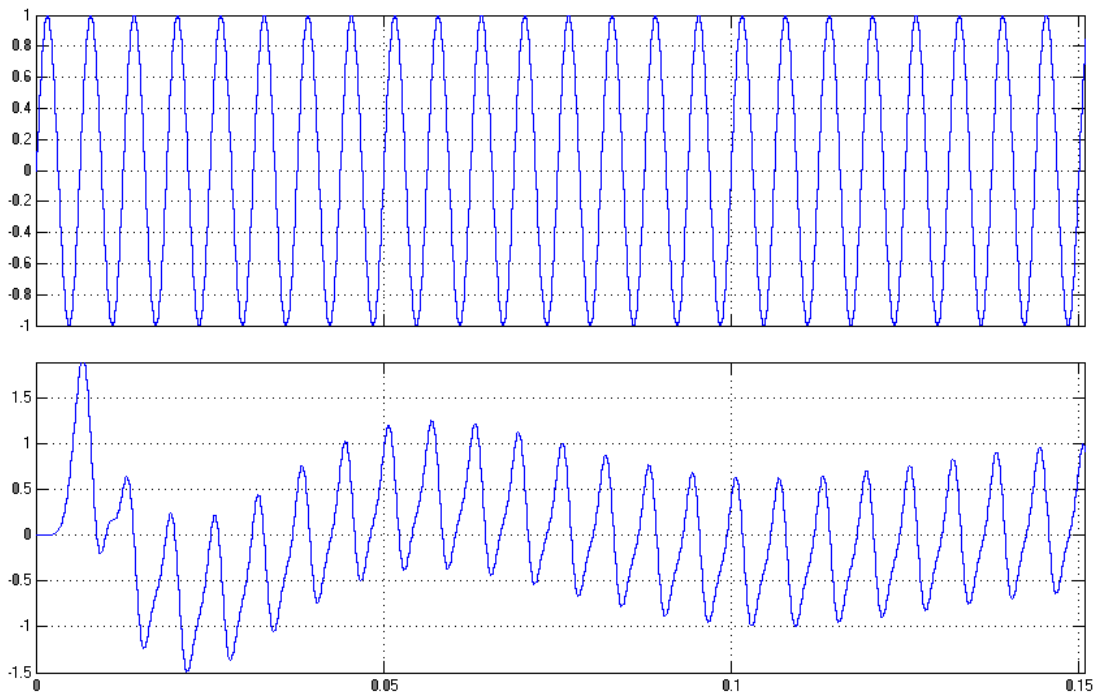


Рисунок 5.10 – Графік демодульованого сигналу (некогерентний прийом)

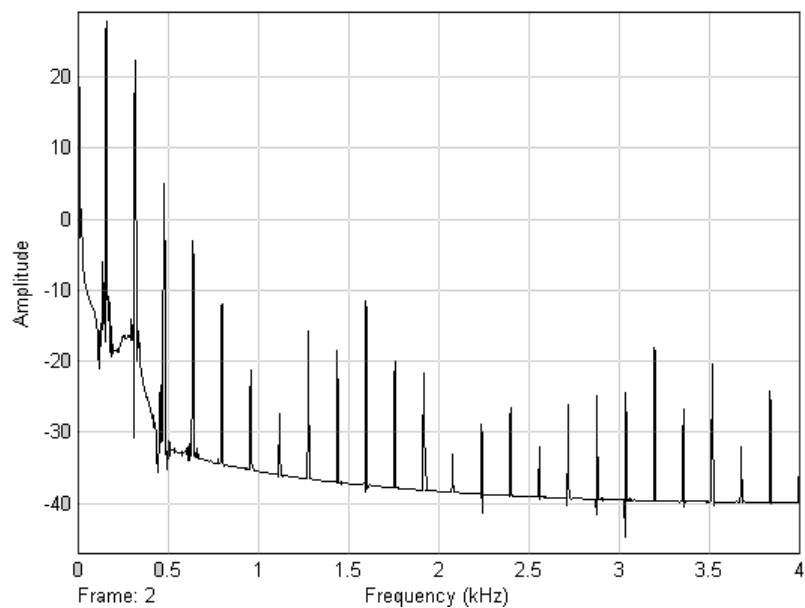


Рисунок 5.11 – Спектр демодульованого сигналу (некогерентний прийом)

Встановлюючи середню потужність шуму $0,01 \text{ В}^2$ і $0,1 \text{ В}^2$, отримуємо графіки демодулювати сигналів (рис. 1.12, 1.13), з яких можна зробити висновок, що для невеликих перешкод когерентний приймач (внизу на рис.5.13, 5.14) більш стійкий до перешкод. Також це видно на спектрах демодульованих сигналів (рис. 5.12) - демодульований сигнал некогерентного приймача (зліва на рис. 5.12) має більше складових в області низьких частот. Для потужності шуму

0,1 В² можна зробити висновок про завадостійкість на користь того чи іншого приймача.

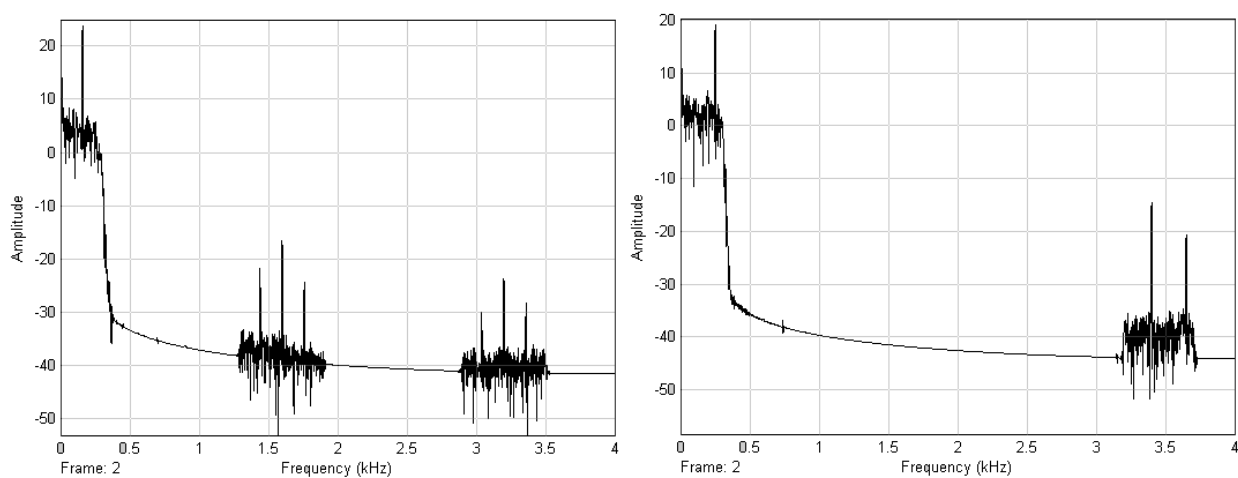


Рисунок 5.12 – Спектри демодульованих сигналів ($P_{cp} = 0,01 \text{ В}^2$)

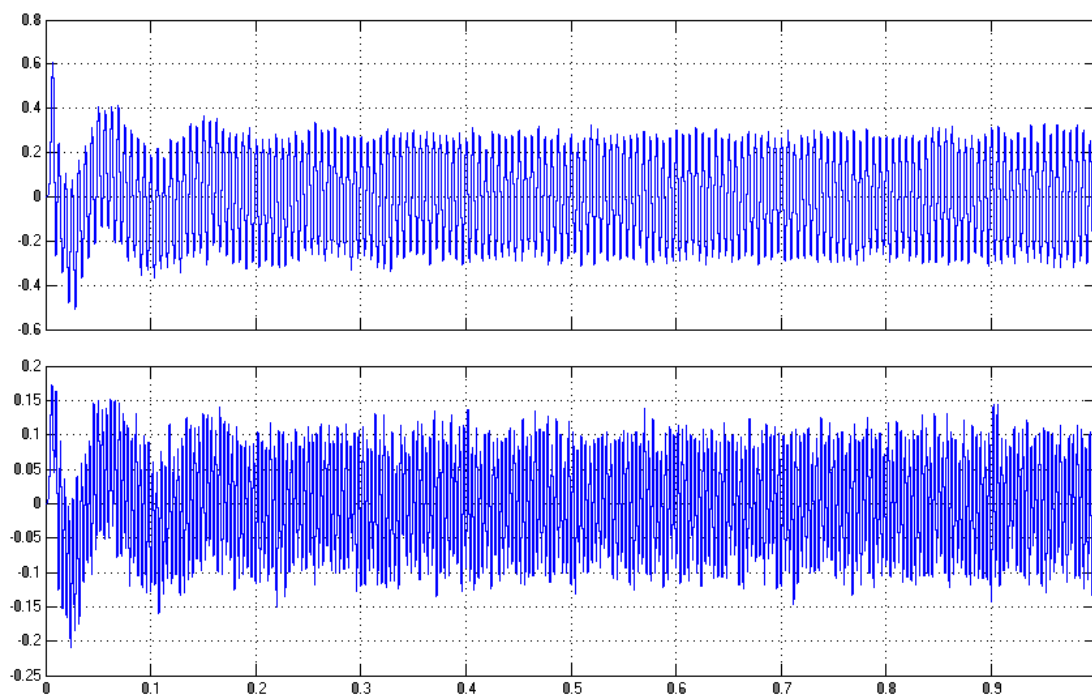


Рисунок 5.13 – Графіки демодульованих сигналів ($P_{ш} = 0,01 \text{ В}^2$)

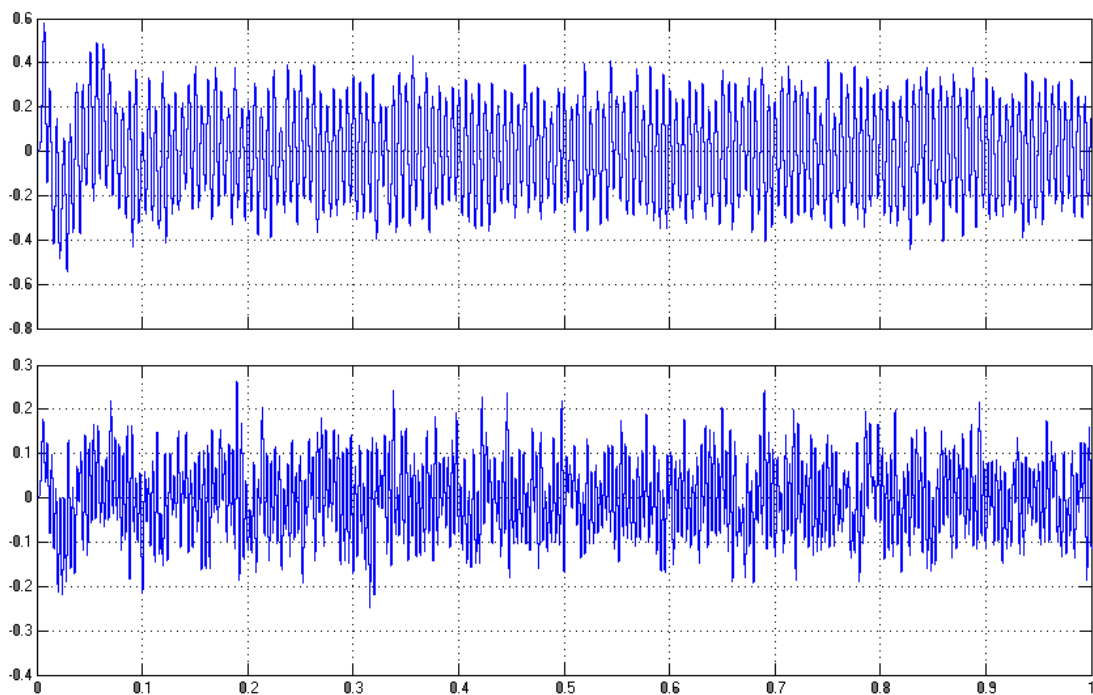


Рисунок 5.14 – Графіки демодульованих сигналів ($P_{\text{ш}} = 0,1 \text{ В}^2$)

Перешкоди негативно впливають на роботу системи – після демодуляції зашумлених сигналів їх форма сильно відрізняється від синусоїдальної. Переважно використовувати когерентний приймач для роботи з зашумленими сигналами – він більш стійка до перешкод, але має більш складну реалізацію. Також він нечутливий навіть до сильної перемодуляції.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Структурні схеми моделей, параметри модулів, параметри системного часу.
3. Графіки сигналів у різних точках системи і їхніх спектрів. Аналіз даних графіків.
4. Використовувані в аналітичних розрахунках формули з коментарями й результати розрахунків.
5. Висновки за результатами досліджень практичної роботи.

Контрольні питання

1. 1. Що таке коефіцієнт глибини модуляції і як він впливає на ефективність роботи систем зв'язку з амплітудною модуляцією?
2. Опишіть енергетичні співвідношення в сигналах з АМ. Яку ширину спектра має АМ сигнал?
3. Які різновиди АМ існують і в чому їхньої особливості? Приведіть приклади часових реалізацій і спектрів таких сигналів.
4. У чому різниця між когерентними й некогерентними приймачами сигналів? Приведіть приклади.

5. Опишіть різновиди кутових способів модуляції сигналів. Як вони взаємозалежні між собою?
6. Розкрийте параметри «миттєва частота» і «повна фаза». Як вони обчислюються для різних видів кутової модуляції?
7. Що відображають такі параметри як індекс кутової модуляції й девиація частоти? Як вони змінюються для різних видів кутової модуляції.
8. Порівняйте між собою функціональні характеристики сигналів з амплітудною й кутовою модуляціями (ширина спектра, енергетичні показники, якість зв'язку, дальність зв'язку). Дайте рекомендації з використання даних видів модуляції.
9. Приведіть структуру й опишіть роботу демодуляторів ФМ і ЧМ сигналів.

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

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Сигнали та теорія перетворень» (для студентів за напрямом підготовки 6.050201 «Системна інженерія» (СУА) денної та заочної форм навчання) / розроб. доц. І.В. Дегтяренко, ст. викл. О.О. Ярошенко. – Донецьк : ДонНТУ, 2010. – 39 с.
2. Жураковський, Ю.П. Теорія інформації та кодування : підручник / Ю.П. Жураковський, В.П. Полторак. – К. : Вища шк., 2001. – 255с. : іл.
3. Подлевський, Б.М. Теорія інформації в задачах : підручник / Б.М. Подлевський, Р.Є. Рикалюк. – К. : ЦУЛ, 2017. – 271 с.
4. Подлевський, Б.М. Теорія інформації : підручник / Б.М. Подлевський, Р.Є. Рикалюк. – Львів : Видавн. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2016. – 342 с.
5. Тулякова, Н.О. Теорія інформації : навч. посіб. / Н.О. Тулякова. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 212 с.
6. Шульгин, В.И. Основы теории передачи информации : учеб. пособие. Ч. 1. Экономное кодирование / В.И. Шульгин. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 102 с.
7. Основи теорії інформації та кодування : лабораторний практикум : навч. посіб. для студ. спец. 171 «Електроніка», спец. «Електронні та інформаційні технології кінематографії та аудіовізуальних систем» / М.І. Романюк, Г.Г. Власюк ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – К. : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 81 с.
8. Вінницький, В.П. Термінальне устаткування та передавання інформації в телекомунікаційних системах : підручник / В.П. Вінницький, В.Г. Поліщук. – К. : ІВЦ Вид-во «Політехніка», 2004. – 436 с.
9. Абакумов, В.Г. Теорія інформації та кодування : підручник. Ч.1. / В.Г. Абакумов. – К. : НТУУ «КПІ». Каф. ЗТ та РІ, 2009. – 90 с.
10. CulOnline [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.culonline.com.ua/index.php>. – Назва з екрана.
11. Кожевников, В.Л. Теорія інформації та кодування : навч. посіб. / В.Л. Кожевников, А.В. Кожевников. – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – 108 с.
12. Данченков, Я.В. Теорія інформації : навч. посіб. / Я.В. Данченков. – Рівне : НУВГП, 2012. – 111 с.
13. Сорока, Л.С. Основи теорії інформації : навч. посіб. / Л.С. Сорока. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2007. – 264 с.
14. Курко, А.М. Введення в теорію інформації [Електронний ресурс] : посіб. до вивч. дисц. «Теорія інформації» / А.М. Курко, В.Я. Решетняк. – Тернопіль : Терноп. Нац. техніч. ун-т ім. І. Пулюя, 2017 –

108 с. – Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21919>. – Назва з екрана.