

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

магістерська кваліфікаційна робота

на тему:

# МЕТОДИ КОРИГУВАННЯ НАДВИСОКОЧАСТОТНИХ ТРАКТІВ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

08-34.МКР.015.00.000 ПЗ

---

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ТКС-17м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

**Халамендик Р. С.**

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ  
Городецька О. С.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. РТ  
Воловик А.Ю.

Вінниця ВНТУ - 2019 рік

*Актуальність теми дослідження.* Для підвищення спектральної ефективності сучасних бездротових систем зв'язку застосовують сигнали з різною амплітудно-фазовою модуляцією (QAM, APSK, QPSK). Головна проблема полягає в тому, що висока енергоефективність підсилювача досягається лише в нелінійних режимах його роботи, що призводить до високих рівнів нелінійних спотворень переданого сигналу.

Одним з найбільш ефективних методів зменшення нелінійних спотворень є метод цифрового коригування, який дозволяє домогтися значного зменшення позасмугового випромінювання при збереженні високої енергоефективності передавальної системи, і має при цьому характеризується великою гнучкістю.

Метод попереднього коригування передбачає включення на вході підсилювача потужності додаткового пристрою (коректора), що здійснює попереднє спотворення вхідного сигналу з метою зменшення нелінійних спотворень на виході підсилювача. Тому актуальним є завдання дослідження ефективності застосування даних моделей для задач безструктурного моделювання та побудови систем з цифровим попереднім коригуванням.

Цифровий коректор повинен підлаштовувати свої параметри відповідно до змінених характеристик підсилювача потужності, тобто система з цифровими коригуванням повинна бути адаптивною. Тому актуальним є питання розробки і вдосконалення алгоритмів адаптації цифрового коректора.

У таких системах характеристики підсилювача потужності і блоків перетворювачів частоти значно відрізняються в межах робочого діапазону, що призводить до необхідності зміни структури цифрового коректора. Тому актуальним є завдання модифікації методу цифрового попереднього коригування для таких систем зв'язку і розробки рекомендацій для практичної реалізації цифрових коректорів для даних систем.

Для перевірки ефективності методів підвищення лінійності, а також для виявлення особливостей при практичному використанні цифрових коректорів, необхідні експериментальні вимірювання. Актуальною є задача розробки автоматизованого програмно-апаратного комплексу для вимірювання нелінійних характеристик передавального тракту і визначення параметрів його моделей і моделей цифрових коректорів.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є збільшення лінійності передавального тракту за рахунок удосконалення методів цифрових попередніх корекцій, а також аналіз ефективності роботи безструктурних моделей нелінійних динамічних систем.

*Наукова новизна* МКР полягає в наступному:

1. Запропоновано модифікацію методу цифрового попереднього коригування, яка, на відміну від наявних методик, може бути застосована для систем зв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти.

2. За допомогою методу стохастичного градієнта і рекурсивного методу найменших квадратів вперше виведені аналітичні співвідношення для адаптивної зміни параметрів цифрових коректорів, побудованих на основі різних безструктурних поліноміальних моделей з комплексними коефіцієнтами.

3. На відміну від більшості відомих робіт по безструктурному моделюванню проаналізовано вплив ширини смуги сигналу і його середньої потужності на вибір оптимальної структури моделі, як підсилювача потужності, так і цифрового коректора для нього.

4. Вироблений необхідний набір вимог, заснованих як на теоретичних, так і експериментальних дослідженнях, яких необхідно дотримуватися при побудові передавального тракту з цифровими попередніми коригуваннями.

*Практична значимість* роботи полягає в наступному:

1. Розроблена модифікація цифрового коректора і викладений алгоритм синтезу системи дозволяють збільшити лінійність передавального тракту системи зв'язку з ППРЧ.

2. Виведені аналітичні співвідношення для адаптивного процесу дають практичну можливість застосовувати в якості цифрового коректора більш ефективні безструктурні моделі.

3. Розроблений автоматизований комплекс дозволяє прискорити процес побудови моделі передавального тракту і цифрового коректора.

*Апробація роботи.* Основні матеріали з усіх розділів МКР доповідалися і обговорювалися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (Вінниця, 2019, МН-2019).

## Інтернет + Бібліотека

100% Оригінальність

0% Схожість

95 Джерела

У зв'язку зі значно збільшеним числом пристроїв бездротового зв'язку при розробці сучасних систем телекомунікації накладаються жорсткі вимоги на спектр сигналу, що передається. Це пов'язано з тим, що при формуванні та підсиленні корисного сигналу через нелінійність передавального тракту виникають різні позасмугові випромінювання.

# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

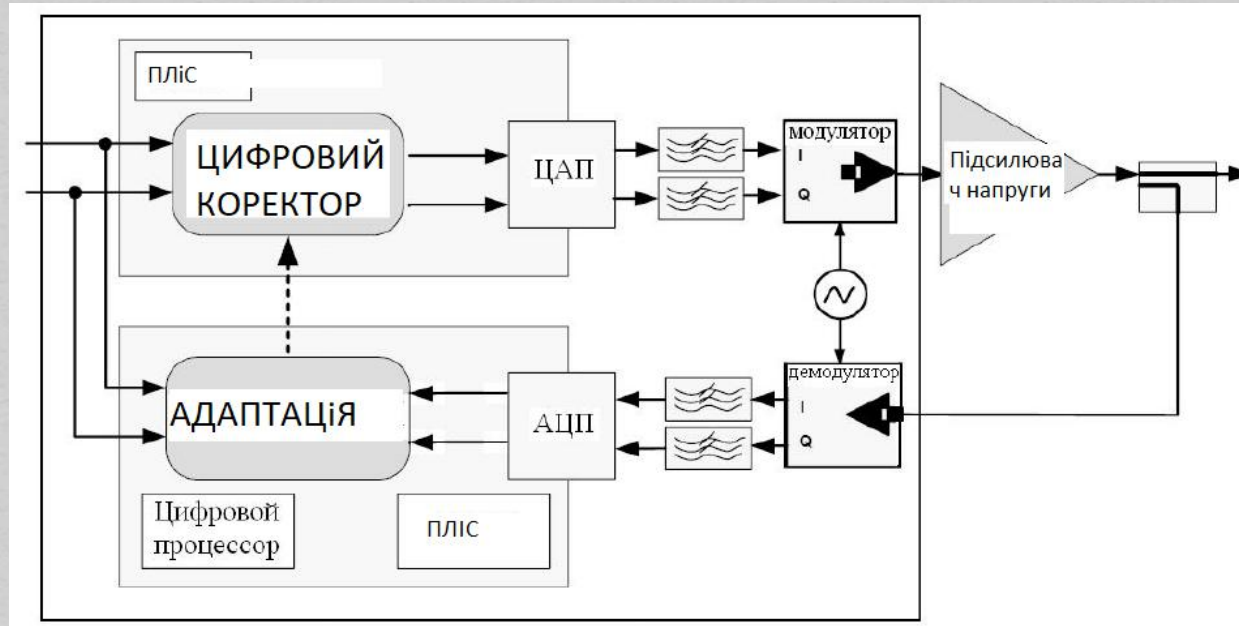


Рисунок 1 – Принципова схема системи з цифровими попереднім коригуванням

Вибір даного методу зазвичай обумовлюється декількома причинами. По-перше, в НВЧ передавачах, де підсилювальний тракт має високу чутливість до будь-яких втручань в структуру, найбільш прийнятним методом лінеаризації є метод попереднього коригування. По-друге, існують аналогові коректори нелінійних спотворень, принципи дії яких засновані на застосуванні одного або декількох нелінійних елементів (зазвичай діодів).

# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

По-третє, застосування цифрових методів модуляції і використання схем прямого цифрового синтезу дозволяє створити цифровий коректор у вигляді апаратно-програмного модуля, що входить до складу модулятора.

В залежності від типу реалізації цих двох блоків можна виділити наступні два види систем з цифровими попереднім коригуванням: коректори на основі таблиць відповідності, коректори на основі безструктурних моделей.

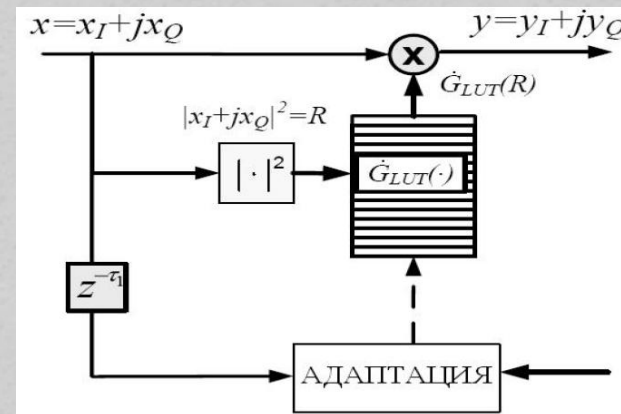


Рисунок 2 – Коректор на основі таблиці відповідності

# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

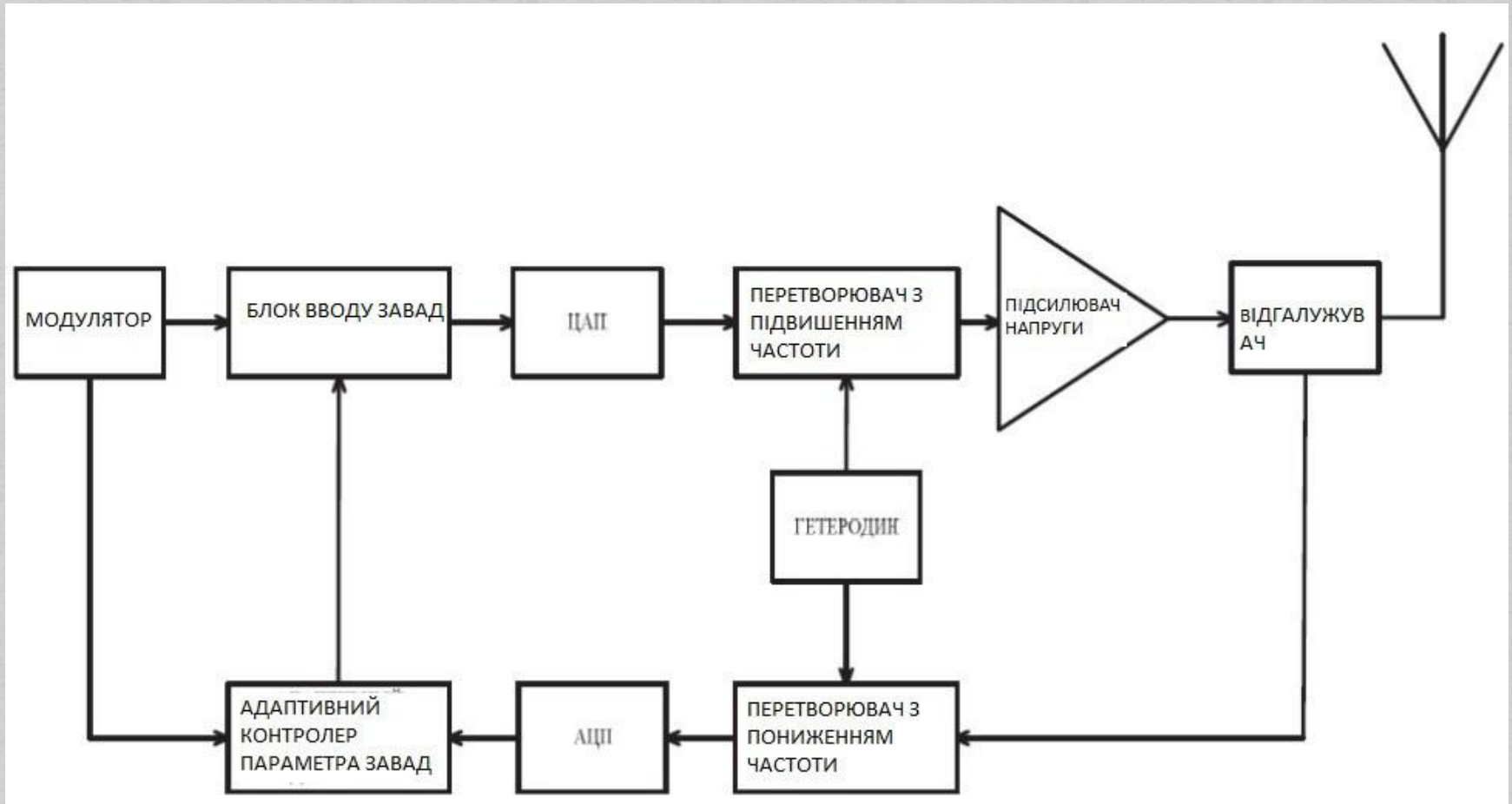


Рисунок 3 – Структурна схема класичної системи з попереднім коригуванням



# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

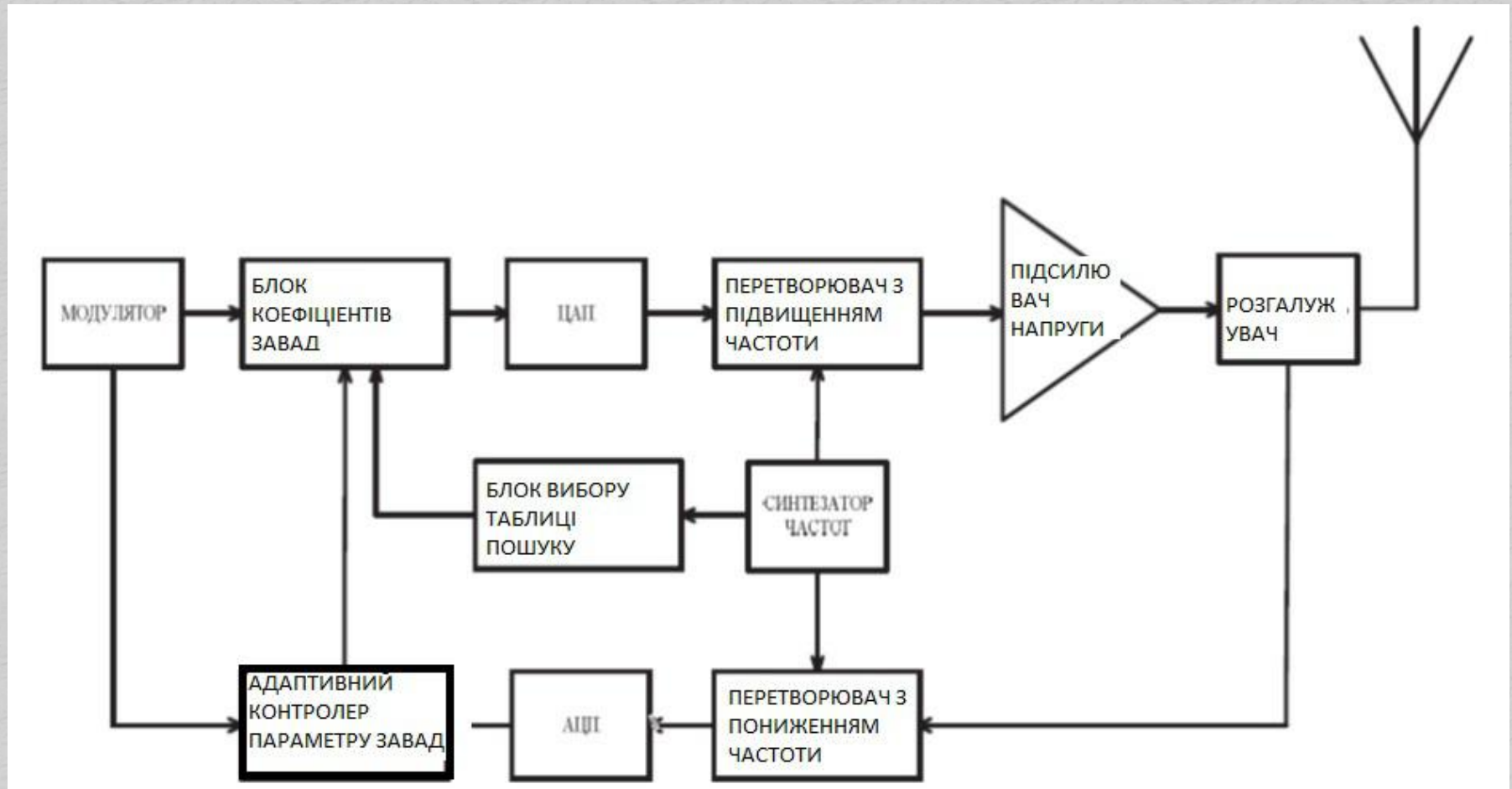


Рисунок 4 – Структурна схема запропонованої системи з попереднім коригуванням

# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

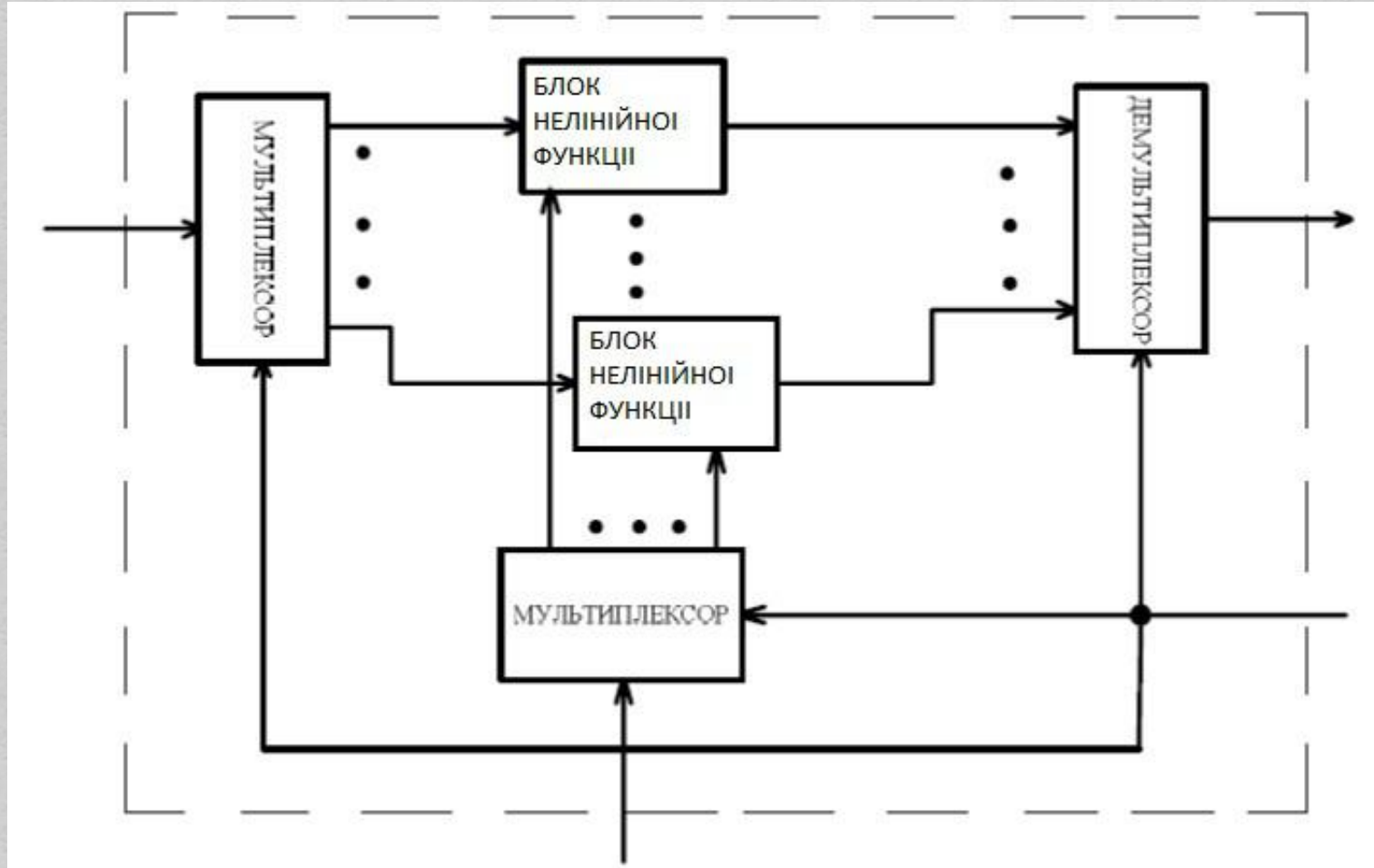


Рисунок 5 – Структурна схема запропонованого блоку коефіцієнтів попереднього коригування

# МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ В НВЧ ПІДСИЛЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

Процес адаптації також може бути застосований для побудови зворотного моделі, якщо нелінійна характеристика підсилювача заздалегідь невідома. Блок адаптації використовує квадратури вихідного і посиленого сигналів, коригує значення блоку нелінійної функції і періодично перезаписує їх в пам'ять. Зазвичай адаптивний контролер параметра предискаженій здійснює коригування коефіцієнтів моделей згідно принципам одного з ітераційних методів рішення нелінійних рівнянь (лінійного, методу січних і т.д.).

# ВИБІР МОДЕЛІ ПІДСИЛЮВАЧА І ТИПУ ЦИФРОВОГО КОРЕКТОРА

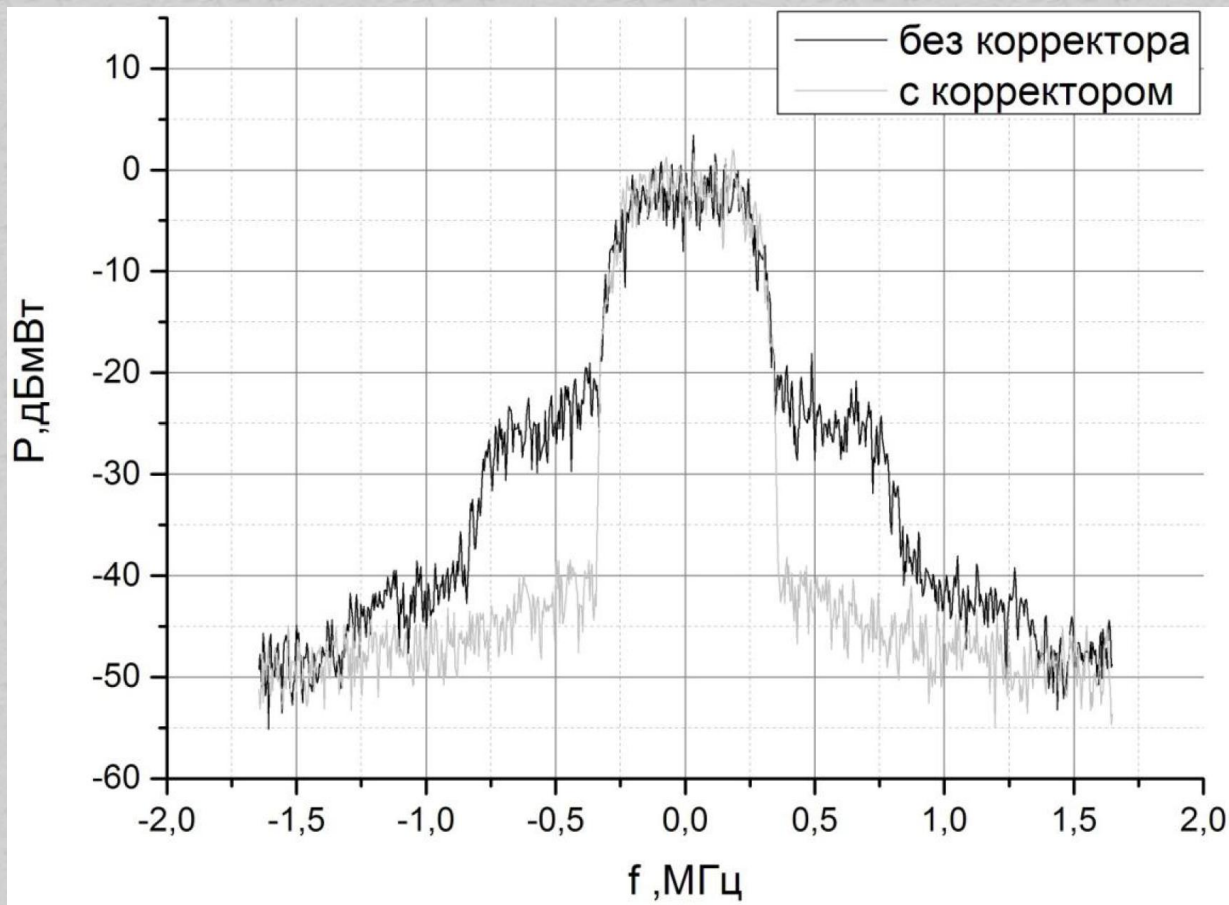


Рисунок 6 – Спектр на виході підсилювача потужності

# ВИБІР МОДЕЛІ ПІДСИЛЮВАЧА І ТИПУ ЦИФРОВОГО КОРЕКТОРА

Розглянуто цифрові коректори, побудовані на основі різних безструктурні інерційних нелінійних моделей. визначено параметри цифрових коректорів для конкретного підсилювача потужності і різної смуги переданого сигналу. Проведено порівняльний аналіз даних коректорів з точки зору ефективності лінеаризації і складності програмної реалізації. Встановлено, що для всіх досліджуваних сигналів цілком задовільні результати дає цифровий коректор на основі поліноміальної моделі з пам'яттю. Отримані результати можуть знайти застосування при розробці пристроїв, що забезпечують лінеаризацію нелінійних динамічних систем, зокрема, передавального тракту систем зв'язку.

Варто зазначити, що оскільки для адаптивного поновлення коефіцієнтів цифрового коректора потрібно тільки визначення передавального коефіцієнта тракту, то в приймальному тракті зворотного гілки не виникає необхідність видалення несучої частоти або демодуляції сигналу.

# ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОГО КОРИГУВАННЯ

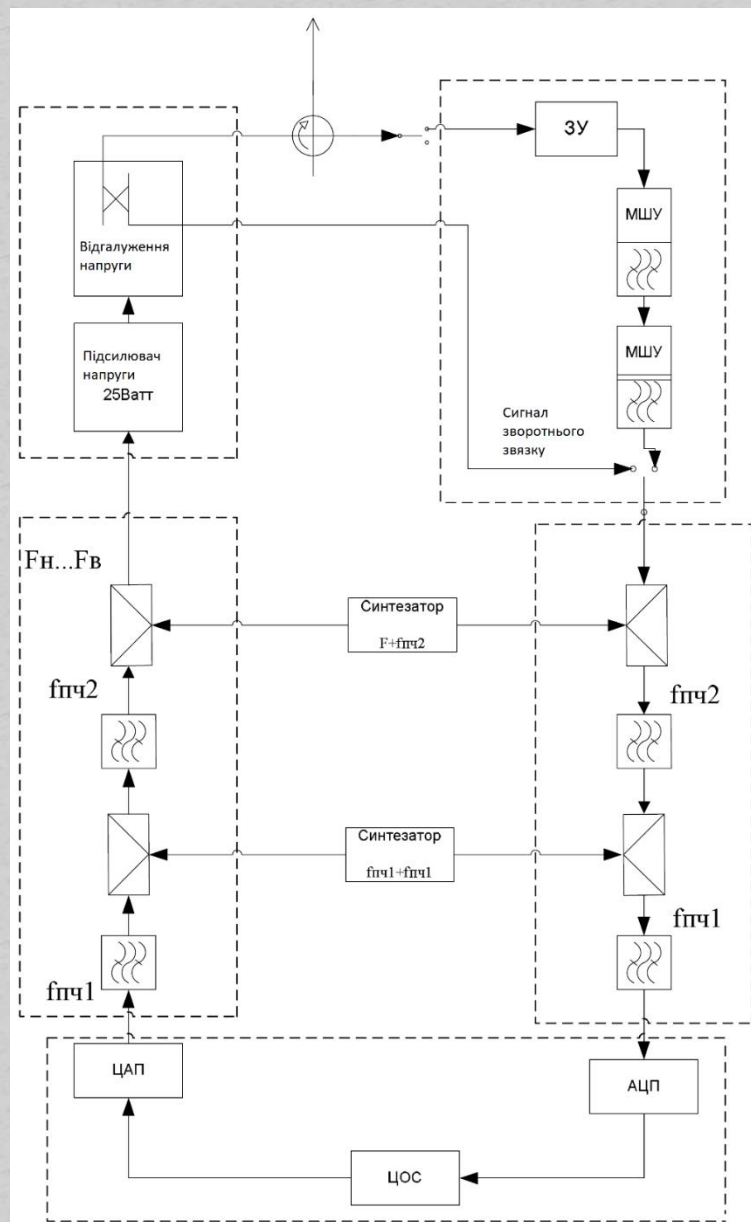


Рисунок 7 – Структурна схема радіомодема

# ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОГО КОРИГУВАННЯ

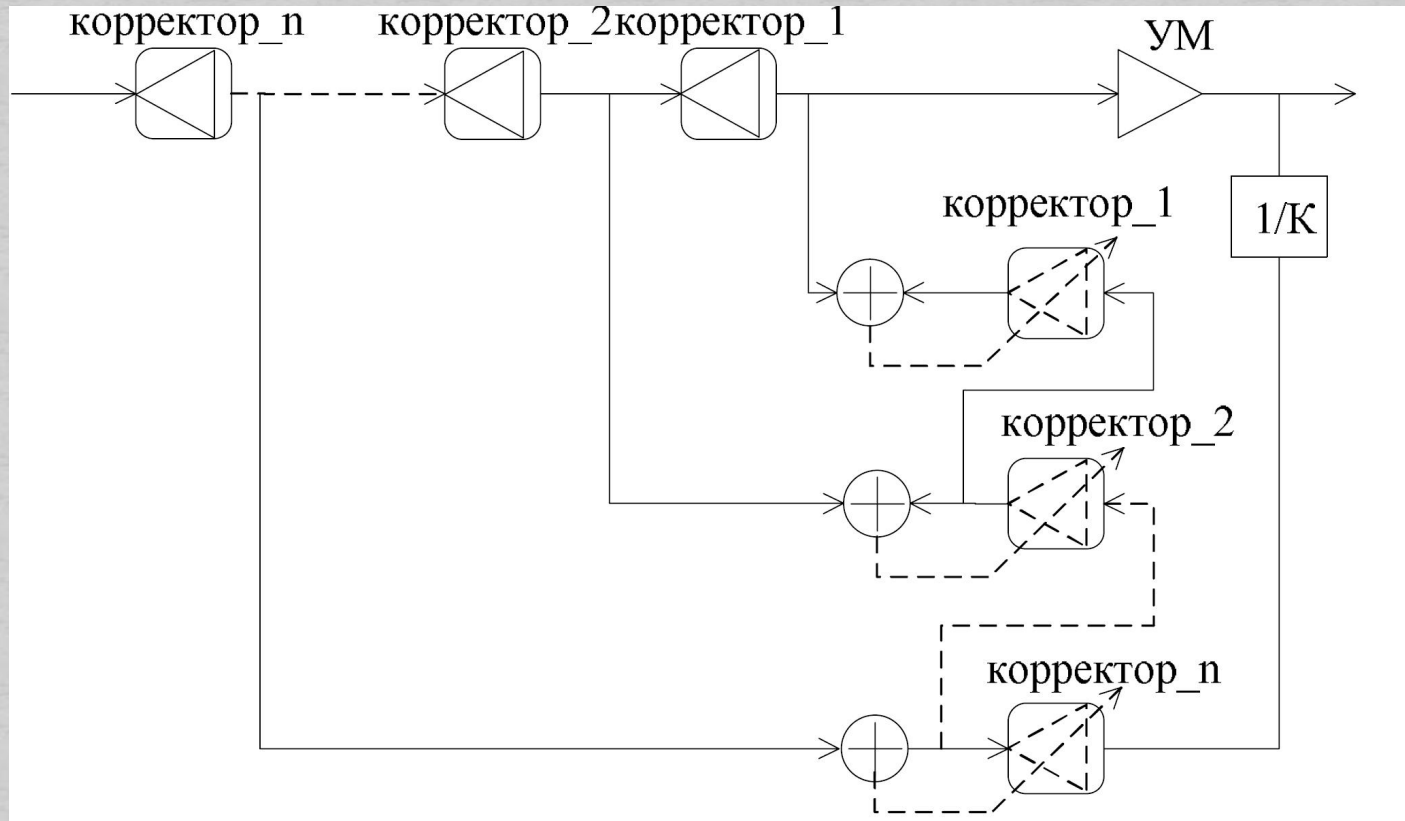


Рисунок 8 – Структурна схема системи з багатокаскадним коректором

# ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ЦИФРОВОГО КОРИГУВАННЯ

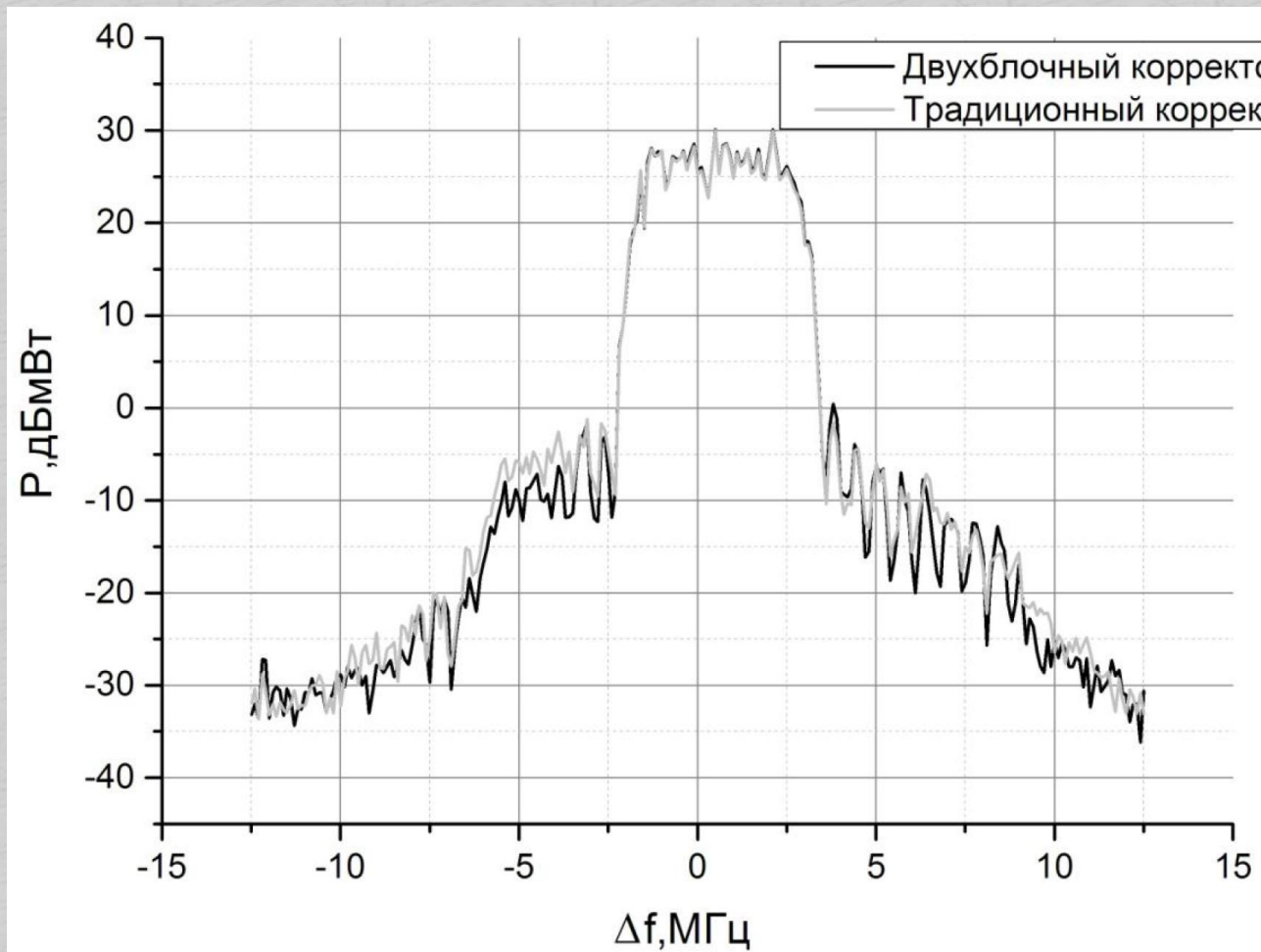


Рисунок 9 – Спектр сигнала на виході модему з коректором



# ВИСНОВОК

Таким чином, в роботі проведено ряд теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на збільшення лінійності передавального тракту систем зв'язку.

1. Запропоновано модифікований цифровий коректор для систем зв'язку з ППРЧ. Вироблені критерії та надано рекомендації щодо визначення структури даного коректора. В результаті практичного випробовування позасмугове випромінювання вихідного сигналу в сусідньому каналі зменшилася на 6-8 дБ, а рівень EVM знизився більш ніж в два рази.

2. В якості алгоритмів адаптації використовувалися метод стохастичного градієнта і рекурсивний метод найменших квадратів. За допомогою математичного моделювання підтверджена справедливість аналітичних співвідношень.

3. Проведено порівняльний аналіз різних безструктурних моделей з точки зору точності моделювання і кількості необхідних параметрів для різних видів вхідних сигналів і ширини їх смуги.

4. Проведено порівняльний аналіз коректорів, побудованих на основі безструктурних моделей, з точки зору ефективності лінеаризації і складності програмної реалізації

5. Розроблено програмно-апаратний вимірювальний комплекс для автоматизованого вимірювання нелінійних динамічних характеристик передавальної системи та розрахунку параметрів моделей НВЧ підсилювача потужності і цифрового коректора.

В розділі економіки було оцінено економічний потенціал підвищення лінійності передавального тракту телекомунаційних радіосистем за рахунок вдосконалення методів цифрових корегувань, а також аналіз ефективності роботи нелінійних динамічних систем передачі, який виявився на вище середньому рівні. Порівняння нової розробки з аналогом показало, що новий виріб буде набагато краще за аналог по технічним показникам.

В розділі з ОП було опрацьовано такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок допустимої довжини провідника (антени), при якій напруженість електричного поля на робочому місці знаходиться в межах норми, технічні рішення з безпеки при проведенні удосконалення методів корегування надвисокочастотних трактів цифрових систем зв'язку, безпека в надзвичайних ситуаціях.