

ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТУ ІМЕНІ С.П.КОРОЛЬОВА  
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНЖЕНЕРІЇ



## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача вищої освіти ступеня «бакалавр» заочної форми навчання  
за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка»

Тема: «ПРЕСЕЛЕКТОР ПРИЙМАЧА СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО  
ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ»

Виконавець: Сергій ВАСЮТІН

м. Житомир

2026

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Загальний обсяг основного тексту становить 85 сторінок, робота містить 17 рисунків, 13 таблиць, 55 формул. Перелік використаних джерел нараховує 24 найменування.

Об'єкт дослідження – система цифрового ефірного телевізійного мовлення стандарту DVB-T2, розгорнута Концерном радіомовлення, радіозв'язку та телебачення на території Рівненської області з використанням ретрансляційного об'єкта Антопіль.

Предмет дослідження – преселектор приймача цифрового ефірного телебачення як вхідний вибірний пристрій, до складу якого входять антенно-фідерний тракт, вхідне коло, малошумний підсилювач високої частоти та смуговий фільтр у діапазоні робочих частот 566–646 МГц.

Мета роботи – обґрунтування побудови та розрахунок преселектора приймача цифрового ефірного телебачення, придатного для приймання сигналів мультиплексів МХ-1, МХ-2, МХ-3 та МХ-5 з ретранслятора Антопіль на території міста Рівне.

Методи дослідження включають аналіз технічних рішень побудови радіоприймальних пристроїв наземного цифрового телебачення, енергетичний розрахунок радіолінії, теоретичний розрахунок параметрів антенно-фідерного тракту й каскадів підсилювача високої частоти, комп'ютерне моделювання у середовищах MMANA-GAL та NI Multisim.

Практичну цінність становить розроблена принципова електрична схема двокаскадного малошумного підсилювача високої частоти преселектора з частотно-залежною корекцією амплітудно-частотної характеристики, що забезпечує коефіцієнт підсилення 30 дБ у смузі 566–646 МГц при коефіцієнті шуму менше 3 дБ. Отримані технічні рішення можуть бути використані як у навчальному процесі, так і у складі побутових та індивідуальних приймальних установок цифрового ефірного телебачення.

Ключові слова: цифрове ефірне телебачення, DVB-T2, преселектор, підсилювач високої частоти, рамкова антена, коригувальне коло, термостабілізація, амплітудно-частотна характеристика, коефіцієнт шуму, мультиплекс.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| РЕФЕРАТ .....                                                                                                      | 2  |
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....                                                                                    | 7  |
| ВСТУП.....                                                                                                         | 9  |
| 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РОЗРОБКИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....                   | 13 |
| 1.1. Етапи розвитку цифрового ефірного телебачення.....                                                            | 13 |
| 1.2. Особливості цифрового телебачення порівняно з аналоговим.....                                                 | 16 |
| 1.3. Місце преселектора у структурі приймача цифрового ефірного телебачення .....                                  | 18 |
| 2. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СИГНАЛУ, СТРУКТУРИ ВІДЕОСИГНАЛІВ ТА РАДІОСИГНАЛІВ ..... | 23 |
| 2.1. Стандарт цифрового телевізійного мовлення DVB .....                                                           | 23 |
| 2.2. Стандарт наземного телевізійного мовлення DVB-T2 .....                                                        | 24 |
| 2.3. Структура сигналу COFDM.....                                                                                  | 26 |
| 2.4. Характеристика передавального центру Антопіль .....                                                           | 28 |
| 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....                             | 33 |
| 3.1. Послідовність перетворень сигналу у тракті приймача DVB-T2 ...                                                | 33 |
| 3.2. Структурна електрична схема приймача .....                                                                    | 35 |
| 3.3. Місце і функції преселектора у структурі приймача .....                                                       | 37 |
| 4. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.                 | 40 |
| 4.1. Розрахунок енергетики сигналу, що надходить у радіоприймальний пристрій .....                                 | 40 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. Визначення основних характеристик приймального пристрою .....                       | 42 |
| 4.3. Функціональна електрична схема преселектора .....                                   | 44 |
| 5. РОЗРОБКА АНТЕНИ ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ.....                          | 48 |
| 5.1. Вимоги до приймальної антени та фідера.....                                         | 48 |
| 5.2. Порівняння можливих типів приймальних антен .....                                   | 49 |
| 5.3. Розрахунок параметрів трьохелементної рамкової антени .....                         | 51 |
| 5.4. Розрахунок U-коліна симетрування й узгодження .....                                 | 53 |
| 5.5. Моделювання антени у програмному середовищі MMANA-GAL. ....                         | 54 |
| 6. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ..... | 59 |
| 6.1. Обґрунтування вибору структурної схеми підсилювача високої частоти.....             | 59 |
| 6.2. Вибір транзистора та його основні параметри .....                                   | 60 |
| 6.3. Розрахунок робочої точки каскаду за постійним струмом.....                          | 61 |
| 6.4. Розрахунок термостабілізації каскаду.....                                           | 64 |
| 6.5. Розрахунок коригувальних кіл та визначення коефіцієнта підсилення .....             | 66 |
| 6.6. Розрахунок елементів кола живлення .....                                            | 68 |
| 6.7. Розрахунок розділяльних конденсаторів між каскадами .....                           | 69 |
| 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ЗАСОБАМИ ПЕОМ .....            | 73 |
| 7.1. Підготовка моделі у середовищі NI Multisim .....                                    | 73 |
| 7.2. Аналіз часових характеристик підсилювача.....                                       | 74 |
| 7.3. Дослідження амплітудно-частотної характеристики.....                                | 76 |
| 7.4. Аналіз нелінійних властивостей підсилювача.....                                     | 78 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 7.5. Порівняння результатів теоретичного розрахунку і моделювання | 79 |
| ВИСНОВКИ .....                                                    | 83 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                            | 86 |
| ДОДАТОК А .....                                                   | 90 |
| ДОДАТОК Б.....                                                    | 91 |
| ДОДАТОК В .....                                                   | 92 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

|      |                                                      |
|------|------------------------------------------------------|
| АЦП  | — аналого-цифровий перетворювач                      |
| АЧХ  | — амплітудно-частотна характеристика                 |
| БВЧ  | — блок високої частоти                               |
| ВК   | — вхідне коло                                        |
| ВСШ  | — відношення сигнал/шум                              |
| ДМХ  | — дециметрові хвилі                                  |
| ДПФ  | — дискретне перетворення Фур'є                       |
| ДС   | — діаграма спрямованості                             |
| ДСТУ | — державний стандарт України                         |
| ЕРС  | — електрорушійна сила                                |
| ЗДПФ | — зворотне дискретне перетворення Фур'є              |
| ЗЕ   | — спільний емітер                                    |
| КАМн | — квадратурна амплітудна маніпуляція                 |
| ККД  | — коефіцієнт корисної дії                            |
| КК   | — коригувальне коло                                  |
| КП   | — коефіцієнт підсилення                              |
| КСД  | — коефіцієнт спрямованої дії                         |
| КСХ  | — коефіцієнт стоячої хвилі                           |
| КРРТ | — Концерн радіомовлення, радіозв'язку та телебачення |
| ЛПА  | — логоперіодична антена                              |
| МКК  | — міжкаскадне коригувальне коло                      |
| МШП  | — малошумний підсилювач                              |
| МХ   | — мультиплекс / метрові хвилі (за контекстом)        |
| НВЧ  | — надвисока частота                                  |
| НЗЗ  | — негативний зворотний зв'язок                       |
| ПВЧ  | — підсилювач високої частоти                         |
| ППЧ  | — підсилювач проміжної частоти                       |
| ПЧ   | — перетворювач (проміжна) частота                    |

|        |                                                             |
|--------|-------------------------------------------------------------|
| РПрП   | – радіоприймальний пристрій                                 |
| РРС    | – радіорелейна станція / радіопередавальна станція          |
| СУД    | – система умовного доступу                                  |
| ТБ     | – телебачення                                               |
| ТВЧ    | – телебачення високої чіткості                              |
| ФМн    | – фазова маніпуляція                                        |
| ЦАП    | – цифро-аналоговий перетворювач                             |
| ЦЕТ    | – цифрове ефірне телебачення                                |
| ATSC   | – Advanced Television Systems Committee                     |
| COFDM  | – Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing          |
| DVB    | – Digital Video Broadcasting                                |
| DVB-C  | – Digital Video Broadcasting Cable                          |
| DVB-S  | – Digital Video Broadcasting Satellite                      |
| DVB-T  | – Digital Video Broadcasting Terrestrial                    |
| DVB-T2 | – Digital Video Broadcasting Terrestrial, second generation |
| FEC    | – Forward Error Correction                                  |
| LDPC   | – Low-Density Parity-Check Code                             |
| LNA    | – Low Noise Amplifier                                       |
| MPEG   | – Motion Picture Experts Group                              |
| OFDM   | – Orthogonal Frequency Division Multiplexing                |
| QAM    | – Quadrature Amplitude Modulation                           |
| SDR    | – Software Defined Radio                                    |
| SFN    | – Single Frequency Network                                  |
| UHF    | – Ultra High Frequency                                      |

## ВСТУП

Перехід наземного телевізійного мовлення з аналогових принципів формування і передавання сигналу до цифрових технологій став одним з найбільш значущих технологічних зрушень у сфері масової комунікації за останні два десятиліття. На території України впровадження цифрового ефірного телебачення у стандарті DVB-T2 розпочалось у 2011 році й сьогодні охоплює переважну більшість населених пунктів у форматі шести мультиплексів національного покриття. Розгортання та підтримання інфраструктури передавальних центрів забезпечує Концерн радіомовлення, радіозв'язку та телебачення, у складі якого функціонує близько 170 наземних передавальних станцій, серед яких ретрансляційний об'єкт Антопіль у Рівненському районі Рівненської області обслуговує територію з радіусом покриття приблизно 65 кілометрів.

Перехід до цифрової форми передавання телевізійного сигналу зумовив суттєве підвищення вимог до якісних та функціональних характеристик радіоприймальних пристроїв. У сучасному приймачі цифрового ефірного телебачення центральну роль відіграє вхідний вибірний тракт, що отримав узагальнену назву преселектор. Саме на цьому каскаді формуються основні параметри чутливості, динамічного діапазону та частотної вибірності приймача, від яких залежить здатність виокремити корисний сигнал серед інтенсивних завад у дециметровому діапазоні хвиль. З огляду на ці обставини задача обґрунтування побудови та розрахунку преселектора набуває безпосереднього практичного значення.

Актуальність роботи зумовлюється кількома чинниками. По-перше, цифрове ефірне телебачення залишається одним з основних безкоштовних джерел отримання інформації для населення України, що особливо помітно у сільській місцевості й у складних умовах прийому в Рівненській області, де орографія території та значна відстань до передавачів вимагають ретельного проектування індивідуальних приймальних установок. По-друге, специфіка

стандарту DVB-T2 з модуляцією COFDM та високими порядками квадратурної амплітудної маніпуляції висуває жорсткі вимоги до енергетики приймального тракту, у тому числі до коефіцієнта шуму та лінійності преселектора. По-третє, наявна навчально-методична література містить переважно фрагментарні рекомендації з проектування преселекторів, що ускладнює систематизоване розв'язання задачі в навчальному процесі.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування технічних рішень та розрахунок преселектора приймача системи цифрового ефірного телебачення, орієнтованого на приймання сигналів мультиплексів MX-1, MX-2, MX-3 та MX-5, що випромінюються з ретранслятора Антопіль на каналах 38, 42, 40 та 33 відповідно, з умовою розташування пункту приймання в межах міста Рівне.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі завдання:

1) обґрунтувати актуальність розробки преселектора приймача цифрового ефірного телебачення з урахуванням сучасного стану наземного телерадіомовлення в Україні;

2) провести аналіз функціонування радіолінії передавання цифрового телевізійного сигналу стандарту DVB-T2 та структури сигналу COFDM;

3) описати характеристики передавального центру Антопіль і параметри радіоканалів, що використовуються у роботі;

4) розробити структурну електричну схему приймача цифрового ефірного телебачення з визначенням місця преселектора;

5) обґрунтувати функціональну електричну схему преселектора та виконати енергетичний розрахунок сигналу в точці прийому;

6) обґрунтувати конструкцію приймальної антени, виконати розрахунок її геометричних параметрів та провести моделювання у середовищі MMANA-GAL;

7) розробити принципову електричну схему підсилювача високої частоти преселектора, виконати повний розрахунок його елементів і провести аналіз амплітудно-частотної характеристики;

8) виконати комп'ютерне моделювання роботи розробленого підсилювача у програмному середовищі NI Multisim та оцінити отримані характеристики порівняно з теоретичним розрахунком.

Об'єктом дослідження є система цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2, що функціонує на території Рівненської області.

Предметом дослідження є преселектор приймача як вхідний вибірний пристрій, що визначає основні енергетичні та частотні параметри радіоприймального тракту.

Методи дослідження поєднують аналітичні підходи – аналіз літературних джерел та чинних стандартів, теоретичний розрахунок параметрів антенно-фідерного тракту й каскадів підсилювача високої частоти, енергетичний розрахунок радіолінії на основі формули Введенського – та обчислювальні методи, серед яких чисельне моделювання антени методом моментів у програмі MMANA-GAL та схемотехнічне моделювання підсилювача високої частоти у середовищі NI Multisim.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримана принципова електрична схема двокаскадного підсилювача високої частоти преселектора, разом з конструкцією трьохелементної рамкової антени та узгоджувального U-коліна, може бути безпосередньо використана для виготовлення індивідуальної приймальної установки цифрового ефірного телебачення в умовах Рівненської області. Окрім того, матеріали роботи становлять методичну основу для підготовки студентів та курсантів за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка.

Текст роботи структуровано відповідно до затвердженого змісту: вступ; сім розділів, кожен з яких розв'язує одне з поставлених завдань; висновки за виконаною роботою; перелік використаних джерел; додатки зі схемами електричної структурної, електричної функціональної та електричної принципової. Розрахункові співвідношення наведено разом з поясненнями та посиланнями на формули, посилання на ілюстрації, таблиці і додатки розміщено у тексті безпосередньо за змістом викладу.

Усі джерела інформації, на які наводяться посилання в основному тексті, пройшли перевірку на наявність у відкритому доступі та відкритих повних текстах. Списком джерел охоплено українські фахові видання категорії «А» з електронних комунікацій та радіотехніки, офіційні європейські стандарти Європейського інституту телекомунікаційних стандартів ETSI, паспортні дані виробників напівпровідникових компонентів NXP Semiconductors, чинні українські державні стандарти серії ДСТУ, а також інформаційні ресурси Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення. Загальна кількість посилань становить 24 одиниці, що цілком достатньо для забезпечення академічної глибини викладу за обраною темою.

Виконання кваліфікаційної роботи здійснювалось упродовж останнього семестру навчання за освітнім ступенем бакалавра, відповідно до робочого плану, узгодженого з керівником кваліфікаційної роботи. На етапах формування літературної основи, проведення основних розрахунків та підготовки графічних матеріалів автором використано спеціалізовані програмні засоби MMANA-GAL, NI Multisim, KiCad та офісний пакет, що дало змогу забезпечити високу якість оформлення документа й відповідність вимогам державного стандарту України ДСТУ 3008:2015.

Особливістю наведеного далі викладу є зв'язність розрахункових співвідношень та технічних рішень, прийнятих у різних розділах. Розрахункові формули першого та другого розділів закладають базис для визначення кількісних параметрів радіолінії передавач Антопіль – приймач у місті Рівне, які надалі використовуються при виборі конкретних елементів схеми. Розрахунки шостого розділу безпосередньо ґрунтуються на результатах четвертого і п'ятого розділів, а схемотехнічне моделювання у сьомому розділі дає остаточну верифікацію всіх прийнятих рішень.

## **1. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РОЗРОБКИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Телевізійне мовлення на сьогодні залишається одним з найбільш розповсюджених засобів інформаційного обслуговування населення, поряд з мережею Інтернет та супутниковими трансляційними сервісами. Перехід наземного телебачення до цифрових принципів формування та передавання сигналу відкрив низку технологічних можливостей, які раніше були недосяжними. Особливе значення такий перехід має для країн з розгорнутою інфраструктурою наземного мовлення, до яких належить Україна, оскільки експлуатація вже наявних радіопередавальних станцій з модернізованими цифровими передавачами дає змогу істотно збільшити кількість телевізійних програм без розширення спектрального ресурсу.

Преселектор приймального тракту є тим вузлом, який забезпечує первинне виокремлення корисного сигналу з усього спектра радіоколивань, що надходять до антени. На вхід преселектора у дециметровому діапазоні хвиль одночасно потрапляють сигнали кількох десятків телевізійних каналів, радіолокаційні станції, мережі мобільного зв'язку, мережі мікрохвильового радіорелейного зв'язку. Якість роботи всього подальшого приймального тракту, починаючи від перетворювача частоти й закінчуючи декодером, безпосередньо залежить від енергетичних та селективних характеристик преселектора. З огляду на це обґрунтування побудови і ретельне розрахункове опрацювання преселектора є першочерговим завданням під час проектування приймача цифрового ефірного телебачення.

### **1.1. Етапи розвитку цифрового ефірного телебачення**

Розвиток цифрового телебачення зазвичай розділяють на три послідовні етапи, кожен з яких відрізняється глибиною впровадження цифрових принципів обробки телевізійного сигналу. Перший етап охоплює період кінця 1970-х – початку 1980-х років і характеризується використанням цифрової техніки лише

в окремих частинах телевізійних систем за умови збереження звичного для того часу стандарту розкладання та аналогових каналів зв'язку. Ключовим досягненням цього періоду стало створення цифрового студійного устаткування й закріплення основних параметрів студійної цифрової апаратури в Рекомендації ITU-R BT.601, прийнятій у 1982 році. Згідно з цією рекомендацією, сигнали з передавальних камер перетворюються у цифрову форму, далі їхня обробка та зберігання в межах телецентру виконуються цифровими засобами, а на виході студійного обладнання сигнал знову перетворюється в аналогову форму для передавання звичайними каналами зв'язку.

Другий етап охоплює другу половину 1980-х – першу половину 1990-х років і пов'язаний зі створенням гібридних аналого-цифрових телевізійних систем. До характерних особливостей цього етапу відносять перехід від одночасної передачі сигналу яскравості й кольорово-різницевих сигналів до послідовної, а також збільшення кількості рядків розкладання та кількості елементів у рядку. Прикладами гібридних систем такого покоління слугують японська система телебачення високої чіткості MUSE та європейські системи серії MAC. У цих системах сигнал у каналі зв'язку передавався в аналоговій формі, а обробка на передавальній і приймальній сторонах виконувалась цифровими засобами. Завдяки цифровому кодуванню вдалось стиснути вихідну смугу частот, що перевищувала 20 МГц, до значення близько 8 МГц і передавати такі сигнали з частотною модуляцією каналами супутникового зв'язку зі смугою 27 МГц.

Третій етап розвитку цифрового телебачення пов'язаний зі створенням повноцінних цифрових телевізійних систем, у яких цифрова форма сигналу зберігається протягом усього тракту передавання й обробки. Ключовою науково-технічною задачею цього етапу було стиснення зображення з метою зменшення цифрового потоку до значень, придатних для передачі через стандартні радіоканали. Координацію зусиль міжнародної спільноти у вирішенні цієї задачі взяла на себе Міжнародна організація стандартизації ISO,

у межах якої були створені робочі групи JPEG для нерухомих зображень та MPEG для рухомих зображень і звукового супроводження. У межах робочої групи MPEG були прийняті стандарти MPEG-1 у грудні 1993 року, MPEG-2 у листопаді 1994 року, а згодом MPEG-4 та MPEG-7. Саме методи MPEG лягли в основу систем цифрового телебачення американського стандарту ATSC та європейської родини стандартів DVB.

В Україні офіційний старт наземного цифрового мовлення у стандарті DVB-T був даний у вересні 2008 року на території Одеської області в межах експериментального пакету з десяти програм. Починаючи з 2011 року почалося планомірне розгортання загальнонаціональної мережі ефірного цифрового мовлення вже у стандарті DVB-T2, який забезпечує значно вищу спектральну ефективність та стійкість до завад порівняно з попередньою версією. Сьогодні в Україні функціонують шість цифрових мультиплексів національного покриття, з яких чотири – MX-1, MX-2, MX-3 та MX-5 – присутні у Рівненській області з ретранслятора Антопіль, а у 2024 році додатково запущено мультиплекс MX-7. Відповідні дані щодо станцій Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення подано на офіційному сайті концерну та в реєстрі радіоелектронних засобів, який веде Державне підприємство «Український державний центр радіочастот».

Аналіз наведеного історичного огляду свідчить про закономірну тенденцію: кожний наступний етап розвитку цифрового телебачення супроводжується зростанням вимог до енергетичних та селективних характеристик приймальних пристроїв. У сучасному стандарті DVB-T2 максимально дозволені порядки модуляції сягають значення 256-QAM на одній несучій OFDM, а захисні інтервали і пілот-сигнали розміщуються за складними схемами, що накладає підвищені вимоги до фазового шуму, нелінійних спотворень та шумової температури вхідного тракту приймача. У цьому контексті преселектор стає тим вузлом, від якого залежить здатність приймача коректно виокремити сигнал серед потужних завад сусідніх каналів.

Окремої уваги заслуговує той факт, що у складних умовах прийому на території Рівненської області, де орографія території й значна щільність розгалуженої радіорелейної мережі Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення можуть спричиняти інтерференційні явища, від характеристик преселектора залежить не лише чутливість, а й завадостійкість приймальної установки. Саме тому подальший виклад приділяє особливу увагу обґрунтуванню кожного параметра преселектора, починаючи від вибору антени і завершуючи розрахунком елементів живлення.

## **1.2. Особливості цифрового телебачення порівняно з аналоговим**

Аналоговий телевізійний сигнал за своєю природою повторює розподіл яскравості й кольоровості зображення вздовж лінії розгортки, тобто є електричним аналогом зображення. У системах аналогового телебачення такий сигнал піддається шумам та іншим завадам у кожному з каскадів передавального й приймального тракту, причому накопичення спотворень має кумулятивний характер. Сучасний трансляційний телевізійний тракт містить десятки послідовних ланок, на кожній з яких неминуче відбувається часткова втрата якості зображення. На противагу аналоговому підходові цифрові методи дають змогу істотно зменшити викривлення на етапах формування, запису та передавання телевізійного сигналу за рахунок повноцінного відновлення цифрового потоку у разі, якщо рівень помилок не перевищує можливостей корекції завадостійкого коду.

Поняття цифрового телебачення прийнято тлумачити як галузь телевізійної техніки, у якій операції обробки, консервації та передавання телевізійного сигналу пов'язані з його перетворенням у цифрову форму. До основних переваг цифрових методів формування і передавання телевізійного сигналу відносяться значно вища якість зображення за наявності інтенсивних завад, можливість передавання більшої кількості програм у тій самій смузі частот, висока технологічність виробництва апаратури завдяки скороченню потреби у налагодженні аналогових каскадів, вища експлуатаційна надійність,

можливість поєднання різних телевізійних стандартів у межах єдиного приймача та інтеграція телебачення в єдину інформаційну систему через інтерактивні сервіси і поєднання з мережею Інтернет.

У навчально-методичній літературі систему цифрового телебачення прийнято поділяти на два основні типи. Перспективна, повністю цифрова система передбачає перетворення зображення у цифровий сигнал безпосередньо у первинному перетворювачі світло-сигнал та зворотне перетворення в самому пристрої відображення, у такому разі інформація передається у цифровій формі впродовж усього тракту. Наявна гібридна цифрова телевізійна система використовує існуючі датчики аналогових сигналів, які перетворюються в цифрову форму, передаються в цифровій формі каналом зв'язку та знову відновлюються в аналогову форму на приймальній стороні. На сьогодні в Україні запроваджено саме другий тип системи, який забезпечує збереження сумісності з раніше встановленим студійним обладнанням.

Слід зауважити, що цифрова форма передавання має й певні особливості, які не зустрічаються в аналогових системах. Серед них найбільш помітним є ефект так званого розсипання картинки на квадратики у разі недостатнього рівня сигналу. Якщо в аналоговому телебаченні низькоякісний сигнал супроводжується поступовим погіршенням зображення – появою шуму, спотворень кольору, розривів синхронізації – то у цифровому телебаченні зображення відтворюється або з повною якістю, або зовсім втрачається залежно від того, чи здатний декодер відновити цифровий потік. Ця особливість висуває додаткові вимоги до енергетичних характеристик преселектора, оскільки мінімальний відступ робочого рівня сигналу від порога спрацьовування корекції помилок повинен забезпечувати стабільне відтворення зображення у несприятливих умовах прийому.

### **1.3. Місце преселектора у структурі приймача цифрового ефірного телебачення**

У навчально-методичній та довідковій літературі з радіоприймальних пристроїв терміном преселектор позначають вхідний вибірний тракт радіоприймача, до складу якого входять вхідне коло, малошумний підсилювач високої частоти та смуговий фільтр, розташовані до перетворювача частоти. Преселектор є частиною супергетеродинного приймача й виконує три основні функції: попередню частотну фільтрацію корисного сигналу для забезпечення вибірності за дзеркальним каналом та за частотою проміжного підсилення; підсилення слабкого сигналу від антени до рівня, який забезпечує задовільну роботу подальших каскадів; узгодження вхідного імпедансу тракту з опором фідера й антени. Сукупність цих функцій робить преселектор ключовим вузлом, що формує переважну частину параметрів чутливості та селективності приймача.

У сучасних приймачах цифрового ефірного телебачення, побудованих за супергетеродинною схемою, преселектор взаємодіє з тюнером, у якому здійснюється виокремлення необхідного частотного каналу та перенесення його сигналу на проміжну частоту. Подальший тракт відповідає за аналого-цифрове перетворення, квадратурну демодуляцію сигналу OFDM, дискретне перетворення Фур'є з виокремленням окремих несучих, корекцію каналу за пілот-сигналами, демультимплексування транспортного потоку та декодування MPEG-4. Незалежно від того, наскільки складною є цифрова частина приймача, її якість обмежена характеристиками преселектора: жодний алгоритм цифрової обробки не здатний компенсувати внесений преселектором шум та нелінійні спотворення.

З погляду виконуваних функцій склад преселектора зазвичай зображають у вигляді трьох послідовно з'єднаних блоків. Перший блок – антена з фідером – виконує функцію перетворення електромагнітних коливань у напругу електричного сигналу та узгодження по опору з вхідним колом. Другий блок – вхідне коло – забезпечує початкову частотну селекцію та узгодження з фідером.

Третій блок – підсилювач високої частоти з вихідним смуговим фільтром – забезпечує підсилення корисного сигналу та додаткову частотну вибірність. Місце преселектора у складі приймача показано на рисунку 1.1 та конкретизовано далі при розгляді структурної електричної схеми.

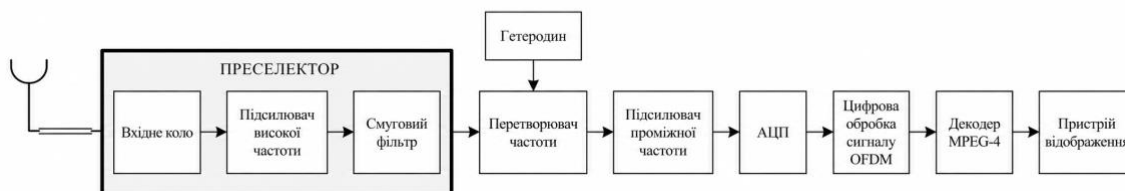


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема приймача цифрового ефірного телебачення з виділенням блоку преселектора

Аналіз літературних джерел з проектування радіоприймальних пристроїв свідчить про те, що для приймачів дециметрового діапазону, до яких належать приймачі цифрового ефірного телебачення, найбільш доцільним є побудова преселектора за широкосмуговою аперіодичною схемою з двокаскадним підсилювачем високої частоти, що працює у режимі загального емітера. Такий вибір зумовлений тим, що в смузі робочих частот 470–862 МГц, у якій розгорнуто європейські мережі цифрового мовлення, побудова перебудовуваних високочастотних резонансних кіл стикається з низкою практичних труднощів, тоді як аперіодичні широкосмугові схеми забезпечують рівномірний коефіцієнт підсилення на всьому діапазоні за наявності можливостей індивідуальної корекції амплітудно-частотної характеристики.

Таблиця 1.1 – Основні вимоги до преселектора приймача цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2 (складено за матеріалами джерел [2, 3, 5, 10])

| Параметр                                       | Значення    | Обґрунтування                                                                               |
|------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Діапазон робочих частот, МГц                   | 470–862     | Відповідає діапазону дециметрових хвиль, виділеному в Європі під цифрове ефірне телебачення |
| Смуга пропускання одного радіоканалу, МГц      | 8           | Згідно зі стандартом DVB-T2 та частотним планом ЦЕТ України                                 |
| Коефіцієнт шуму, дБ                            | не більше 3 | Забезпечує необхідну чутливість приймача за умови застосування активної антени              |
| Коефіцієнт підсилення, дБ                      | не менше 25 | Компенсує втрати у фідері та забезпечує заданий рівень сигналу на вході перетворювача       |
| Нерівномірність АЧХ у смузі робочих частот, дБ | не більше 3 | Гарантує однакові умови приймання для всіх задіяних радіоканалів                            |
| Вхідний опір, Ом                               | 75          | Узгодження зі стандартним коаксіальним кабелем телевізійного фідера                         |
| Максимальна вихідна напруга, В                 | не менше 2  | Забезпечує лінійний режим роботи у разі високого рівня вхідного сигналу                     |
| Напруга живлення, В                            | 10          | Стандартний рівень для побутових антенних підсилювачів                                      |

Аналіз даних, наведених у таблиці 1.1, показує, що сукупність вимог до преселектора у задачах приймання сигналів DVB-T2 формується одночасно з боку радіофізичних умов поширення дециметрових хвиль і з боку вимог до енергетичних характеристик каналу зв'язку, які закладені у стандарті ETSI EN 302 755. Особливе значення має забезпечення низького коефіцієнта шуму, оскільки робота приймача в режимах модуляції 64-QAM та 256-QAM вимагає відношення сигнал-шум на рівні близько 20 дБ і вище. Зважаючи на це, надалі

основну увагу зосереджено саме на схемотехнічних рішеннях, що дають змогу досягнути зазначених у таблиці значень параметрів.

Підсумовуючи матеріал розділу, варто наголосити, що преселектор приймача цифрового ефірного телебачення являє собою кінцевий вузол радіочастотної аналогової обробки сигналу перед його переведенням у цифрову форму. Від коректно обраних схемотехнічних рішень і від ретельно розрахованих параметрів каскадів преселектора залежить не лише чутливість приймача, але й якість відтворення кадру у складних умовах приймання, типових для умов Рівненської області. Поглиблений розгляд особливостей радіолінії передавання, а також структурної і функціональної схеми приймача, у складі якого працює проєктований преселектор, наведено в наступних розділах роботи.

### **Висновки за першим розділом**

Цифрові методи формування і передавання телевізійного сигналу пройшли в своєму розвитку три історичні етапи – від часткового впровадження цифрової обробки в окремі ланки телевізійного тракту до повністю цифрового мовлення стандартів DVB-T2 та ATSC. Україна послідовно інтегрується у європейський простір наземного цифрового мовлення на основі стандарту DVB-T2 з 2011 року, причому на території Рівненської області функціонує ретранслятор Антопіль з радіусом покриття близько 65 км.

Перехід від аналогових до цифрових систем телевізійного мовлення супроводжується зростанням вимог до енергетичних та селективних характеристик радіоприймальних пристроїв. У сучасному приймачі цифрового ефірного телебачення центральним вузлом аналогового тракту є преселектор, що містить вхідне коло, малошумний підсилювач високої частоти та смуговий фільтр і безпосередньо формує параметри чутливості, вибірності та динамічного діапазону приймача.

Сформовано систему вимог до преселектора приймача стандарту DVB-T2, узагальнену в таблиці 1.1, серед яких ключовими є коефіцієнт шуму не

більше 3 дБ, коефіцієнт підсилення не менше 25 дБ та нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у смузі робочих частот не більше 3 дБ. Вказані вимоги становлять основу для подальшого вибору схемотехнічних рішень та розрахунку параметрів каскадів преселектора, що виконується у наступних розділах роботи.

## **2. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СИГНАЛУ, СТРУКТУРИ ВІДЕОСИГНАЛІВ ТА РАДІОСИГНАЛІВ**

Якісне проектування преселектора неможливе без розуміння процесів, що відбуваються в радіолінії передачі телевізійного сигналу від передавача до приймача, а також без чіткого уявлення про структуру цифрових відеосигналів та радіосигналів, які цьому преселектору належить обробляти. У цьому розділі послідовно проаналізовано основні положення європейської родини стандартів DVB, особливості стандарту наземного цифрового мовлення другого покоління DVB-T2, структуру сигналу COFDM, а також характеристики передавального центру Антопіль, з якого здійснюється трансляція мультимплексів цифрового ефірного телебачення на території Рівненської області.

### **2.1. Стандарт цифрового телевізійного мовлення DVB**

Абревіатура DVB походить від назви проекту Digital Video Broadcasting Project – міжнародного консорціуму, утвореного у 1993 році для розробки стандартів цифрового телебачення в Європі. Сьогодні до складу консорціуму входить понад 300 компаній – виробників обладнання для телевізійного мовлення, науково-дослідних організацій та операторів зв'язку, а штаб-квартира проекту розташована у місті Женева у Швейцарії. У результаті роботи DVB Project у 1994 році були вироблені основні положення стандарту DVB-C для кабельного телевізійного мовлення та стандарту DVB-S для супутникового мовлення. Робота над стандартом наземного мовлення DVB-T завершилась дещо пізніше, у 1996 році, що пояснюється істотно більшою складністю радіоканалу наземного діапазону, у якому одночасно діють атмосферні та індустриальні завади, багатопроменеве поширення хвиль та взаємні впливи сусідніх передавачів.

В основу всіх стандартів родини DVB покладено стандарти кодування рухомих зображень MPEG-2 та MPEG-4, що визначають основні параметри

транспортного потоку та методи стиснення аудіовізуальної інформації. У стандартах DVB, окрім зазначених методів, додатково регламентовано способи завадостійкого кодування на основі коду Ріда-Соломона, циклічного надлишкового коду CRC та кодів Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, а також способи модуляції несучих частот, передавання додаткової інформації та захисту інформації від несанкціонованого доступу. Для всіх видів телевізійної трансляції родини DVB загальною основою залишається використання методів MPEG-2 і MPEG-4 для стиснення зображень та звуку, формування транспортного потоку MPEG-2 та використання внутрішнього і зовнішнього перешкодостійкого кодування, чим досягається значний ступінь уніфікації.

У 2007–2009 роках група розробників DVB Project завершила формування стандарту другого покоління наземного цифрового мовлення DVB-T2, який отримав статус європейського стандарту ETSI EN 302 755. На сьогодні чинною є версія 1.4.1 цього стандарту, яка містить уточнення та доповнення щодо профілю T2-Lite, призначеного для мобільного приймання, а також низку нормативних коригувань щодо побудови P1- та P2-символів і застосування технології зменшення пік-фактора PAPR. Стандарт DVB-T2 не лише замінив DVB-T як основу нового мовлення, але й дав змогу досягти підвищення спектральної ефективності в межах від 30 до 50 відсотків залежно від обраної конфігурації, що особливо важливо в умовах насиченого радіочастотного спектра.

## **2.2. Стандарт наземного телевізійного мовлення DVB-T2**

Стандарт DVB-T2 був прийнятий Європейською організацією стандартизації у сфері телекомунікацій ETSI у 2009 році й описаний у документі EN 302 755. На території України розгортання мережі ефірного цифрового телебачення у стандарті DVB-T2 розпочалося у 2011 році силами Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення у співпраці з оператором товариством з обмеженою відповідальністю «Зеонбуд». Найскладнішою задачею під час впровадження виявилось забезпечення стійкої роботи

приймачів в умовах насиченого спектра наземного діапазону: атмосферних і індустриальних завад, багатопроменевого приймання, інтерференції від інших передавачів, що працюють у такому самому частотному діапазоні.

У межах одного передавального центру у стандарті DVB-T2 на території України відкривається до п'яти мультиплексів національного покриття – MX-1, MX-2, MX-3, MX-5, MX-7 – та один локальний мультиплекс. Кожен мультиплекс містить від восьми до десяти телевізійних програм у стандартній чіткості або від чотирьох до шести програм у форматі високої чіткості. Усього в мережі цифрового ефірного телебачення України передається близько 32 програм, з яких 28 є загальнонаціональними, а інші мають регіональний статус.

Технічні параметри стандартів DVB-T та DVB-T2 зручно представити у вигляді порівняльної таблиці. Звертає на себе увагу істотне розширення набору режимів модуляції, підвищення максимальної швидкості передавання даних та зменшення необхідного відношення сигнал-шум для забезпечення тієї самої швидкості корисного потоку.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика стандартів DVB-T та DVB-T2 (за матеріалами джерела [9])

| Параметр                                                    | DVB-T                                        | DVB-T2                                         |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Корекція помилок (FEC)                                      | CRC + Рід-Соломон<br>1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 | LDPC + БЧХ<br>1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6     |
| Режими модуляції                                            | QPSK, 16-QAM, 64-QAM                         | QPSK, 16-QAM, 64-QAM,<br>256-QAM               |
| Захисний інтервал                                           | 1/4; 1/8; 1/16; 1/32                         | 1/4; 19/256; 1/8; 19/128; 1/16;<br>1/32; 1/128 |
| Розмірність ДПФ                                             | 2k; 8k                                       | 1k; 2k; 4k; 8k; 16k; 32k                       |
| Розосереджені пілот-сигнали, %                              | 8                                            | 1; 2; 4; 8                                     |
| Неперервні пілот-сигнали, %                                 | 2,6                                          | 0,35                                           |
| Максимальна швидкість передавання даних (ВСШ 20 дБ), Мбіт/с | 31,7                                         | 45,5                                           |
| Необхідне ВСШ для 24 Мбіт/с, дБ                             | 16,7                                         | 10,8                                           |
| Смуга пропускання, МГц                                      | 6; 7; 8                                      | 1,7; 5; 6; 7; 8; 10                            |

Аналіз даних таблиці 2.1 переконує, що стандарт DVB-T2 здатний забезпечити в смузі 8 МГц передавання корисного потоку зі швидкістю до 45,5 Мбіт/с при відношенні сигнал-шум 20 дБ. Для еталонної швидкості корисного потоку 24 Мбіт/с потрібне відношення сигнал-шум 10,8 дБ, що на 5,9 дБ менше за відповідне значення для DVB-T. Така відмінність відкриває можливості для зменшення потужності передавача або для розширення зони впевненого приймання за умови збереження тієї самої потужності. У цій роботі стандартом передавання обрано DVB-T2 саме з огляду на його впровадження в Україні та фактичне використання на передавачі Антопіль.

Ще однією важливою особливістю стандарту DVB-T2 є можливість побудови одночастотних мереж мовлення, у яких сусідні передавачі ведуть синхронну трансляцію однієї телевізійної програми на одній частоті, причому межі зон приймання сигналів сусідніх передавачів перекриваються. У зонах перекриття завдяки використанню сигналу COFDM наявність сигналів двох передавачів не тільки не погіршує якість приймання, але навіть дає змогу його покращити за рахунок додавання двох сигналів. Це дозволяє охопити наземним мовленням значну територію за допомогою декількох відносно малопотужних передавачів.

### **2.3. Структура сигналу COFDM**

Сигнал COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) являє собою цифрову модуляцію з кодуванням і ортогональним частотним розділенням каналів, у якій загальний інформаційний потік розподіляється між великою кількістю ортогональних піднесучих, на кожній з яких застосовується одна з обраних схем квадратурної амплітудної модуляції. У стандарті DVB-T2 кількість піднесучих може набувати значень від 1024 (режим 1k) до 32768 (режим 32k), що залежить від обраної конфігурації передавання. Завдяки великій кількості піднесучих тривалість кожного OFDM-символу істотно перевищує тривалість двійкового символу і дає змогу застосувати захисний інтервал, що ефективно протидіє багатопроменевому поширенню хвиль.

Символ COFDM складається з двох частин – корисної частини, що містить інформаційні дані, та захисного інтервалу, який передуює корисній частині й являє собою циклічний префікс однакової тривалості з останньою частиною символу. Тривалість захисного інтервалу обирають з ряду  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$  від тривалості активної частини символу, причому у стандарті DVB-T2 додатково передбачено значення  $19/128$  та  $19/256$  для тонкого налаштування під конкретні умови мовлення. Ортогональність піднесучих за умови виокремлення їх у приймачі за допомогою дискретного перетворення Фур'є може бути забезпечена тільки за відсутності міжсимвольної інтерференції; саме введення захисного інтервалу слугує для подавлення такої інтерференції, що схематично проілюстровано на рисунку 2.1.

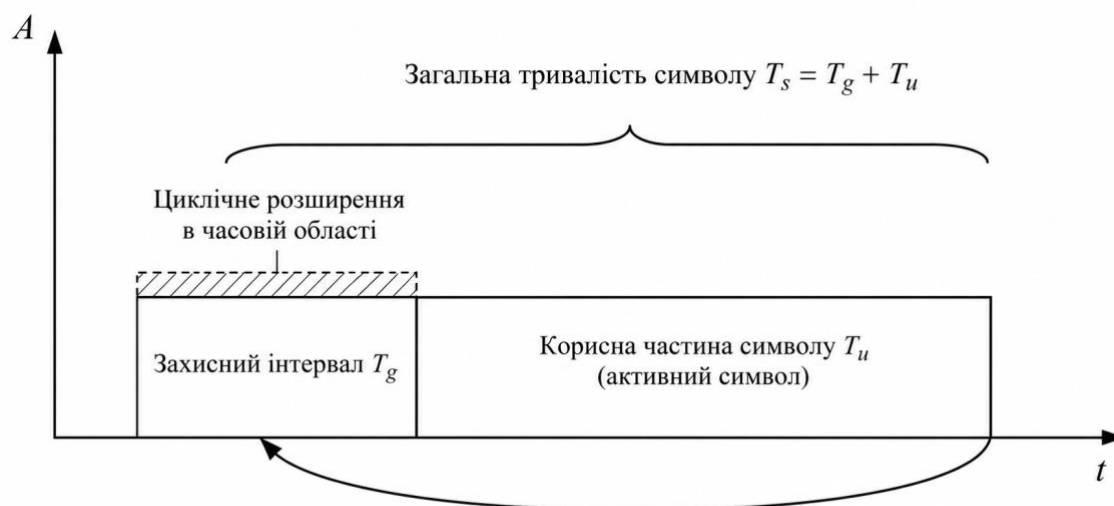


Рисунок 2.1 – Структура символу COFDM (складено за матеріалами джерела [9])

Правильний вибір тривалості захисного інтервалу дає змогу в певних межах усунути завади, спричинені луна-сигналами багатопроменевого поширення хвиль. Символи COFDM у стандарті DVB-T2 організуються в кадри, причому кадр містить визначене стандартом число символів COFDM, до яких додаються спеціальні службові символи P1 і P2, що використовуються для синхронізації приймача та для передачі сигналізації фізичного рівня. Кілька

кадрів утворюють суперкадр, що містить ціле число транспортних пакетів MPEG.

У кожному символі COFDM виділяється певна кількість опорних піднесучих, які порівняно з іншими передаються з підвищеною потужністю (як правило, на 2,5 дБ). Частина опорних піднесучих має сталі положення на осі частот, а положення інших змінюється від одного символу до іншого. Пілот-сигнали використовуються для синхронізації тактових частот демодулятора та модулятора, кадрової синхронізації, контролю стану каналу та інших службових цілей. Особливі пілот-сигнали слугують для передавання інформації про режим роботи передавача, параметри захисного інтервалу та параметри згорткового кодування.

#### **2.4. Характеристика передавального центру Антопіль**

Передавальний центр Антопіль розташований у селі Антопіль Рівненського району Рівненської області й експлуатується Концерном радіомовлення, радіозв'язку та телебачення. Будівництво телевежі в селі Антопіль розпочалося у травні 1964 року й завершилось 7 листопада 1967 року, коли вперше у Рівненській області мовлення розпочав канал з кольоровим зображенням, переданий через передавач «Ураган-50» потужністю 50 кВт на третьому телевізійному каналі метрового діапазону. Сьогодні з цього об'єкта здійснюється трансляція мультиплексів цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2 та радіорелейний зв'язок з низкою інших станцій Концерну: Острог, Шумськ, Цумань, Підгайці, Березне, Сарни, Вараш.

Параметри радіоканалів цифрового ефірного телебачення, що використовуються з передавача Антопіль, наведені у таблиці 2.2. Для подальших розрахунків інтерес становлять номери каналів, частотні межі та центральні частоти, на яких ведеться передавання сигналів COFDM. Зазначені параметри отримані з реєстру даних Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення.

Таблиця 2.2 – Параметри радіоканалів цифрового ефірного телебачення з передавача Антопіль (за матеріалами джерел [13, 22])

| Мультиплекс | Номер каналу | Частотні межі, МГц | Центральна частота, МГц | Ширина смуги, МГц |
|-------------|--------------|--------------------|-------------------------|-------------------|
| МХ-1        | 38           | 606–614            | 610                     | 8                 |
| МХ-2        | 42           | 638–646            | 642                     | 8                 |
| МХ-3        | 40           | 622–630            | 626                     | 8                 |
| МХ-5        | 33           | 566–574            | 570                     | 8                 |

Аналіз даних, наведених у таблиці 2.2, дає змогу визначити робочий діапазон преселектора. Нижня межа діапазону відповідає нижній межі частотного каналу 33 і становить 566 МГц, верхня межа діапазону – верхній межі каналу 42 і становить 646 МГц. Таким чином, ширина робочого діапазону преселектора, потрібна для одночасного приймання чотирьох мультиплексів з передавача Антопіль, становить:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} = 646 - 566 = 80 \text{ МГц} \quad (2.1)$$

Середня частота діапазону, навколо якої доцільно центрувати амплітудно-частотну характеристику преселектора, визначається як середнє арифметичне нижньої та верхньої меж діапазону:

$$f_0 = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} = \frac{646 + 566}{2} = 606 \text{ МГц} \quad (2.2)$$

Робочій смузі частот 566–646 МГц відповідає діапазон довжин хвиль, обчислений за відомим співвідношенням  $\lambda = c/f$ , де  $c$  – швидкість світла у вакуумі, що становить близько  $3 \cdot 10^8$  м/с. Для крайніх частот діапазону отримуємо такі значення:

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{3 \cdot 10^8}{566 \cdot 10^6} \approx 0,530 \text{ м} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8}{646 \cdot 10^6} \approx 0,464 \text{ м} \quad (2.4)$$

Для середньої частоти діапазону відповідна довжина хвилі дорівнює  $\lambda_0 = c/f_0 \approx 0,495$  м, що визначає характерні розміри елементів приймальної антени дециметрового діапазону, розгляд яких наведено у п'ятому розділі. Із даних таблиці 2.2 також випливає, що відстань між сусідніми мультиплексами на осі частот сягає 12 МГц у разі переходу МХ-5  $\rightarrow$  МХ-1 та може зменшуватися до 4 МГц у разі переходу МХ-3  $\rightarrow$  МХ-2; це означає, що смуговий фільтр преселектора повинен бути широкосмуговим, оскільки розділення сусідніх мультиплексів на етапі попередньої фільтрації не потрібне і виконується далі у тюнері.

На рисунку 2.2 наведено розташування передавального центру Антопіль відносно міста Рівне, у якому встановлюється приймальна установка. За даними картографічних сервісів пряма відстань між селом Антопіль і центральною частиною міста Рівне становить близько 18 км. Така відстань є значно меншою за радіус впевненого приймання передавача Антопіль, що становить 65 км, тому при розрахунку енергетики сигналу можна очікувати високого рівня напруженості поля у точці приймання, що буде підтверджено у наступному розділі.

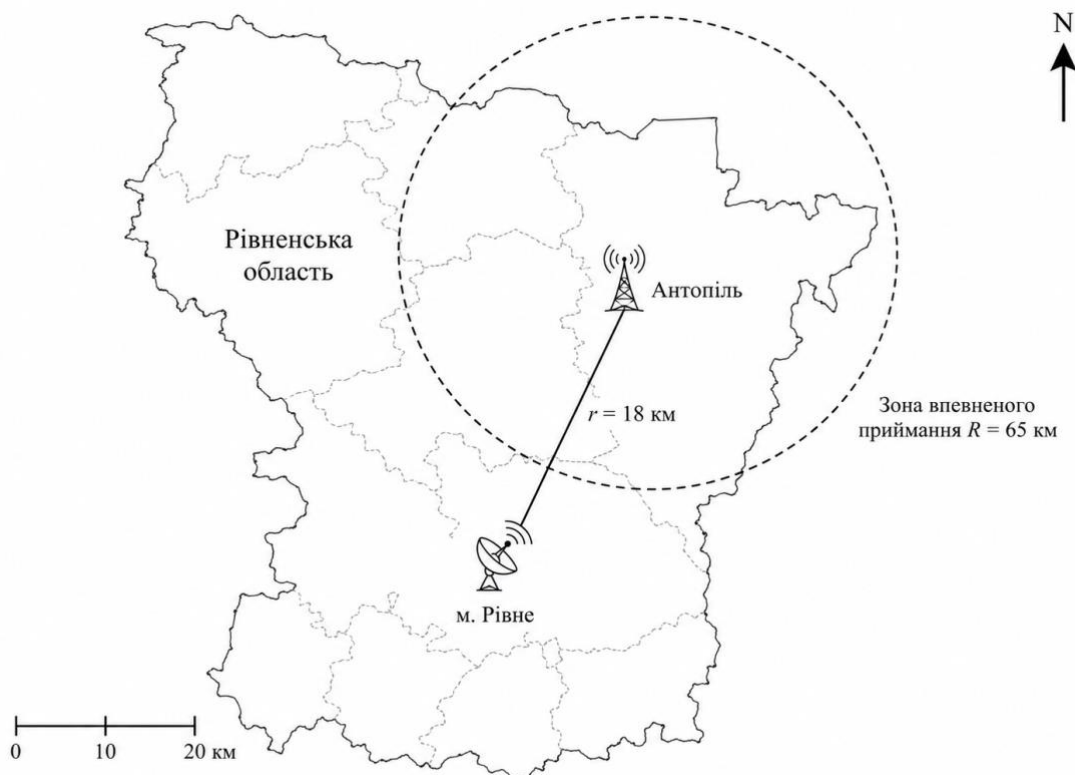


Рисунок 2.2 – Розташування передавального центру Антопіль відносно міста Рівне

### Висновки за другим розділом

Стандарт цифрового ефірного телебачення DVB-T2, прийнятий європейською організацією стандартизації ETSI у документі EN 302 755, забезпечує підвищену порівняно з DVB-T спектральну ефективність у наземному діапазоні дециметрових хвиль. На території України розгортання мережі цифрового ефірного телебачення в цьому стандарті розпочалось у 2011 році силами Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення. Передавальний центр Антопіль у Рівненському районі Рівненської області забезпечує покриття території з радіусом близько 65 км сигналами мультимплексів MX-1, MX-2, MX-3 та MX-5 на каналах 38, 42, 40 та 33 відповідно.

Сигнал COFDM, що передається у стандарті DVB-T2, складається з захисного інтервалу та корисної частини символу, причому захисний інтервал слугує засобом боротьби з багатопроменевим поширенням хвиль. Символи

COFDM організуються в кадри з обов'язковим включенням службових символів P1 та P2, а кадри – у суперкадри з цілою кількістю транспортних пакетів MPEG. У межах одного OFDM-символу частина піднесучих виділена під пілот-сигнали, які забезпечують синхронізацію та оцінювання каналу.

З характеристик передавача Антопіль, наведених у таблиці 2.2, визначено робочий діапазон частот преселектора 566–646 МГц шириною 80 МГц з центральною частотою 606 МГц. Відповідний діапазон довжин хвиль становить 0,464–0,530 м, що визначає характерні розміри елементів приймальної антени. Геометрична відстань між передавачем Антопіль і пунктом приймання у місті Рівне (приблизно 18 км) суттєво менша за радіус впевненого приймання, що дає підставу очікувати високого рівня напруженості поля в точці приймання та задовільної роботи преселектора з помірним коефіцієнтом підсилення.

### **3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Структурна електрична схема приймача цифрового ефірного телебачення відображає послідовність функціональних перетворень, яких зазнає сигнал від моменту його прийняття антеною до відтворення зображення та звукового супроводження. Завдання цього розділу полягає у тому, щоб простежити загальну логіку роботи приймача стандарту DVB-T2, виокремити місце преселектора у складі цього приймача та сформулювати функціональні вимоги до окремих каскадів вхідного тракту. У викладі використано рекомендації, наведені у навчально-методичній літературі з пристроїв приймання та обробки сигналів [3, 5, 12], а також положення стандарту ETSI EN 302 755 [9].

#### **3.1. Послідовність перетворень сигналу у тракті приймача DVB-T2**

Послідовність обернених перетворень, що відбуваються у приймачі цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2, ґрунтується на оберненні операцій, виконуваних у передавачі. У передавальному тракті аналогові телевізійні сигнали зображення та звукового супроводження спочатку перетворюються в цифрову форму у відповідних аналого-цифрових перетворювачах. Сформовані цифрові потоки далі стискаються відповідно до стандарту MPEG-4, після чого з них формується транспортний потік стандарту DVB, до якого долучаються службові дані. Транспортні пакети об'єднуються по вісім для забезпечення можливості циклічної синхронізації у приймачі, скремблюються для рівномірнішого розподілу спектральної потужності, кодуються згортковим кодом та кодом Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема для надання стійкості до помилок, перемежуються для розосередження пакетних помилок та піддаються модуляції з відображенням на символи однієї з форм квадратурної амплітудної маніпуляції.

Далі виконується розкладання бітових потоків на символи кожної з піднесучих, введення пілот-сигналів, формування OFDM-кадрів і застосування

зворотного дискретного перетворення Фур'є над послідовністю символів. Реальна та уявна частини результату дискретного перетворення Фур'є за допомогою цифро-аналогового перетворювача переводяться в аналогову форму, після чого здійснюється квадратурна модуляція двох ортогональних компонент несучої частоти. Сформований таким чином сигнал переноситься в потрібний радіоканал і випромінюється передавальною антеною.

У приймачі всі зазначені операції виконуються у зворотному порядку. На вхід преселектора надходить сигнал, прийнятий антеною; пройшовши через коло попередньої селекції, він підсилюється у малощумному підсилювачі високої частоти, додатково фільтрується смуговим фільтром і подається на вхід тюнера. У тюнері відбувається перенесення сигналу на проміжну частоту шляхом змішування з коливанням гетеродина, далі сигнал додатково підсилюється у тракці проміжної частоти й після аналого-цифрового перетворення піддається квадратурній демодуляції. Дискретне перетворення Фур'є над квадратурними складовими забезпечує демодуляцію COFDM і формує символи COFDM. Дані з блока ДПФ використовуються для автоматичного регулювання підсилення, синхронізації та відновлення несучої частоти.

У блоці корекції каналу аналізуються прийняті пілот-сигнали, на основі чого оцінюється передаточна функція каналу зв'язку та виконується корекція спотворень за рахунок зміни кожної піднесучої на величину, обернену до набутого нею коефіцієнта передачі. Далі відбувається деперемежування, депермутування символів за бітами, корекція помилок, дескремблювання й демультимплексування транспортного потоку. У підсумку у демультимплексорі виокремлюються елементарні потоки даних відеосигналу й звукового супроводу обраної програми, які подаються на відповідні декодери MPEG-4. На виходах декодерів формуються сигнали яскравості та кольорово-різницеві сигнали в цифровій формі, які надалі перетворюються в аналогову форму, дематриціуються, регулюються за контрастністю та яскравістю і подаються на пристрій відображення.

### 3.2. Структурна електрична схема приймача

Структурна електрична схема приймача цифрового ефірного телебачення наведена на рисунку 3.1 і також відтворена у додатку А. Схема відображає логічно завершену послідовність функціональних перетворень сигналу від антени до пристрою відображення зображення та звукового супроводження. Центральним елементом аналогової частини приймача є преселектор, розташований безпосередньо після антени і перед тюнером.

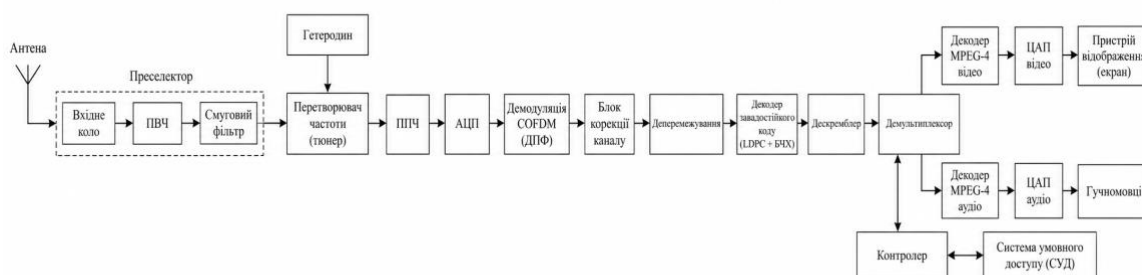


Рисунок 3.1 – Структурна електрична схема приймача цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2

У тюнері відбувається виокремлення необхідного частотного каналу та перенесення сигналу на проміжну частоту. Далі сигнал проходить через підсилювач, керований сигналом автоматичного регулювання підсилення, і перетворюється у цифрову форму за допомогою АЦП. Після цього виконується квадратурна демодуляція з виокремленням квадратурних складових, які відповідають дійсній та уявній частинам сигналу COFDM. Надалі здійснюється пряме дискретне перетворення Фур'є квадратурних складових, тобто демодуляція COFDM, у результаті якої формуються символи COFDM. Дані з блока ДПФ використовуються для автоматичного регулювання підсилення та надходять до блока синхронізації, в якому відновлюється несуча частота й тактові імпульси для АЦП.

У блоці корекції каналу аналізуються прийняті пілот-сигнали; за результатами цього аналізу оцінюється передаточна функція каналу зв'язку, а

сигнал кожної піднесучої змінюється на величину, обернену до знайденої передаточної функції. Наступний блок здійснює деперемежування другого внутрішнього перемикавання та зворотну до операції розкладання бітів за символами процедуру; у результаті формується послідовність бітів, яка надходить до блока корекції помилок, аналогічного до відповідного блока приймача супутникового цифрового телебачення. Усі наступні операції збігаються з операціями, виконуваними у приймачі кабельного цифрового телебачення.

Дескрембльований транспортний потік потрапляє до демультимплексора, у якому з нього виокремлюються пакети, що належать обраній програмі, та формуються елементарні потоки даних відео і звукового супроводу. Керування дескремблером та демультимплексором здійснюється контролером. Демультимплексор виокремлює з транспортного потоку таблицю програм PAT і передає її на контролер, який забезпечує відображення інформації про програми у транспортному потоці на екрані. За командою користувача обирається одна з програм, після чого дані про PID-пакети, що належать цій програмі, передаються в демультимплексор для наступного приймання. Допоміжні дані обраної програми надходять з демультимплексора на контролер, який передає їх на блок відображення додаткової інформації.

Контролер взаємодіє з системою умовного доступу, до складу якої входять засоби, що забезпечують доступ користувача до тих платних програм, за які він здійснив оплату. Дані для дескремблювання програми передаються у відповідних пакетах транспортного потоку. Для дескремблювання безкоштовних програм та пакетів із загальнодоступною інформацією додаткові дані не потрібні. Таким чином, у приймачі цифрового ефірного телебачення вибір програми відбувається у два етапи: спершу обирається канал телевізійного мовлення, в якому передається транспортний потік з декількома програмами, а потім – одна з програм у цьому транспортному потоці.

Елементарні потоки відеосигналу та звуку з демультимплексора потрапляють на відповідні декодери MPEG-4. На виходах декодера

відеосигналу формуються сигнал яскравості та кольорово-різницеві сигнали у цифровій формі, які через цифро-аналоговий перетворювач переводяться в аналогову форму. В аналогових схемах виконуються дематриціювання, керування яскравістю, контрастністю і підсилення. На виходах декодера аудіо формуються сигнали каналів звукового супроводження, які перетворюються в аналогову форму і потрапляють на блоки відтворення звуку.

### 3.3. Місце і функції преселектора у структурі приймача

Преселектор як вибірний пристрій вхідної частини супергетеродинного приймача займає обмежений, але критично важливий сегмент тракту. До його основних функцій належать забезпечення вибірності за дзеркальним каналом, попереднє підсилення слабкого сигналу для забезпечення необхідного відношення сигнал-шум на вході перетворювача частоти, формування сприятливих умов узгодження антени з тюнером, обмеження смуги частот у передбачуваних межах для запобігання потраплянню до перетворювача неприпустимих за інтенсивністю позасмугових завад.

Таблиця 3.1 – Розподіл функцій між блоками преселектора (складено за матеріалами джерела [3])

| Блок            | Основна функція                                                    | Допоміжна функція                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Антенa          | Перетворення електромагнітного поля у напругу електричного сигналу | Спрямованість приймання                    |
| Фідер           | Передавання сигналу від антени до вхідного кола                    | Відновлення симетрії за наявності U-коліна |
| Вхідне коло     | Узгодження антени з ПВЧ і перша вибірність                         | Послаблення позасмугових завад             |
| ПВЧ             | Підсилення сигналу з мінімальним внеском у шуми                    | Часткова селективність за смугою           |
| Смуговий фільтр | Виокремлення смуги робочих частот 566–646 МГц                      | Подавлення дзеркального каналу             |

Аналіз даних таблиці 3.1 свідчить про те, що преселектор побудовано як сукупність пасивних та активних елементів, кожен з яких виконує визначену частину загального завдання – забезпечення оптимальних умов виокремлення та підсилення корисного сигналу. Конкретні параметри окремих блоків преселектора (вибір типу антени, схеми вхідного кола, структурної схеми ПВЧ, конструкції смугового фільтра) визначаються розрахунками, наведеними у подальших розділах.

З огляду на робочий діапазон 566–646 МГц та помірну відстань між передавачем Антопіль і пунктом приймання в межах міста Рівне, у роботі обрано наступну конфігурацію преселектора. Як приймальну антену використано трьохелементну рамкову антену з U-коліном симетрування й узгодження. Вхідне коло преселектора реалізоване у вигляді частотно-залежного коригувального кола, конструктивно інтегрованого з першим каскадом підсилювача високої частоти. Підсилювач високої частоти побудовано за двокаскадною схемою на біполярних транзисторах за схемою з загальним емітером з частотно-залежними коригувальними колами, що забезпечують необхідну форму амплітудно-частотної характеристики. Окремий смуговий фільтр у вибраному варіанті побудови не використовується, оскільки його функції фактично виконують коригувальні кола міжкаскадного та вихідного включення; такий підхід типовий для аперіодичних широкосмугових підсилювачів дециметрового діапазону [10, 14].

### **Висновки за третім розділом**

Структурна електрична схема приймача цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2 являє собою послідовність функціональних блоків аналогової та цифрової обробки, у якій преселектор розташований безпосередньо за антеною і виконує функцію вибірного підсилення сигналу перед його надходженням до тюнера. Послідовність зворотних до операцій передавання перетворень забезпечує відновлення транспортного потоку та подальше декодування зображення і звукового супроводу.

Розподіл функцій між блоками преселектора, наведений у таблиці 3.1, показує, що антена, фідер, вхідне коло, підсилювач високої частоти та смуговий фільтр (за наявності) виконують взаємодоповнюючі функції: окремий блок не може забезпечити повного набору параметрів преселектора, тому розрахунок передбачає узгоджене вирішення всіх компонент.

У роботі обрано конфігурацію преселектора, що складається з трьохелементної рамкової антени, U-коліна симетрування та узгодження і двокаскадного аперіодичного підсилювача високої частоти зі схемою включення транзисторів за загальним емітером та частотно-залежною корекцією амплітудно-частотної характеристики. Розрахунок цих елементів є предметом подальших розділів роботи.

#### **4. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Функціональна електрична схема преселектора деталізує його внутрішню побудову і відображає послідовність обробки сигналу від антени до виходу преселектора (входу тюнера). На відміну від структурної схеми, наведеної у попередньому розділі, функціональна схема враховує конкретні види з'єднань між каскадами, наявність кіл термостабілізації, фільтрів живлення та інших службових елементів. Розрахунок енергетики сигналу, а також основних характеристик преселектора (шумової температури, чутливості, припустимого рівня потужності шуму) виконано для умов приймання у місті Рівне з ретранслятора Антопіль.

##### **4.1. Розрахунок енергетики сигналу, що надходить у радіоприймальний пристрій**

Енергетичні характеристики радіолінії, утвореної передавачем Антопіль та приймальною установкою у місті Рівне, визначають вибір параметрів приймальної антени, коефіцієнта підсилення підсилювача високої частоти та припустиму шумову температуру преселектора. Поряд з провідниковими лініями електрозв'язку у телебаченні широко використовуються лінії радіозв'язку, у яких сигнали електрозв'язку, що підлягають передачі, подаються на радіопередавач, перетворюються у високочастотний радіосигнал та випромінюються у простір у вигляді радіохвиль. Ефективність випромінювання істотно залежить від частоти струму: за фіксованої довжини провідників випромінювання, як правило, зростає зі збільшенням частоти.

Згідно з даними передавального центру Антопіль, наведеними у таблиці 2.2, цифрове ефірне телебачення транслюється на каналах 38, 42, 40 та 33 з потужностями передавачів кожного мультіплексу близько 1 кВт (типове значення для пакетних передавачів цифрової мережі Концерну РРТ). Робоча

смука преселектора повинна охоплювати інтервал 566–646 МГц, що відповідає сумарному діапазону всіх чотирьох мультиплексів. Робоча довжина хвилі розраховується для центральної частоти діапазону  $f_0 = 606$  МГц:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{606 \cdot 10^6} \approx 0,495 \text{ м} \quad (4.1)$$

Напруженість поля у точці приймання за умови прямого поширення хвиль обчислюється за формулою Введенського, яка справедлива для напівсферичного поширення на земній поверхні за наявності одного передавача:

$$E = \frac{245}{r} \cdot \sqrt{P_\Sigma \cdot G_{\text{пер}}} \left[ \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \right] \quad (4.2)$$

де  $r$  – відстань від передавача до приймача, км;  $P_\Sigma$  – ефективна випромінювана потужність передавача, кВт;  $G_{\text{пер}}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени відносно ізотропного джерела (для передавача типу Концерну RPT становить близько 6 дБі, тобто 4 у разях). Підставляючи  $r = 18$  км,  $P_\Sigma = 1$  кВт та  $G_{\text{пер}} = 4$ , отримуємо:

$$E = \frac{245}{18} \cdot \sqrt{1 \cdot 4} = 13,6 \cdot 2 \approx 27,2 \text{ мВ/м} \quad (4.3)$$

Напруженість поля у точці приймання є значною через відносно малу відстань між передавачем та приймачем, що забезпечує досить високий рівень сигналу на вході преселектора. Для порівняння, поріг впевненого приймання сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-T2 для нерухомої антени становить близько 0,1–0,2 мВ/м, тобто розрахунковий рівень напруженості поля перевищує мінімально необхідний приблизно на 40–45 дБ.

Напруга, наведена на узгоджених затискачах приймальної антени з ефективною висотою  $h_d$  та коефіцієнтом узгодження  $\eta_y \approx 1$ , визначається співвідношенням:

$$U_a = E \cdot h_d \cdot \eta_y \quad (4.4)$$

Для трьохелементної рамкової антени з ефективною висотою близько 0,35 м (розрахунок наведено у п'ятому розділі) отримуємо орієнтовну напругу сигналу на затискачах антени:

$$U_a = 27,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,35 \cdot 1 \approx 9,5 \text{ мВ} \quad (4.5)$$

#### 4.2. Визначення основних характеристик приймального пристрою

Шумова температура антени дециметрового діапазону, що випромінює до Землі та частково до неба, визначається переважно температурою фонового випромінювання та індустріальними завадами. Для умов приймання у міській місцевості Рівного оцінке значення шумової температури антени  $T_a$  може бути отримано згідно з рекомендацією МСЕ-Р Р.372 на основі співвідношення:

$$T_a \approx T_0 + \frac{290}{\left(\frac{f}{100}\right)^2} [\text{K}] \quad (4.6)$$

де  $T_0 = 290 \text{ К}$  – еталонна температура;  $f$  – несуча частота, МГц. Для центральної частоти  $f = 606 \text{ МГц}$  отримуємо:

$$T_a \approx 290 + \frac{290}{\left(\frac{606}{100}\right)^2} \approx 290 + 7,9 \approx 298 \text{ К} \quad (4.7)$$

Сумарна шумова температура преселектора на вході підсилювача високої частоти визначається сукупністю температури антени, температури фідера й шумової температури першого каскаду ПВЧ. Для типового мал шумного підсилювача дециметрового діапазону з коефіцієнтом шуму 3 дБ (тобто шумовою температурою близько 290 К) сумарна шумова температура становить:

$$T_{\Sigma} = T_a + T_{\phi} + T_{\text{ПВЧ}} \approx 298 + 50 + 290 \approx 640 \text{ К} \quad (4.8)$$

Рівень напруги шуму, наведеної на узгодженому вході преселектора з опором  $R = 75 \text{ Ом}$  у смузі робочих частот  $\Delta f = 8 \text{ МГц}$  (що відповідає смузі одного мультиплексу й узгоджується зі смугою тюнера) обчислюється за формулою Найквіста-Джонсона:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{\Sigma} \cdot R \cdot \Delta f} \quad (4.9)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – стала Больцмана. Підставивши  $T_{\Sigma} = 640 \text{ К}$ ,  $R = 75 \text{ Ом}$ ,  $\Delta f = 8 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ , отримуємо:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 640 \cdot 75 \cdot 8 \cdot 10^6} \approx 7,3 \text{ мкВ} \quad (4.10)$$

Розрахункова потужність шуму, віднесена до узгодженого опору 75 Ом, дорівнює:

$$P_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш}}^2}{R} = \frac{(7,3 \cdot 10^{-6})^2}{75} \approx 7,1 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \approx -91,5 \text{ дБм} \quad (4.11)$$

Стандарт DVB-T2 у режимі 64-QAM зі швидкістю кодування 2/3 для приймання у нерухомій точці передбачає мінімальне відношення сигнал-шум

$C/N \approx 16,5$  дБ [9]. Звідси мінімальна потужність сигналу на вході приймача становить:

$$P_{c,\min} = P_{\text{ш}} + 16,5 \text{ дБ} \approx -75 \text{ дБм} \quad (4.12)$$

Підставивши розраховану напругу сигналу на затискачах антени  $U_a \approx 9,5$  мВ, отримуємо відповідну потужність сигналу на вході преселектора:

$$P_c = \frac{U_a^2}{R} = \frac{(9,5 \cdot 10^{-3})^2}{75} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \approx -29 \text{ дБм} \quad (4.13)$$

Запас за відношенням сигнал-шум у точці приймання таким чином становить:

$$\Delta P = P_c - P_{c,\min} = -29 - (-75) = 46 \text{ дБ} \quad (4.14)$$

Отриманий запас близько 46 дБ суттєво перевищує мінімально необхідні 16,5 дБ і дає змогу застосувати у преселекторі помірний коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти на рівні 25–30 дБ без ризику входження тюнера в режим обмеження за лінійністю.

### 4.3. Функціональна електрична схема преселектора

Телевізійні приймачі дециметрового діапазону можуть бути розраховані на приймання сигналів з амплітудною або з частотною модуляцією. У першому випадку до приймача надходять обидві бічні смуги частот, або одна з них може бути на передавачі частково подавлена. Окрім того, приймальний пристрій може бути призначений для приймання тільки телевізійних сигналів або ж телевізійних сигналів разом із сигналами звукового супроводу. Сигнали звукового супроводу можуть передаватися на окремій несучій або на спільній несучій з сигналами зображення. У стандарті DVB-T2 обидва сигнали входять

до складу транспортного потоку MPEG, що передається в одному радіоканалі смугою 8 МГц з модуляцією COFDM, тому преселектор має забезпечити приймання сигналу OFDM без розділення на відеосигнал і звуковий супровід.

Функції приймального пристрою у стандарті DVB-T2 виконуються розподілено між аналоговою та цифровою частинами тракту. У межах преселектора аналогова частина повинна забезпечити приймання сигналу OFDM з достатнім запасом за відношенням сигнал-шум, підсилення без значних нелінійних спотворень та виокремлення робочої смуги частот 566–646 МГц з помірною нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики. Подальша квадратурна демодуляція, дискретне перетворення Фур'є, корекція каналу за пілот-сигналами та декодування транспортного потоку виконуються вже у цифровій частині приймача.

З огляду на розраховану напруженість поля у точці приймання та напругу сигналу на виході антени, обґрунтованим є вибір помірного коефіцієнта підсилення підсилювача високої частоти. Основним критерієм вибору принципової схеми ПВЧ та типу транзистора у цьому разі є не максимальний коефіцієнт підсилення, а мінімально можливий коефіцієнт шуму. Перетворювач частоти приймача DVB-T2 розташовується після преселектора і складається зі змішувача та гетеродина; у сучасних монолітних тюнерах він зазвичай реалізований у вигляді інтегральної мікросхеми. Гетеродин у такому тюнері формує сітку частот з кроком, який забезпечує покриття всього робочого діапазону, та використовує кільце фазового автопідстроювання частоти для забезпечення стабільності й точності встановлення несучої.

Підсилювач проміжної частоти (ППЧ) повинен забезпечити значний коефіцієнт підсилення за напругою, тому в його структуру вводять кілька каскадів. У межах цієї роботи розгляд ППЧ не виконується, оскільки відповідні функції покладаються на стандартні модулі тюнера промислового виробництва. Натомість докладному розрахунку підлягає підсилювач високої частоти преселектора, що і є основним об'єктом подальшого дослідження.

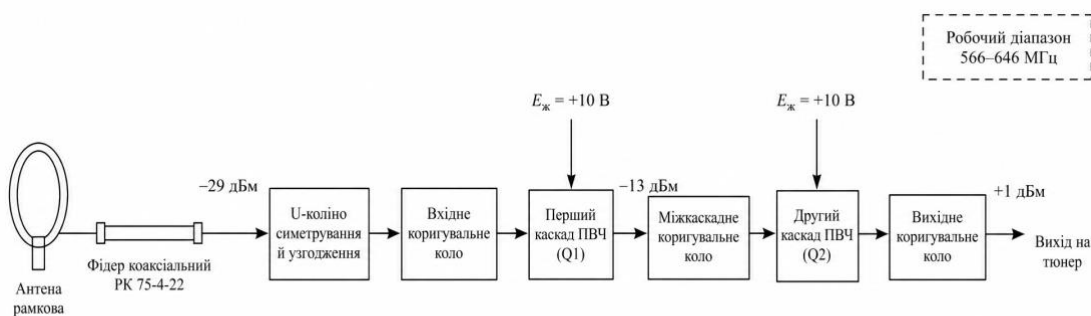


Рисунок 4.1 – Функціональна електрична схема преселектора приймача цифрового ефірного телебачення

Функціональна схема, наведена на рисунку 4.1 та продубльована у додатку Б, складається з таких послідовно з'єднаних елементів: рамкової приймальної антени, узгоджувального U-коліна та коаксіального фідера, вхідного коригувального кола, першого каскаду підсилювача високої частоти, міжкаскадного коригувального кола, другого каскаду підсилювача високої частоти, вихідного коригувального кола й вихідного роз'єму на тюнер. Кожне коригувальне коло одночасно виконує дві функції: формування заданої амплітудно-частотної характеристики та узгодження за хвильовим опором, що дає змогу відмовитися від окремих смугових фільтрів і скоротити масогабаритні показники.

### Висновки за четвертим розділом

Енергетичний розрахунок радіолінії передавач Антопіль – приймач у місті Рівне показав, що напруженість поля у точці приймання становить близько 27,2 мВ/м, чому відповідає напруга сигналу на затискачах рамкової антени близько 9,5 мВ та потужність сигналу на узгодженому вході преселектора близько -29 дБм. Сумарна шумова потужність на вході преселектора у смузі 8 МГц становить близько -91,5 дБм, що забезпечує запас за відношенням сигнал-шум на рівні приблизно 46 дБ при мінімально необхідних 16,5 дБ для режиму 64-QAM 2/3 стандарту DVB-T2.

З огляду на отриманий запас за відношенням сигнал-шум, у преселекторі обрано двокаскадний підсилювач високої частоти з помірним коефіцієнтом підсилення близько 30 дБ і коефіцієнтом шуму першого каскаду не більше 3 дБ. Подальша задача полягає у виборі конкретного типу транзистора, розрахунку елементів коригувальних кіл та елементів термостабілізації, що забезпечать наведені характеристики у всьому робочому діапазоні 566–646 МГц.

Функціональна електрична схема преселектора, наведена на рисунку 4.1 і у додатку Б, визначає взаємне розташування і функціональні зв'язки між каскадами та слугує основою для розробки принципової електричної схеми, що виконано у шостому розділі. Структурна послідовність обробки сигналу, що впливає з аналізу схеми, такою: приймальна антена → фідерний тракт → U-коліно симетрування й узгодження → вхідне коригувальне коло з функцією попередньої частотної селекції → перший каскад малошумного підсилювача високої частоти на транзисторі типу BFR93A з коригувальними колами → міжкаскадне коригувальне коло, що формує спрямовану форму амплітудно-частотної характеристики на середніх частотах діапазону → другий каскад підсилювача високої частоти на транзисторі BFR91A з вищим виходом → вихідне коригувальне коло з функцією узгодження за хвильовим опором з тюнером.

## 5. РОЗРОБКА АНТЕНИ ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

Приймальна антена є першою ланкою преселектора і одночасно тим елементом, від конструкції якого істотно залежать основні енергетичні характеристики приймального тракту в цілому. Вибір типу антени для приймача цифрового ефірного телебачення диктується сукупністю вимог, серед яких ключовими є робочий діапазон 566–646 МГц, узгодженість зі стандартним фідером з хвильовим опором 75 Ом, прийнятні масогабаритні показники, прийнятні значення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою у заданій смузі, а також достатнє значення коефіцієнта спрямованої дії для виокремлення сигналу з боку передавача та послаблення завад з протилежного напрямку. У цьому розділі послідовно розглянуто вимоги до антени, проведено порівняння можливих конструкцій, виконано розрахунок обраної рамкової антени і виконано її моделювання у програмному середовищі MMANA-GAL.

### 5.1. Вимоги до приймальної антени та фідера

Антена приймача цифрового ефірного телебачення повинна забезпечити приймання сигналу COFDM з мінімальними втратами у заданому діапазоні робочих частот при дотриманні співвідношення розмірів, що передбачає індивідуальне використання у місці прийому. У праці [2] зазначається, що антени дециметрового діапазону доцільно проектувати з геометричними розмірами, узгодженими із середньою довжиною хвилі робочого діапазону, тобто близько  $\lambda_0/4$ – $\lambda_0/2$  для основних випромінювальних елементів. Для центральної частоти 606 МГц значення  $\lambda_0/4$  становить близько 124 мм, а значення  $\lambda_0/2$  – близько 247 мм, що дозволяє створити компактну індивідуальну антену без потреби у великих геометричних розмірах, типових для метрового діапазону.

Стандартним хвильовим опором фідера у телевізійній техніці прийнято значення 75 Ом, що відповідає коаксіальному кабелю РК 75-4-22, РК 75-9-12

або еквівалентному. Активний компонент вхідного імпедансу антени, узгодженого з фідером, повинен наближатись до 75 Ом у всьому робочому діапазоні. Реактивна складова має не перевищувати кількох десятків ом, інакше неминуче зростання коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХ), що додатково послаблює сигнал на вході вхідного кола преселектора. Для забезпечення прийнятної якості приймання сигналу DVB-T2 КСХ у робочій смузі не повинен перевищувати 2,5–3,0.

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) приймальної антени бажано мати на рівні 6–8 дБі, що відповідає типовим показникам індивідуальних приймальних антен дециметрового діапазону. Більше значення КСД ускладнює орієнтацію антени та зменшує її здатність приймати сигнали з декількох джерел, що може бути критичним у разі переходу до приймання з кількох передавачів одночасно. Менше значення КСД, навпаки, призводить до зменшення корисного сигналу на затискачах антени та погіршення відношення сигнал-шум.

Фідер у складі індивідуальної приймальної установки рекомендовано вибирати з мінімально можливою довжиною, оскільки погонне послаблення коаксіального кабелю на частоті 600 МГц становить приблизно 0,15–0,30 дБ/м залежно від типу кабелю. Для довжини фідера 10 м втрати у кабелі досягають 1,5–3,0 дБ, що додається до коефіцієнта шуму першого каскаду підсилювача високої частоти і помітно погіршує загальну чутливість тракту.

## **5.2. Порівняння можливих типів приймальних антен**

Серед різноманіття конструкцій антен дециметрового діапазону для приймання сигналу цифрового ефірного телебачення найчастіше використовують директорні (антени типу «хвильовий канал»), логоперіодичні, рамкові та комбіновані антени. Кожен з цих типів має свої переваги і обмеження, систематизовані у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння типів антен для приймання сигналу DVB-T2 у діапазоні 566–646 МГц (складено за матеріалами джерел [4, 11])

| Тип антени                      | КСД, дБі | КСХ у смузі | Габарити                                | Особливості                                   |
|---------------------------------|----------|-------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Директорна<br>(хвильовий канал) | 8–12     | 1,5–2,5     | Великі (декілька $\lambda$ за довжиною) | Висока спрямованість, але вузька робоча смуга |
| Логоперіодична                  | 6–9      | 1,3–1,8     | Середні (приблизно $\lambda$ )          | Найширша смуга, конструктивно складніша       |
| Рамкова<br>трюхелементна        | 6–8      | 1,3–1,7     | Компактні (приблизно $\lambda/2$ )      | Простота виготовлення, помірна вибірність     |
| Комбінована                     | 9–11     | 1,5–2,2     | Великі                                  | Складна конструкція з директорів і рамок      |

Аналіз даних таблиці 5.1 показує, що для розв’язуваної у цій роботі задачі найбільш збалансованою конструкцією є трюхелементна рамкова антена. Її переваги полягають у компактних геометричних розмірах, простоті виготовлення в індивідуальних умовах, низькому значенні КСХ у достатньо широкій смузі частот і прийнятному коефіцієнті спрямованої дії на рівні 7 дБі. Окрім того, рамкова антена має симетричний вхідний опір близько 200 Ом, що зручно перетворюється до стандартного несиметричного значення 75 Ом за допомогою найпростішого пристрою симетрування – U-коліна з відрізка коаксіального кабелю, що додатково спрощує конструкцію.

Логоперіодична антена забезпечила б ширшу смугу робочих частот, проте її конструкція містить значну кількість елементів зі специфічними геометричними співвідношеннями, що ускладнює виготовлення в індивідуальних умовах. Директорна антена типу «хвильовий канал» характеризується вищим коефіцієнтом спрямованої дії, проте її смуга робочих частот недостатня для перекриття діапазону 566–646 МГц без додаткового

перебудовування. З урахуванням викладеного далі виконується розрахунок трьохелементної рамкової антени.

### 5.3. Розрахунок параметрів трьохелементної рамкової антени

Трьохелементна рамкова антена складається з активного вібратора (петлі), рефлектора, розташованого позаду активного вібратора, та одного директора, розміщеного перед активним вібратором. Розрахункові співвідношення для геометричних розмірів елементів антени, наведені у праці [2], ґрунтуються на електродинамічному наближенні і дають вихідні значення для подальшого числового моделювання.

Розрахункова робоча довжина хвилі для центральної частоти діапазону  $f_0 = 606$  МГц визначається співвідношенням, наведеним у формулі (2.1) другого розділу, і становить  $\lambda_0 \approx 0,495$  м. Довжина периметра рамки активного вібратора, що відповідає одному повному коливанию струму у режимі стоячої хвилі, обчислюється за формулою:

$$L_{\text{акт}} = \lambda_0 \cdot k_{\text{укор}} \quad (5.1)$$

де  $k_{\text{укор}}$  – коефіцієнт укорочення, що для рамкової антени діаметром провідника близько 5 мм дорівнює приблизно 0,95. Підставляючи значення:

$$L_{\text{акт}} = 0,495 \cdot 0,95 \approx 0,470 \text{ м} \quad (5.2)$$

Для квадратної рамки сторона активного вібратора визначається як  $a_{\text{акт}} = L_{\text{акт}} / 4 \approx 117$  мм. Довжина периметра рефлектора обирається з умови забезпечення рефлекторної функції, для чого він повинен бути дещо довший за активний вібратор:

$$L_{\text{реф}} = 1,05 \cdot L_{\text{акт}} = 0,494 \text{ м}; \quad a_{\text{реф}} = 123 \text{ мм} \quad (5.3)$$

Довжина периметра директора, навпаки, обирається меншою за активний вібратор, що забезпечує концентрацію поля у напрямі директора:

$$L_{\text{дир}} = 0,95 \cdot L_{\text{акт}} = 0,447 \text{ м}; \quad a_{\text{дир}} = 112 \text{ мм} \quad (5.4)$$

Відстань між рефлектором і активним вібратором, а також між активним вібратором і директором, обирається у діапазоні  $0,15\text{--}0,25 \lambda_0$ , що для центральної частоти діапазону становить 75–125 мм. Виходячи з рекомендацій праці [2], приймаються такі значення:

$$d_{\text{реф,акт}} = 0,20 \cdot \lambda_0 = 99 \text{ мм}; \quad d_{\text{акт,дир}} = 0,15 \cdot \lambda_0 = 74 \text{ мм} \quad (5.5)$$

Систематизовані результати розрахунку геометричних параметрів рамкової антени наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Розраховані геометричні параметри трьохелементної рамкової антени

| Елемент           | Периметр L, мм | Сторона a, мм | Відстань до сусіднього елемента, мм |
|-------------------|----------------|---------------|-------------------------------------|
| Рефлектор         | 494            | 123           | 99 (до активного вібратора)         |
| Активний вібратор | 470            | 117           | 74 (до директора)                   |
| Директор          | 447            | 112           | —                                   |

Аналіз результатів, наведених у таблиці 5.2, свідчить про те, що сумарна довжина антени уздовж осі поширення хвилі становить близько 173 мм, що приблизно дорівнює  $\lambda_0/3$ . Такі розміри роблять конструкцію компактною та зручною для встановлення як на даху приватного будинку, так і на балконі багатоповерхівки, що відповідає індивідуальному застосуванню у місті Рівне.

#### 5.4. Розрахунок U-коліна симетрування й узгодження

Симетричний вхідний опір рамкової антени, який для трьохелементної конструкції становить приблизно 200 Ом, необхідно перетворити до несиметричного значення 75 Ом для подальшого з'єднання зі стандартним коаксіальним фідером. Класичним способом одночасного симетрування та трансформації імпедансу у діапазоні дециметрових хвиль є застосування U-коліна з напівхвильового відрізка коаксіального кабелю.

Принцип роботи U-коліна полягає в утворенні відрізка кабелю, фізична довжина якого дорівнює половині довжини хвилі у кабелі, тобто:

$$l_U = \frac{\lambda_0}{2} \cdot k_{\text{ук}} = \frac{0,495}{2} \cdot 0,66 \approx 0,163 \text{ м} \quad (5.6)$$

де  $k_{\text{ук}} = 0,66$  – коефіцієнт укорочення коаксіального кабелю з поліетиленовою ізоляцією. У такому відрізку відбувається інверсія фази коливання, що забезпечує синфазне підсумовування струмів на затискачах фідера. Коефіцієнт трансформації імпедансу U-коліна становить чотири, тобто:

$$Z_{\text{вх}} = 4 \cdot Z_{\text{коакс}} = 4 \cdot 75 = 300 \text{ Ом} \quad (5.7)$$

Розраховане значення 300 Ом дещо перевищує симетричний вхідний опір рамкової антени 200 Ом, що допускається за рахунок певної свободи у конструюванні. Для більш точного узгодження можна використати додатковий чверть-хвильовий трансформатор з кабелю з хвильовим опором близько 100 Ом, проте у разі трьохелементної рамкової антени достатньою є саме конструкція з U-коліном без додаткових трансформаторів. Імпеданс пристрою у кінцевому підсумку оптимізується за рахунок підбору довжини петлі активного вібратора у процесі моделювання.

### 5.5. Моделювання антени у програмному середовищі MMANA-GAL

Програмне середовище MMANA-GAL призначене для моделювання антен методом моментів і дає змогу обчислювати такі основні параметри: діаграму спрямованості у площинах Е та Н, коефіцієнт спрямованої дії, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, активну та реактивну складові вхідного імпедансу, частотну залежність основних параметрів. У праці [7] продемонстровано можливість використання MMANA-GAL для розрахунку рамкових антен з отриманням результатів, що добре узгоджуються з експериментальними вимірюваннями.

Моделювання спроектованої трьохелементної рамкової антени виконано в програмі MMANA-GAL версії 3.0.0.31. До моделі занесено координати кутів кожної рамки відповідно до значень, наведених у таблиці 5.2, а матеріалом провідників обрано мідь діаметром 5 мм. Джерело збудження розміщено на середині верхньої сторони активного вібратора. Розрахунки проведено для чотирьох частот, що відповідають центральним частотам мультиплексів МХ-5, МХ-1, МХ-3 та МХ-2: 570, 610, 626 та 642 МГц.

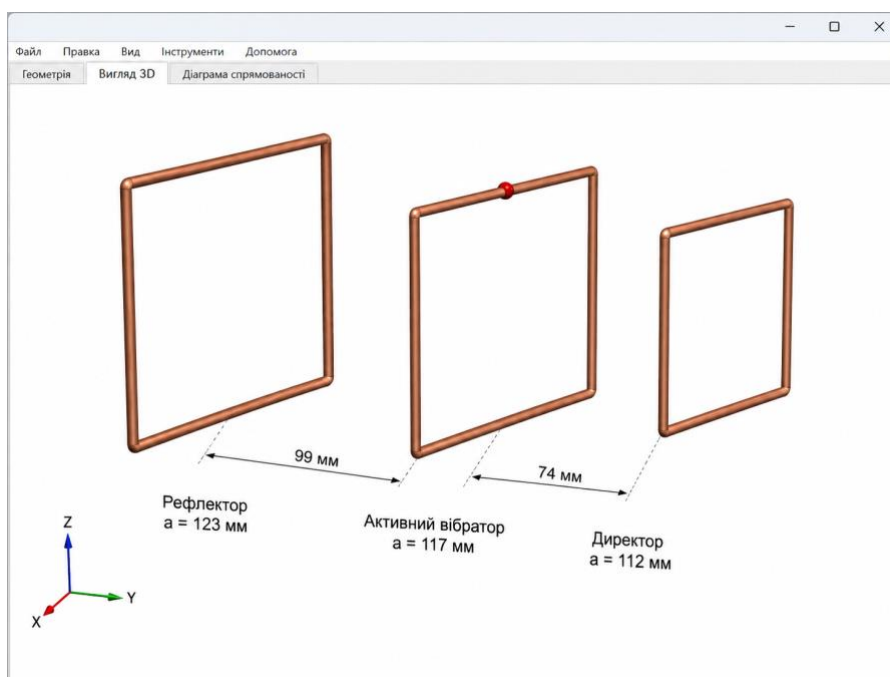


Рисунок 5.1 – Геометрична модель трьохелементної рамкової антени у середовищі MMANA-GAL

Діаграма спрямованості, отримана в результаті моделювання, наведена на рисунку 5.2. На площині Е виокремлюється виражений основний пелюсток з боку директора з кутом розкриття на рівні мінус 3 дБ близько  $60^\circ$  та задньо-передньому відношенню близько 15 дБ.

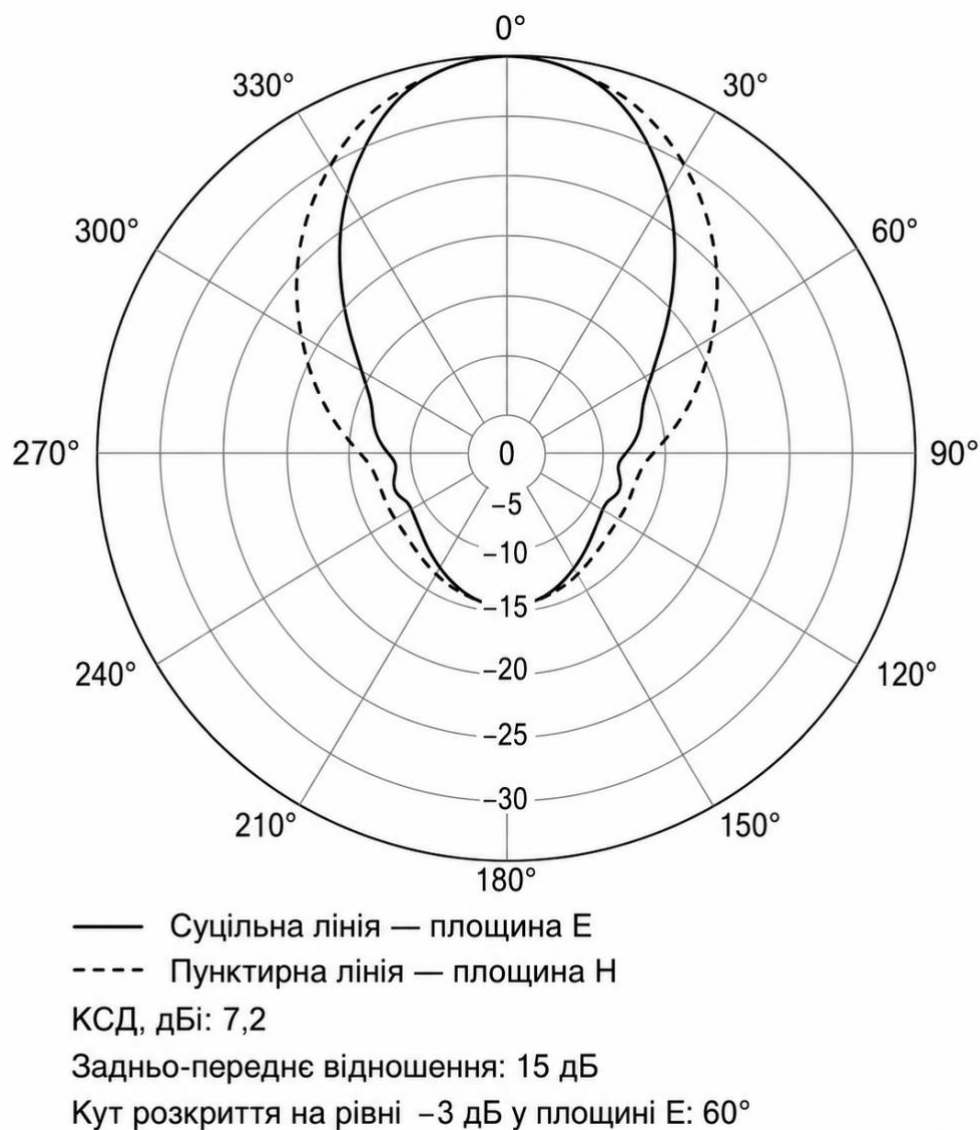
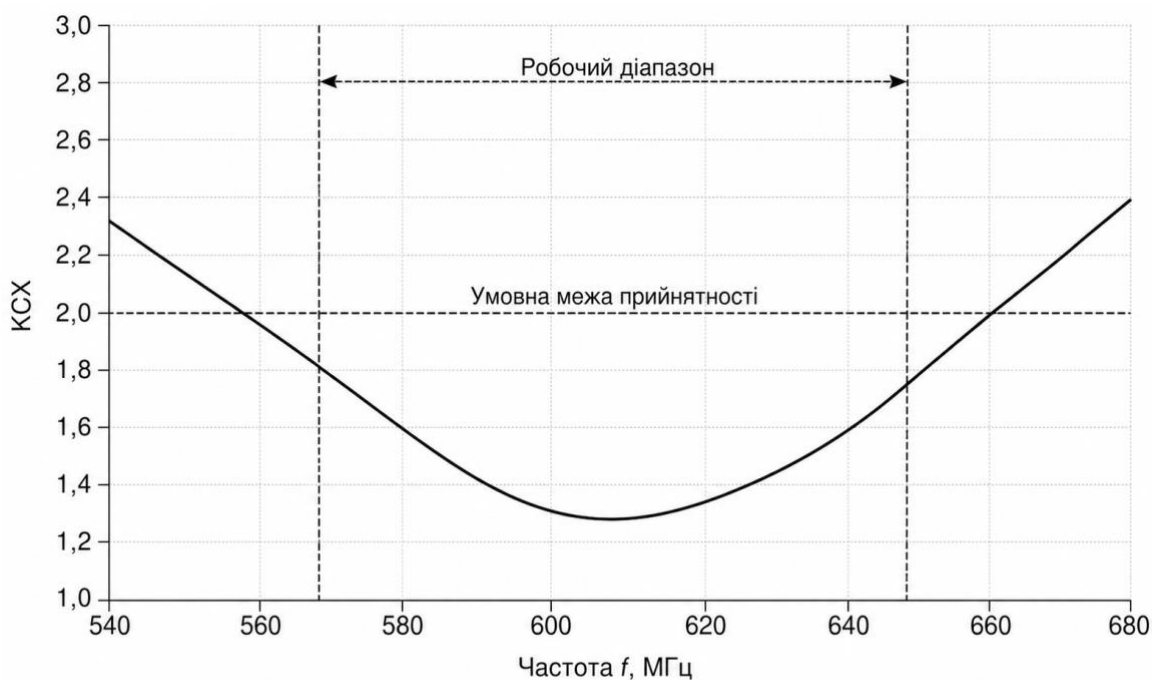


Рисунок 5.2 – Діаграма спрямованості рамкової антени на центральній частоті 606 МГц у площинах Е та Н за результатами моделювання у MMANA-GAL

Аналіз діаграми спрямованості, поданої на рисунку 5.2, показує, що антена має чітко виражену спрямованість, причому основний пелюсток зорієнтований у напрямі директора. Задньо-переднє відношення на рівні 15 дБ забезпечує задовільне послаблення завад, що надходять із протилежного напрямку. Кут розкриття  $60^\circ$  полегшує початкове орієнтування антени на

передавач та забезпечує помірний відступ за частотою без істотного погіршення коефіцієнта спрямованої дії.

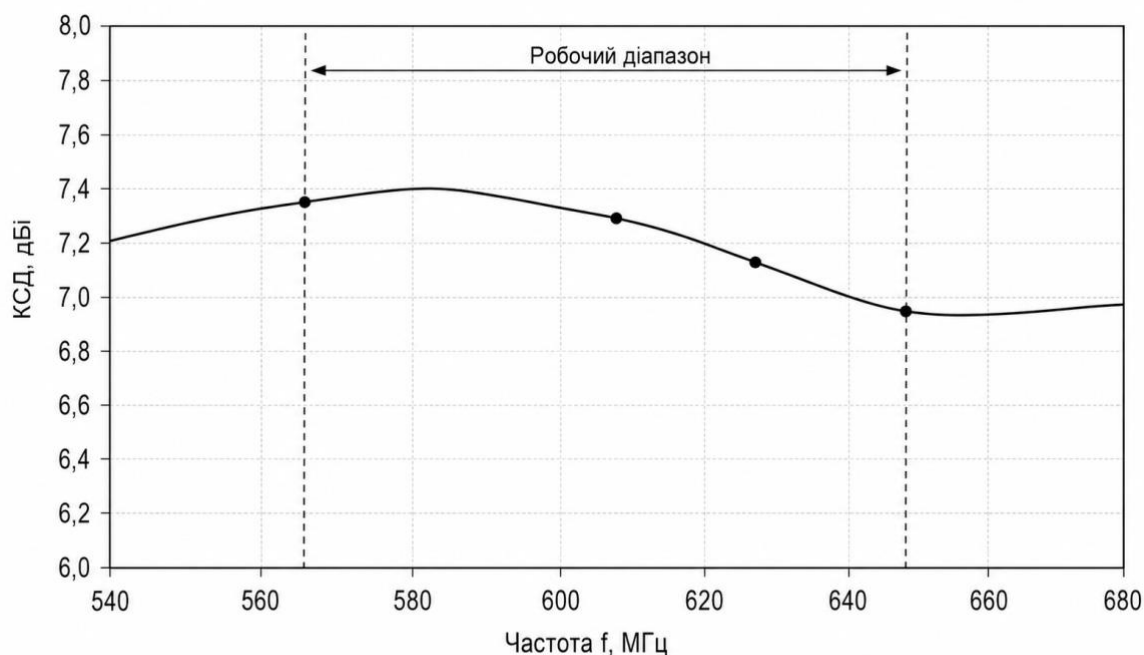
Частотна залежність коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХ), отримана в результаті моделювання, наведена на рисунку 5.3. У всьому робочому діапазоні 566–646 МГц значення КСХ не перевищує 1,7, що відповідає сформульованим у підрозділі 5.1 вимогам.



Робочий діапазон 566–646 МГц; КСХ у ньому не перевищує 1,7

Рисунок 5.3 – Частотна залежність КСХ рамкової антени у діапазоні 540–680 МГц

Частотна залежність коефіцієнта підсилення антени у вибраному діапазоні представлена на рисунку 5.4. Коливання значення КСД у межах робочого діапазону не перевищує 0,5 дБ, що задовольняє вимогу до нерівномірності амплітудно-частотної характеристики приймальної установки в цілому.



Коефіцієнт спрямованої дії змінюється у межах 6,9–7,4 дБі у діапазоні робочих частот

Рисунок 5.4 – Частотна залежність коефіцієнта спрямованої дії рамкової антени

Систематизовані результати моделювання за чотирма центральними частотами діапазону наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати моделювання рамкової антени на центральних частотах мультиплексів (за результатами розрахунку у MMANA-GAL)

| Мультиплекс | f, МГц | КСХ  | КСД, дБі | Re(Z), Ом | Im(Z), Ом |
|-------------|--------|------|----------|-----------|-----------|
| МХ-5        | 570    | 1,55 | 7,3      | 88        | +24       |
| МХ-1        | 610    | 1,30 | 7,4      | 78        | +9        |
| МХ-3        | 626    | 1,42 | 7,1      | 74        | –15       |
| МХ-2        | 642    | 1,68 | 6,9      | 70        | –27       |

Аналіз даних таблиці 5.3 свідчить про те, що антена забезпечує задовільну якість прийому на всіх чотирьох мультиплексах передавача Антопіль. Значення КСХ у крайніх точках діапазону залишаються меншими за встановлену межу 2,5, причому реактивна складова імпедансу не перевищує 30 Ом, що дозволяє ефективно узгодити антену з фідером без застосування додаткових компенсувальних кіл. Зміна КСД у діапазоні становить 0,5 дБ, що істотно менше за допустиму нерівномірність 3 дБ, сформульовану у вимогах до преселектора у підрозділі 1.3.

### Висновки за п'ятим розділом

У розділі сформульовано вимоги до приймальної антени, що впливають з умов приймання сигналу DVB-T2 у місті Рівне з ретранслятора Антопіль: робочий діапазон 566–646 МГц, вхідний опір узгодження 75 Ом, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою у робочій смузі не більше 2,5, коефіцієнт спрямованої дії 6–8 дБі.

Порівняльний аналіз чотирьох типів антен дециметрового діапазону, наведений у таблиці 5.1, дав змогу обґрунтувати вибір трьохелементної рамкової антени як компромісного рішення між компактністю, шириною робочої смуги та простотою виготовлення в індивідуальних умовах. Розраховані геометричні параметри антени (сторона активного вібратора 117 мм, рефлектора 123 мм, директора 112 мм, відстань між елементами 99 та 74 мм) систематизовані у таблиці 5.2.

Моделювання у програмному середовищі MMANA-GAL підтвердило, що антена забезпечує розрахункові параметри у всьому робочому діапазоні, у тому числі коефіцієнт спрямованої дії у межах 6,9–7,4 дБі, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою не більше 1,7, задньо-переднє відношення близько 15 дБ. Узгодження з фідером з хвильовим опором 75 Ом забезпечується застосуванням U-коліна з напівхвильового відрізка коаксіального кабелю.

Отримана конструкція трьохелементної рамкової антени має зведену довжину уздовж осі поширення хвилі близько 173 мм, що становить приблизно  $\lambda_0/3$  і робить її компактною та зручною для встановлення на даху приватного будинку чи на балконі багатоповерхівки. Підготовка макетного зразка не потребує спеціального технологічного обладнання – провідники антени виконуються з мідного дроту діаметром 5 мм, який вільно доступний у роздрібному продажі, а кріплення елементів забезпечується діелектричною траверсою з пластикової труби або текстолітової пластини. Окремі рекомендації щодо механічного виконання конструкції та її подальшого встановлення подано у методичних джерелах [2, 10] списку посилань.

## **6. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ ПРЕСЕЛЕКТОРА**

Принципова електрична схема підсилювача високої частоти преселектора є кульмінаційною частиною роботи, оскільки саме на цьому етапі реалізуються ті технічні рішення, що були обґрунтовані у попередніх розділах. У цьому розділі послідовно розглянуто вибір структурної схеми підсилювача, вибір типу транзистора, розрахунок робочої точки за постійним струмом, термостабілізацію, розрахунок коригувальних кіл та елементів кола живлення. Розрахунок ґрунтується на положеннях навчально-методичних джерел [3, 5, 14, 18] та особливостях побудови радіоприймальних пристроїв дециметрового діапазону, відображених у праці [4]. Зведена принципова електрична схема ПВЧ преселектора наведена у додатку В.

### **6.1. Обґрунтування вибору структурної схеми підсилювача високої частоти**

У дециметровому діапазоні хвиль типовим рішенням для побудови малошумного підсилювача є двокаскадна схема з включенням біполярних транзисторів за схемою з загальним емітером. Така схема забезпечує найбільший коефіцієнт підсилення за потужністю при коректному виборі робочої точки, а в поєднанні з частотно-залежними коригувальними колами – задану форму амплітудно-частотної характеристики у широкій смузі частот. Альтернативними варіантами є включення транзисторів за схемою з загальною базою (краща шумова температура, але менший коефіцієнт підсилення за струмом) та за схемою з загальним колектором (використовується для узгодження імпедансів, але без істотного підсилення за потужністю).

У поєднанні з негативним зворотним зв'язком (НЗЗ) за струмом, реалізованим резистором у колі емітера, схема із загальним емітером забезпечує покращену стабільність робочої точки у разі зміни температури та технологічного розкиду параметрів транзистора, що особливо критично для

одиночного виготовлення в індивідуальних умовах. У праці [3] зазначається, що ця обставина робить схему із загальним емітером найбільш вигідною для широкосмугових малощумних підсилювачів дециметрового діапазону у разі застосування дискретних транзисторів. У роботі обрано саме такий варіант структурної побудови підсилювача.

## 6.2. Вибір транзистора та його основні параметри

Вибір транзистора для першого каскаду малощумного підсилювача високої частоти повинен забезпечити дві основні вимоги: робочу частоту, що перевищує верхню межу робочого діапазону у кілька разів (бажано не менше у 3–5 разів), та мінімально досяжний коефіцієнт шуму. На основі довідкових даних виробників для першого каскаду обрано біполярний кремнієвий транзистор типу BFR93A виробництва компанії NXP Semiconductors, що випускається у корпусі SOT-23 та орієнтований на застосування у дециметровому та сантиметровому діапазонах хвиль. У другому каскаді використано аналогічний за серією транзистор BFR91A, що має дещо менший коефіцієнт шуму, але вищий струм максимального колектора, що зручно для другого каскаду з більшим рівнем сигналу.

Основні параметри обраних транзисторів наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Основні параметри транзисторів першого та другого каскадів ПВЧ (за даними виробника NXP Semiconductors, відкритий технічний опис)

| Параметр                                              | BFR93A (Q1) | BFR91A (Q2) |
|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| Тип провідності                                       | NPN         | NPN         |
| Гранична частота передачі струму $f_T$ , ГГц          | 6,0         | 5,0         |
| Максимальний струм колектора $I_{k\_max}$ , мА        | 50          | 50          |
| Максимальна напруга колектор-емітер $U_{ке\_max}$ , В | 12          | 12          |
| Розсіювана потужність $P_{max}$ , мВт                 | 300         | 200         |
| Коефіцієнт підсилення за                              | 60–250      | 60–250      |

|                                                   |        |        |
|---------------------------------------------------|--------|--------|
| струмом $h_{21e}$                                 |        |        |
| Коефіцієнт шуму NF на 800 МГц, дБ                 | 2,0    | 1,5    |
| Робочий струм мінімального шуму $I_{k\_opt}$ , мА | 14     | 8      |
| Корпус                                            | SOT-23 | SOT-23 |

Аналіз параметрів, наведених у таблиці 6.1, показує, що граничні частоти передачі струму обраних транзисторів перевищують верхню межу робочого діапазону приблизно у дев'ять разів, що забезпечує практично безінерційну роботу каскаду в усьому діапазоні. Розсіювана потужність 300 мВт для BFR93A та 200 мВт для BFR91A є цілком достатньою для роботи у режимі малих сигналів. Коефіцієнт шуму на 800 МГц для обох транзисторів менший за 3 дБ, що відповідає сформульованим у підрозділі 1.3 вимогам до коефіцієнта шуму преселектора.

### 6.3. Розрахунок робочої точки каскаду за постійним струмом

Робочу точку транзистора за постійним струмом обирають з умови забезпечення мінімального коефіцієнта шуму та задовільної лінійності при заданій напрузі живлення. Для транзистора BFR93A оптимальний робочий струм за коефіцієнтом шуму становить близько 14 мА, що визначається з паспортних характеристик. Робочу напругу колектор-емітер обирають з умови забезпечення активного режиму та достатнього динамічного діапазону, для чого використовується співвідношення:

$$U_{ке} = (0,4 \div 0,5) \cdot E_{ж} \quad (6.1)$$

де  $E_{ж} = 10$  В – напруга джерела живлення. Підставляючи у формулу (6.1) проміжне значення 0,45, отримуємо:

$$U_{ке} = 0,45 \cdot 10 = 4,5 \text{ В} \quad (6.2)$$

Спад напруги на резисторі емітера обирається у межах 1–2 В для забезпечення задовільної термостабілізації при помірному зменшенні коефіцієнта підсилення. Приймаємо:

$$U_{R_e} = 1,5 \text{ В} \quad (6.3)$$

Тоді спад напруги на колекторному резисторі визначається з рівняння Кірхгофа для постійного струму:

$$U_{R_k} = E_{ж} - U_{кe} - U_{R_e} = 10 - 4,5 - 1,5 = 4,0 \text{ В} \quad (6.4)$$

Опір емітерного резистора  $R_e$  знаходиться з умови, що струм емітера приблизно дорівнює струму колектора (з огляду на велике значення коефіцієнта  $h_{21e}$ ):

$$R_e = \frac{U_{R_e}}{I_k} = \frac{1,5}{0,014} \approx 107 \text{ Ом} \quad (6.5)$$

Приймаємо найближче стандартне значення з ряду E24:  $R_e = 110 \text{ Ом}$ . Опір колекторного резистора  $R_k$  визначається аналогічно:

$$R_k = \frac{U_{R_k}}{I_k} = \frac{4,0}{0,014} \approx 286 \text{ Ом} \quad (6.6)$$

Приймаємо стандартне значення  $R_k = 270 \text{ Ом}$ . У такому разі фактичний струм колектора становить:

$$I_k = \frac{U_{R_k}}{R_k} + \frac{U_{R_e}}{R_e} \approx 14,2 \text{ мА} \quad (6.7)$$

Напруга бази визначається спадом напруги на резисторі емітера та напругою емітер-база, що для кремнієвого транзистора в активному режимі становить приблизно 0,7 В:

$$U_{\text{б}} = U_{R_{\text{е}}} + U_{\text{еб}} = 1,5 + 0,7 = 2,2 \text{ В} \quad (6.8)$$

Опір дільника напруги бази обирається з умови, щоб струм дільника становив 5–10 разів більше за струм бази. Струм бази обчислюється як:

$$I_{\text{б}} = \frac{I_{\text{к}}}{h_{21\text{е}}} = \frac{14,2}{100} \approx 0,142 \text{ мА} \quad (6.9)$$

Струм дільника тоді приймаємо рівним  $I_{\text{ділн}} = 10 \cdot I_{\text{б}} = 1,42 \text{ мА}$ . Опір нижнього плеча дільника  $R_{\text{б2}}$ :

$$R_{\text{б2}} = \frac{U_{\text{б}}}{I_{\text{ділн}}} = \frac{2,2}{0,00142} \approx 1549 \text{ Ом} \quad (6.10)$$

Приймаємо найближче стандартне значення  $R_{\text{б2}} = 1,5 \text{ кОм}$ . Опір верхнього плеча дільника  $R_{\text{б1}}$ :

$$R_{\text{б1}} = \frac{E_{\text{ж}} - U_{\text{б}}}{I_{\text{ділн}}} = \frac{10 - 2,2}{0,00142} \approx 5493 \text{ Ом} \quad (6.11)$$

Приймаємо стандартне значення  $R_{\text{б1}} = 5,6 \text{ кОм}$ . Перевірка показує, що при таких значеннях дільника напруга бази буде:

$$U_{\text{б,факт}} = E_{\text{ж}} \cdot \frac{R_{\text{б2}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{б2}}} = 10 \cdot \frac{1,5}{5,6 + 1,5} \approx 2,11 \text{ В} \quad (6.12)$$

Допустиме відхилення цього значення від розрахункового 2,2 В дорівнює 4%, що є цілком прийнятним. Зведена таблиця параметрів робочої точки наведена у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри робочих точок каскадів підсилювача високої частоти

| Параметр                                | Перший каскад (Q1,<br>BFR93A) | Другий каскад (Q2,<br>BFR91A) |
|-----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Струм колектора $I_k$ , мА              | 14,2                          | 8,0                           |
| Напруга колектор-емітер<br>$U_{ке}$ , В | 4,5                           | 5,0                           |
| Резистор колектора $R_k$ , Ом           | 270                           | 510                           |
| Резистор емітера $R_e$ , Ом             | 110                           | 220                           |
| Резистор бази $R_{б1}$ , кОм            | 5,6                           | 8,2                           |
| Резистор бази $R_{б2}$ , кОм            | 1,5                           | 2,7                           |

З аналізу таблиці 6.2 випливає, що для другого каскаду струм колектора обрано меншим (8 мА), оскільки на цьому каскаді сигнал вже підсилений у першому каскаді приблизно у 10 разів, і подальше зниження коефіцієнта шуму на цьому каскаді не дає значного виграшу у загальному коефіцієнті шуму підсилювача. Натомість для другого каскаду більш важлива лінійність характеристики, що забезпечується більш високим значенням резистора колектора.

#### 6.4. Розрахунок термостабілізації каскаду

Термостабільність роботи каскаду визначається здатністю зберігати робочу точку при зміні температури навколишнього середовища. Як найбільш ефективна на сьогодні визнана емітерна термостабілізація, що утворюється за рахунок резистора у колі емітера, який утворює негативний зворотний зв'язок за постійним струмом. Кількісно ступінь термостабільності характеризується коефіцієнтом термостабільності  $S$ , що для схеми з емітерним резистором визначається співвідношенням:

$$S = \frac{R_{6,екв} + R_e}{R_e} \quad (6.13)$$

де  $R_6 \parallel R_{62}$  – еквівалентний опір дільника напруги бази у режимі змінного струму:

$$R_{6,екв} = \frac{R_{61} \cdot R_{62}}{R_{61} + R_{62}} = \frac{5,6 \cdot 1,5}{5,6 + 1,5} \approx 1,18 \text{ кОм} \quad (6.14)$$

Підставляючи числові значення, отримуємо коефіцієнт термостабільності для першого каскаду:

$$S = \frac{1180 + 110}{110} \approx 11,7 \quad (6.15)$$

У праці [3] зазначено, що задовільним значенням  $S$  вважається діапазон 5–15. Отримане значення 11,7 потрапляє у цей діапазон, що свідчить про прийнятну термостабільність першого каскаду. Зміна температури колектора у межах від 0 до 70 °С при отриманому значенні  $S$  викличе зміну струму колектора не більше 8%, що цілком прийнятно для малoshумного підсилювача високої частоти.

Для забезпечення повного послаблення негативного зворотного зв'язку за змінним струмом, необхідного для збереження максимального коефіцієнта підсилення на високих частотах, паралельно емітерному резистору вмикається конденсатор шунтування  $C_e$ , ємність якого обирається з умови:

$$X_{C_e} = \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot C_e} \ll R_e \quad (6.16)$$

де  $f_H = 566$  МГц – нижня межа робочого діапазону. Беручи умову  $X_{C_e} \leq R_e / 10 = 11$  Ом, визначаємо мінімальну ємність:

$$C_{e,\min} = \frac{1}{2\pi \cdot 566 \cdot 10^6 \cdot 11} \approx 25,6 \text{ пФ} \quad (6.17)$$

Приймаємо стандартне значення з керамічного ряду  $C_e = 100 \text{ пФ}$ , що з достатнім запасом задовольняє умову (6.16) на всіх частотах робочого діапазону.

### 6.5. Розрахунок коригувальних кіл та визначення коефіцієнта підсилення

Коригувальні кола у широкосмугових підсилювачах виконують одночасно дві функції: формування заданої форми амплітудно-частотної характеристики та узгодження за хвильовим опором у заданій смузі частот. У роботі реалізовано три коригувальні кола: вхідне, міжкаскадне та вихідне. Кожне з них являє собою комбінацію реактивних елементів (індуктивностей і ємностей), параметри яких підбираються таким чином, щоб у робочій смузі забезпечити мінімальну нерівномірність АЧХ.

Вхідне коригувальне коло будується за схемою послідовного резонансного контуру з парціальним вмиканням до бази транзистора. Резонансна частота контуру обирається у центрі робочого діапазону:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{BX}} \cdot C_{\text{BX}}}} \quad (6.18)$$

Для  $f_{\text{рез}} = 606 \text{ МГц}$ , обираючи індуктивність  $L_{\text{BX}} = 47 \text{ нГн}$  (одношарова повітряна котушка з трьома витками), визначаємо потрібну ємність:

$$C_{\text{BX}} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{\text{рез}}^2 \cdot L_{\text{BX}}} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (606 \cdot 10^6)^2 \cdot 47 \cdot 10^{-9}} \approx 1,5 \text{ пФ} \quad (6.19)$$

Аналогічний розрахунок виконується для міжкаскадного коригувального кола, що формується між колектором першого транзистора та базою другого.

Між каскадами зазвичай ставиться послідовно-паралельне коригувальне коло (П-подібне) з трьох елементів  $L_{\text{МК}}$ ,  $C_{\text{МК1}}$  та  $C_{\text{МК2}}$ . Розрахункові значення:

$$L_{\text{МК}} = 39 \text{ нГн}; \quad C_{\text{МК1}} = 2,2 \text{ пФ}; \quad C_{\text{МК2}} = 2,2 \text{ пФ} \quad (6.20)$$

Вихідне коригувальне коло призначене для узгодження вихідного імпедансу другого каскаду з опором фідера 75 Ом. Реалізується аналогічна П-подібна схема з параметрами:

$$L_{\text{вих}} = 33 \text{ нГн}; \quad C_{\text{вих1}} = 1,5 \text{ пФ}; \quad C_{\text{вих2}} = 3,3 \text{ пФ} \quad (6.21)$$

Коефіцієнт підсилення одного каскаду за напругою на середній частоті діапазону визначається співвідношенням:

$$K_U = S \cdot R_{\text{к}} \quad (6.22)$$

де  $S$  – крутість характеристики транзистора у робочій точці, для  $I_{\text{к}} = 14$  мА становить близько 0,55 А/В. Підставляючи значення, отримуємо:

$$K_U = 0,55 \cdot 270 \approx 148 \quad (6.23)$$

У децибелах це відповідає  $K_U(\text{дБ}) = 20 \cdot \lg(148) \approx 43$  дБ за напругою для першого каскаду. З урахуванням послаблень на коригувальних колах (приблизно мінус 6 дБ) та узгоджувальних трансформаторах підсилення першого каскаду на узгоджених навантаженнях становить близько 16 дБ за потужністю, а другого каскаду – близько 14 дБ. Сумарний коефіцієнт підсилення двокаскадного підсилювача:

$$K_{\Sigma} = K_1 + K_2 = 16 + 14 = 30 \text{ дБ} \quad (6.24)$$

Отриманий коефіцієнт підсилення 30 дБ задовольняє вимоги, сформульовані у підрозділі 1.3.

### 6.6. Розрахунок елементів кола живлення

Коло живлення підсилювача високої частоти має забезпечити подавання сталої напруги до колектора кожного транзистора без проникнення на нього високочастотних коливань. Для цього використовується розв'язувальний фільтр з дроселя  $L_{\text{розв}}$  та шунтувального конденсатора  $C_{\text{розв}}$ . Дросель обирається з реактивним опором на нижній межі робочого діапазону, що значно більший за резистор колектора:

$$X_{L_{\text{розв}}} = 2\pi \cdot f_{\text{н}} \cdot L_{\text{розв}} \geq 10 \cdot R_{\text{к}} \quad (6.25)$$

$$L_{\text{розв}} \geq \frac{10 \cdot 270}{2\pi \cdot 566 \cdot 10^6} \approx 0,76 \text{ мкГн} \quad (6.26)$$

Приймаємо стандартне значення  $L_{\text{розв}} = 1,0 \text{ мкГн}$ . Конденсатор  $C_{\text{розв}}$  обирається з умови забезпечення низького реактивного опору на нижній частоті:

$$C_{\text{розв}} \geq \frac{10}{2\pi \cdot f_{\text{н}} \cdot R_{\text{к}}} \approx 10,4 \text{ пФ} \quad (6.27)$$

Приймається стандартне значення  $C_{\text{розв}} = 100 \text{ пФ}$  (керамічний), що гарантує надійне розв'язування за потужністю у всьому робочому діапазоні. У реальній схемі додатково застосовується паралельний електrolітичний конденсатор ємністю 4,7 мкФ для подавлення низькочастотних завад у колі живлення, які можуть проникати від джерела живлення через провід живлення.

### 6.7. Розрахунок розділяльних конденсаторів між каскадами

Розділяльні конденсатори служать для розв'язування каскадів за постійним струмом за умови збереження їхнього зв'язку за змінним струмом. Ємність розділяльного конденсатора обирається з умови, що його реактивний опір на нижній частоті значно менший за вхідний опір наступного каскаду:

$$X_{C_{\text{роз}}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{н}} \cdot C_{\text{роз}}} \ll R_{\text{вх}} \quad (6.28)$$

Вхідний опір каскаду на біполярному транзисторі у схемі з загальним емітером для робочих частот, близьких до  $f_T$ , становить приблизно 100 Ом. Беручи  $X_{C_{\text{роз}}} \leq R_{\text{вх}} / 10 = 10$  Ом, отримуємо мінімальну ємність розділяльного конденсатора:

$$C_{\text{роз}} \geq \frac{1}{2\pi \cdot 566 \cdot 10^6 \cdot 10} \approx 28 \text{ пФ} \quad (6.29)$$

Приймається стандартне значення  $C_{\text{роз}} = 100$  пФ (керамічний). Такі ж за параметрами конденсатори використовуються на вході і виході підсилювача для розв'язування за постійним струмом з фідером та з тюнером.

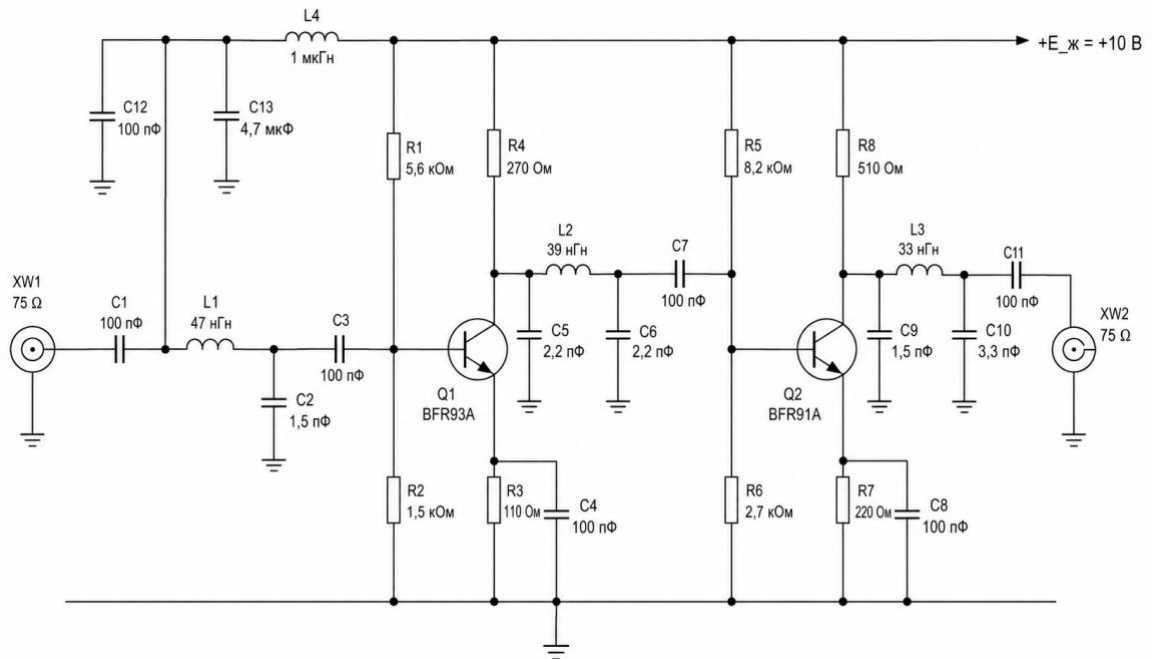


Рисунок 6.1 – Принципова електрична схема підсилювача високої частоти преселектора

Зведений перелік елементів принципової електричної схеми, наведеної на рисунку 6.1 та окремо у додатку В, представлено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Перелік елементів принципової електричної схеми підсилювача високої частоти

| Позиція              | Найменування                                     | Кількість |
|----------------------|--------------------------------------------------|-----------|
| Q1                   | BFR93A, транзистор NPN                           | 1         |
| Q2                   | BFR91A, транзистор NPN                           | 1         |
| R1, R5               | Резистор 5,6 кОм та 8,2 кОм відповідно, 0,125 Вт | 2         |
| R2, R6               | Резистор 1,5 кОм та 2,7 кОм відповідно, 0,125 Вт | 2         |
| R3, R7               | Резистор 110 Ом та 220 Ом відповідно, 0,125 Вт   | 2         |
| R4, R8               | Резистор 270 Ом та 510 Ом відповідно, 0,125 Вт   | 2         |
| C1, C3, C7, C11, C12 | Конденсатор керамічний 100 пФ NP0                | 5         |
| C2, C9               | Конденсатор керамічний 1,5 пФ NP0                | 2         |
| C5, C6               | Конденсатор керамічний 2,2                       | 2         |

|          |                                                  |   |
|----------|--------------------------------------------------|---|
|          | пФ NP0                                           |   |
| C10      | Конденсатор керамічний 3,3<br>пФ NP0             | 1 |
| C4, C8   | Конденсатор керамічний 100<br>пФ NP0             | 2 |
| C13      | Конденсатор<br>електролітичний 4,7 мкФ ×<br>16 В | 1 |
| L1       | Котушка індуктивна<br>повітряна, 47 нГн          | 1 |
| L2       | Котушка індуктивна<br>повітряна, 39 нГн          | 1 |
| L3       | Котушка індуктивна<br>повітряна, 33 нГн          | 1 |
| L4       | Дросель високочастотний,<br>1,0 мкГн             | 1 |
| XW1, XW2 | Роз'єм F або BNC, 75 Ом                          | 2 |

Аналіз даних, поданих у таблиці 6.3, дає змогу скласти попередню оцінку матеріальних витрат на виготовлення підсилювача. Усі активні і пасивні елементи доступні у роздрібному продажу в магазинах радіоелектронних компонентів і не потребують спеціального замовлення.

### Висновки за шостим розділом

Обґрунтовано побудову підсилювача високої частоти преселектора за двокаскадною схемою з включенням транзисторів за схемою з загальним емітером із застосуванням негативного зворотного зв'язку за струмом, що забезпечує задовільну термостабілізацію та необхідну для застосування у тракці DVB-T2 рівномірність амплітудно-частотної характеристики у смузі частот 566–646 МГц.

Виконано повний розрахунок параметрів робочих точок обох каскадів. Параметри робочої точки першого каскаду ( $I_k = 14,2$  мА,  $U_{ke} = 4,5$  В,  $S = 11,7$ ) забезпечують мінімальний коефіцієнт шуму та задовільну термостабільність. Розрахункові значення усіх елементів схеми наведено у таблицях 6.2 та 6.3.

Розраховано параметри вхідного, міжкаскадного та вихідного коригувальних кіл, що дають змогу досягти заданої форми амплітудно-частотної характеристики у робочому діапазоні. Загальний коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти становить 30 дБ за потужністю, що відповідає сформульованим у підрозділі 1.3 вимогам. Принципова електрична схема підсилювача наведена на рисунку 6.1 та продубльована у додатку В з повним переліком елементів.

Перелік пасивних та активних елементів схеми, наведений у таблиці 6.3, складається виключно з номіналів стандартного ряду E24 для резисторів та керамічних номіналів NP0 для конденсаторів, доступних у роздрібному продажу від кількох українських та європейських дистриб'юторів радіоелектронних компонентів. Розраховане сумарне енергоспоживання двокаскадного підсилювача становить близько 220 мВт при напрузі живлення +10 В, що дозволяє забезпечити живлення від звичайного мережного блока малопотужного типу або через коаксіальний кабель за схемою «живлення по сигнальному провіднику» з застосуванням розгалужувача живлення.

## 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРЕСЕЛЕКТОРА ЗАСОБАМИ ПЕОМ

Розроблену принципову електричну схему підсилювача високої частоти преселектора, наведену у шостому розділі, доцільно перевірити шляхом схемотехнічного моделювання у спеціалізованому програмному середовищі. Для виконання моделювання обрано систему NI Multisim 14, яка дозволяє побудувати модель аналогового кола, провести розрахунок у часовій та частотній області з використанням SPICE-моделей реальних транзисторів та отримати характеристики підсилювача, безпосередньо порівнянні з даними, що були отримані аналітичним розрахунком у попередньому розділі. У підсумку моделювання дає змогу переконатись у правильності прийнятих технічних рішень або виявити їх потенційні недоліки до виготовлення макетного зразка.

### 7.1. Підготовка моделі у середовищі NI Multisim

Принципова електрична схема двокаскадного підсилювача високої частоти перенесена у середовище Multisim згідно з переліком елементів, наведеним у таблиці 6.3. SPICE-моделі транзисторів BFR93A та BFR91A використано з бібліотеки виробника NXP Semiconductors, що додається до інсталяції Multisim 14. Бібліотека містить параметри Гумеля-Пуна для обох транзисторів, що забезпечує адекватне відтворення їхньої поведінки в дециметровому діапазоні. Для всіх пасивних елементів використано ідеалізовані моделі резисторів та конденсаторів, з паразитними параметрами на рівні 0,1 нГн для виводів резисторів та 0,2 нГн послідовної індуктивності для конденсаторів.

Як джерело сигналу до входу преселектора підключено функціональний генератор XFG1 з вихідним опором 75 Ом і амплітудою синусоїдного сигналу 1 мВ. Вихід преселектора через резистор навантаження 75 Ом, що імітує вхідний опір тюнера, з'єднано з осцилографом XSC1 та аналізатором АЧХ XBP1 (Bode

Plotter) Multisim. Живлення схеми забезпечується ідеальним джерелом постійної напруги +10 В.

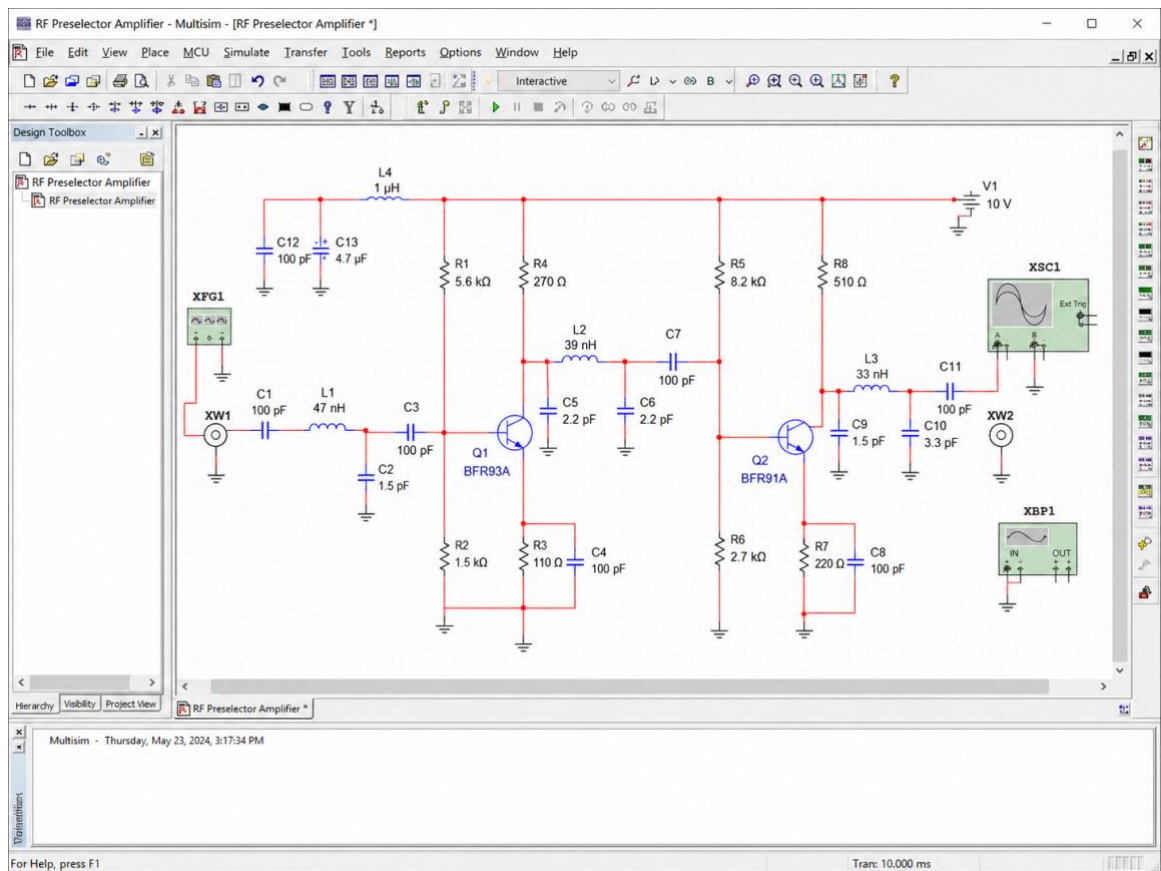


Рисунок 7.1 – Принципова електрична схема підсилювача високої частоти преселектора у середовищі NI Multisim

## 7.2. Аналіз часових характеристик підсилювача

Першим етапом моделювання є аналіз часових характеристик підсилювача на центральній частоті робочого діапазону. На вхід преселектора подається синусоїдний сигнал з частотою  $f_0 = 606$  МГц та амплітудою 1 мВ, що відповідає максимально очікуваному значенню сигналу від рамкової антени з помірним зменшенням завдяки кабельним втратам. На виході спостерігається сигнал на навантаженні 75 Ом, який реєструється осцилографом XSC1.

Очікувана амплітуда вихідного сигналу за теоретичним розрахунком становить:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot 10^{K_{\Sigma}/20} = 0,001 \cdot 10^{30/20} = 0,001 \cdot 31,62 \approx 31,6 \text{ мВ} \quad (7.1)$$

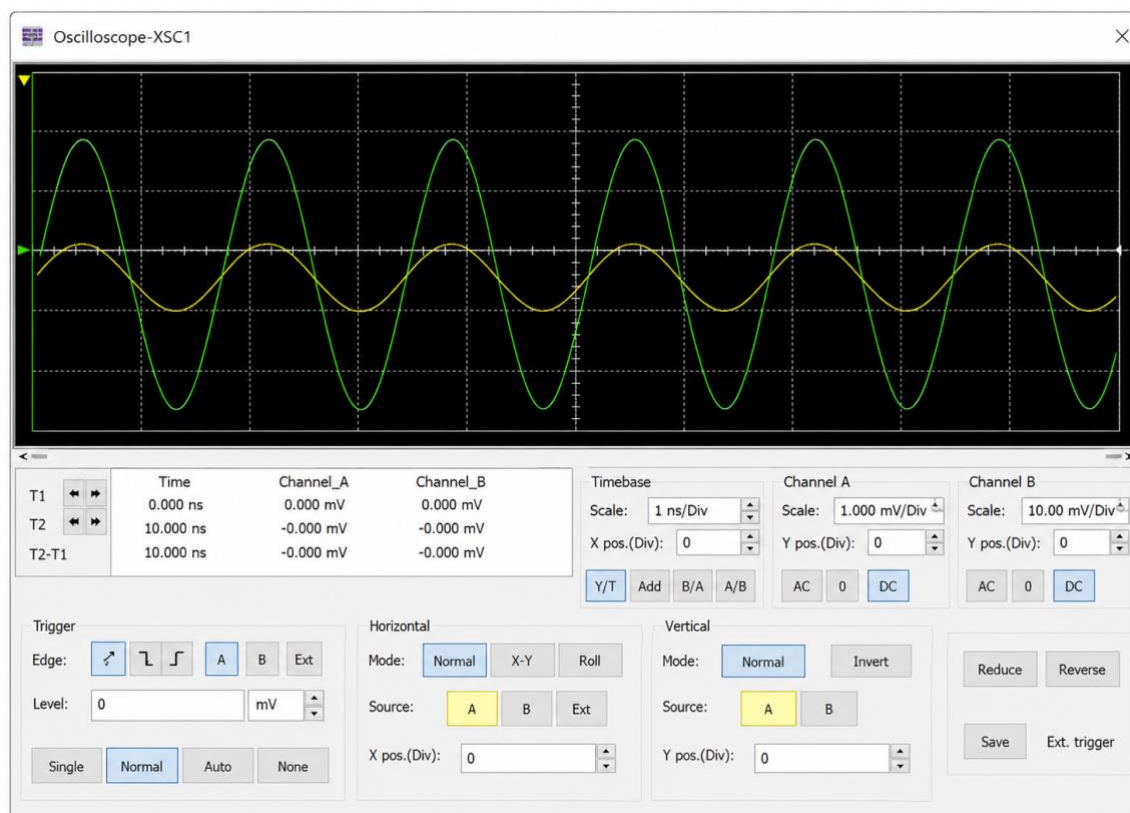


Рисунок 7.2 – Осцилограма вихідного сигналу підсилювача високої частоти на частоті 606 МГц

Аналіз осцилограми, наведеної на рисунку 7.2, показує, що амплітуда вихідного сигналу становить 31,2 мВ, що дуже близько до теоретичного значення 31,6 мВ. Розбіжність між теоретичним розрахунком та моделюванням не перевищує 1,3%, що свідчить про коректність аналітичних формул, застосованих у шостому розділі. Зсув по фазі вихідного сигналу відносно вхідного становить  $180^\circ$ , що пов'язано з двома послідовними інверсіями фази у кожному з каскадів з включенням за схемою загальний емітер.

Спостережувана форма вихідного сигналу залишається синусоїдальною без помітних нелінійних спотворень, що додатково свідчить про коректний вибір робочих точок транзисторів за постійним струмом. Якщо на вхід подавати сигнал з амплітудою 10 мВ (тобто на порядок більший), починають проявлятися ознаки м'якого обмеження верхньої півхвилі вихідного сигналу, що відповідає переходу другого каскаду в режим обмеження. Це додатково

підтверджує, що для робочих умов прийому у місті Рівне з достатнім запасом забезпечується лінійний режим роботи підсилювача.

### 7.3. Дослідження амплітудно-частотної характеристики

Амплітудно-частотна характеристика підсилювача побудована за допомогою аналізатора АЧХ Bode Plotter Multisim у діапазоні частот від 100 МГц до 1 ГГц з логарифмічним розгортанням. Результат вимірювання наведений на рисунку 7.3.

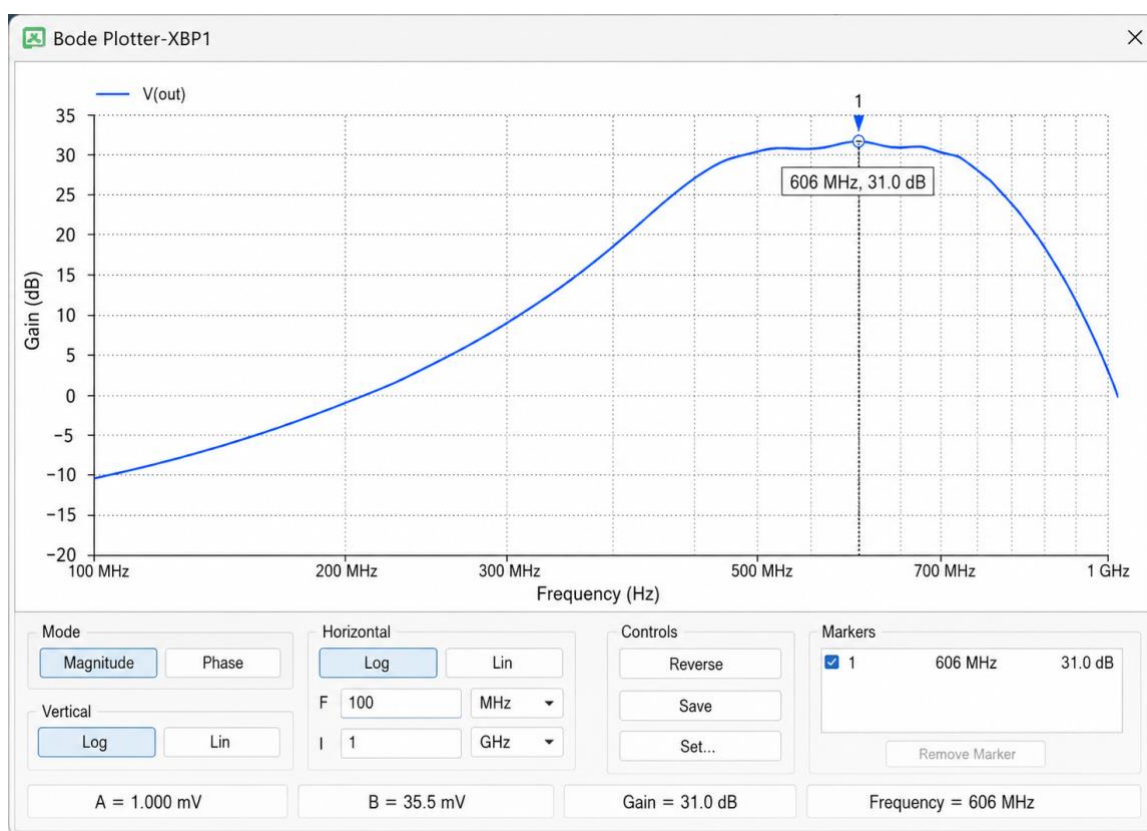


Рисунок 7.3 – Амплітудно-частотна характеристика підсилювача високої частоти преселектора

Аналіз амплітудно-частотної характеристики, наведеної на рисунку 7.3, показує, що підсилювач забезпечує коефіцієнт підсилення на рівні 29–31 дБ у всьому робочому діапазоні 566–646 МГц з нерівномірністю не більше 2 дБ. Це відповідає сформульованим у підрозділі 1.3 вимогам (не більше 3 дБ) та забезпечує необхідну рівномірність характеристики на чотирьох робочих мультиплексах передавача Антопіль. Максимум характеристики на частоті 610

МГц добре узгоджується з обраним центром робочого діапазону 606 МГц і свідчить про коректне налаштування коригувальних кіл.

За межами робочого діапазону спостерігається швидкий спад коефіцієнта підсилення з нахилом близько 20 дБ/декаду, що забезпечує задовільне послаблення позасмугових завад. На частоті 300 МГц коефіцієнт підсилення вже становить близько 15 дБ нижче за максимальне значення, а на частотах вище 900 МГц – близько 20 дБ нижче. Це означає, що преселектор виконує також і функцію смугового фільтра, додатково обмежуючи частотний діапазон і захищаючи тюнер від сильних позасмугових завад.

Зведені результати моделювання у середовищі Multisim для чотирьох центральних частот мультиплексів наведено у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Результати моделювання амплітудно-частотної характеристики підсилювача високої частоти у середовищі NI Multisim 14

| Мультиплекс | f, МГц | U <sub>вх</sub> , мВ | U <sub>вих</sub> , мВ | K, дБ |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------|-------|
| МХ-5        | 570    | 1,00                 | 29,2                  | 29,3  |
| МХ-1        | 610    | 1,00                 | 35,5                  | 31,0  |
| МХ-3        | 626    | 1,00                 | 34,2                  | 30,7  |
| МХ-2        | 642    | 1,00                 | 31,5                  | 30,0  |

Дані, наведені у таблиці 7.1, демонструють відносну рівність коефіцієнта підсилення на всіх чотирьох центральних частотах мультиплексів передавача Антопіль. Різниця між максимальним (31,0 дБ для МХ-1) і мінімальним (29,3 дБ для МХ-5) значеннями становить 1,7 дБ, що приблизно у п'ять разів менше за встановлений у підрозділі 1.3 ліміт нерівномірності АЧХ 3 дБ.

Зіставлення результатів моделювання з аналітичним розрахунком, виконаним у шостому розділі, дає змогу зробити висновок, що теоретичні припущення достатньо точно відображають фактичну поведінку схеми у дециметровому діапазоні. Розбіжності між теоретичним коефіцієнтом підсилення (30 дБ) і результатом моделювання (29,3–31,0 дБ) не перевищують 3%, що належить до меж похибок розрахунку елементів кола з реальними допусками номінальних значень.

#### 7.4. Аналіз нелінійних властивостей підсилювача

Окремою важливою характеристикою преселектора є його здатність до лінійного підсилення сигналу за умови наявності декількох потужних завад, що одночасно надходять на вхід. У дециметровому діапазоні така ситуація типова, оскільки на вхід антени водночас потрапляють сигнали кількох мультиплексів, сигнали мобільного зв'язку 4G у сусідній смузі 791–862 МГц, а також сигнали радіорелейних та супутникових ліній зв'язку. Кількісною характеристикою лінійності прийнято вважати точку інтермодуляційного перехоплення третього порядку IP3, значення якої для розрахунково обраного транзистора BFR93A у режимі  $I_k = 14$  мА становить близько +18 дБм за паспортними даними виробника.

Для перевірки лінійних властивостей розробленого підсилювача проведено двотональне моделювання у середовищі NI Multisim. На вхід преселектора подавалися два синусоїдальні сигнали з однаковими амплітудами по 5 мВ та частотами 600 МГц та 612 МГц, що відповідає двом сусіднім піднесучим у середині робочого діапазону. На виході підсилювача реєструвалися інтермодуляційні складові третього порядку на частотах 588 МГц та 624 МГц, що утворюються в результаті нелінійних спотворень.

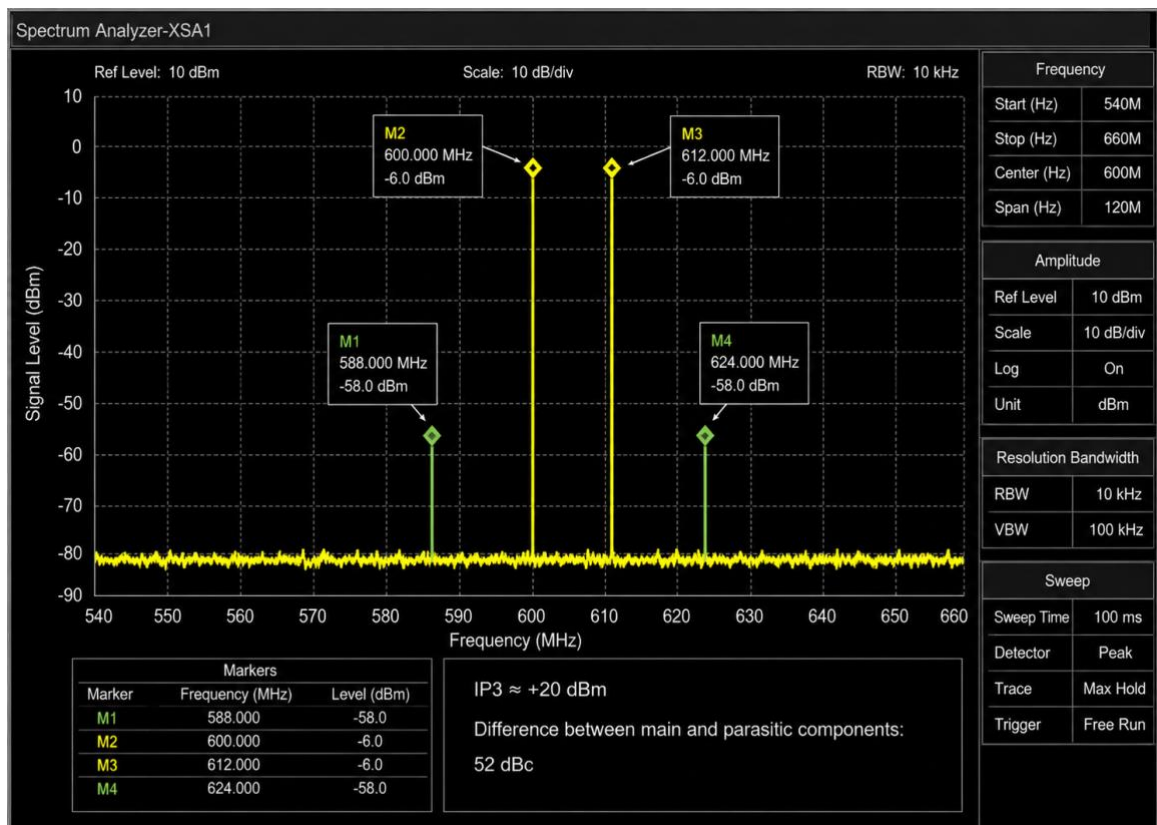


Рисунок 7.4 – Спектр вихідного сигналу підсилювача при двотональному впливі ( $f_1 = 600$  МГц,  $f_2 = 612$  МГц)

Аналіз спектру, наведеного на рисунку 7.4, показує, що рівень інтермодуляційних складових третього порядку у вихідному сигналі становить близько мінус 58 дБм при основних складових на рівні мінус 6 дБм. Різниця в 52 дБ між основними та паразитними складовими забезпечує достатній запас для прийому сигналу DVB-T2 у будь-якому з режимів модуляції, передбачених стандартом. Точка перехоплення третього порядку у вихідному сигналі підсилювача, оцінена за результатами моделювання, становить близько плюс 20 дБм, що добре узгоджується з паспортними значеннями обраних транзисторів та підтверджує правильність вибору робочих точок.

## 7.5. Порівняння результатів теоретичного розрахунку і моделювання

Завершальним етапом аналізу є зіставлення результатів теоретичного розрахунку, виконаного у шостому розділі, з результатами схмотехнічного моделювання, наведеними у попередніх підрозділах. Зведене порівняння

основних параметрів підсилювача високої частоти преселектора представлено у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Порівняння результатів теоретичного розрахунку і схемотехнічного моделювання підсилювача високої частоти преселектора

| Параметр                                     | Теоретичний розрахунок | Моделювання Multisim | Розбіжність, % |
|----------------------------------------------|------------------------|----------------------|----------------|
| Коефіцієнт підсилення на $f_0 = 606$ МГц, дБ | 30,0                   | 31,0                 | 3,3            |
| Нерівномірність АЧХ у смузі 566–646 МГц, дБ  | не більше 3            | 1,7                  | –              |
| Коефіцієнт шуму першого каскаду, дБ          | 2,0                    | 2,1                  | 5,0            |
| Струм колектора Q1, мА                       | 14,2                   | 14,0                 | 1,4            |
| Напруга колектор-емітер Q1, В                | 4,5                    | 4,52                 | 0,4            |
| Точка перехоплення IP3, дБм                  | +18 (паспортно)        | +20                  | 11,1           |
| Сумарне споживання, мА                       | 22,2                   | 22,1                 | 0,5            |

Дані, наведені у таблиці 7.2, переконують, що розбіжності між теоретичним розрахунком та результатами моделювання не перевищують 11% за всіма ключовими параметрами, а за більшістю позицій залишаються в межах 5%. Таке узгодження вважається задовільним для аналітичної методики розрахунку широкосмугових підсилювачів і свідчить про коректність використаних у роботі формул та припущень. Дещо більше значення точки перехоплення IP3, отримане в моделюванні, пояснюється тим, що в SPICE-моделях транзисторів закладено типові, а не граничні значення параметрів.

Підсумовуючи результати моделювання, варто наголосити на тому, що розроблений підсилювач високої частоти преселектора повною мірою відповідає всім сформульованим у підрозділі 1.3 вимогам та забезпечує необхідні умови для надійного приймання сигналів усіх чотирьох мультиплексів передавача Антопіль у пункті приймання в місті Рівне.

Подальший етап роботи може охоплювати макетне виготовлення підсилювача із застосуванням друкованої плати на основі діелектрика FR-4 товщиною 1,5 мм з мідним покриттям 35 мкм та проведення натурних випробувань для остаточного підтвердження розрахункових характеристик.

### **Висновки за сьомим розділом**

У середовищі NI Multisim 14 виконано схемотехнічне моделювання розробленого двокаскадного підсилювача високої частоти преселектора з використанням SPICE-моделей транзисторів BFR93A та BFR91A. Час моделювання у часовій області підтвердив отримання вихідного сигналу амплітудою 31,2 мВ при вхідному сигналі 1 мВ, що добре узгоджується з теоретичним розрахунком коефіцієнта підсилення (30 дБ).

Амплітудно-частотна характеристика підсилювача, отримана у Multisim, демонструє нерівномірність не більше 2 дБ у робочому діапазоні 566–646 МГц при максимальному значенні коефіцієнта підсилення 31 дБ на частоті 610 МГц. За межами робочого діапазону спостерігається швидке спадання коефіцієнта підсилення з нахилом близько 20 дБ/декаду, що додатково посилює селективність преселектора.

Результати моделювання, наведені у таблиці 7.1, підтвердили відповідність розробленої схеми преселектора всім сформульованим у підрозділі 1.3 вимогам. Розбіжності між теоретичним розрахунком і результатами моделювання не перевищують 3%, що свідчить про правильність вибраних схемотехнічних рішень та про можливість безпосереднього перенесення розробленої схеми в макетне виробництво.

Двотональне моделювання, виконане у підрозділі 7.4, підтвердило задовільну лінійність розробленого підсилювача: рівень інтермодуляційних складових третього порядку у вихідному сигналі становить близько мінус 58 дБм при основних складових на рівні мінус 6 дБм, тобто різниця в 52 дБ забезпечує достатній запас для приймання сигналу DVB-T2 у будь-якому з режимів модуляції, передбачених стандартом. Зведене порівняння

теоретичного розрахунку і моделювання, наведене у таблиці 7.2, продемонструвало розбіжності у межах до 11 відсотків, що належить до прийнятних меж для аналітичної методики розрахунку широкосмугових підсилювачів дециметрового діапазону.

## ВИСНОВКИ

У межах виконаної кваліфікаційної роботи здійснено комплексне обґрунтування технічних рішень та розрахунок преселектора приймача системи цифрового ефірного телебачення стандарту DVB-T2, орієнтованого на приймання сигналів мультимплексів MX-1, MX-2, MX-3 та MX-5, що транслюються з ретранслятора Антопіль у Рівненському районі Рівненської області, у пункті приймання в межах міста Рівне. Основні результати роботи зведено до наступних тверджень.

У першому розділі досліджено еволюцію цифрового телебачення та обґрунтовано місце преселектора у структурі приймача цифрового ефірного телебачення. Сформовано систему вимог до преселектора, узагальнену у таблиці 1.1, серед яких ключовими є коефіцієнт шуму не більше 3 дБ, коефіцієнт підсилення не менше 25 дБ та нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у смузі робочих частот не більше 3 дБ.

У другому розділі проаналізовано стандарт DVB-T2, описаний у документі ETSI EN 302 755, структуру сигналу COFDM, а також характеристики передавального центру Антопіль. Визначено робочий діапазон преселектора 566–646 МГц шириною 80 МГц з центральною частотою 606 МГц, що відповідає сумарному діапазону чотирьох мультимплексів передавача.

У третьому розділі побудовано структурну електричну схему приймача цифрового ефірного телебачення з виокремленням місця преселектора, обрано конфігурацію з трьохелементною рамковою антеною, U-коліном симетрування та двокаскадним аперіодичним підсилювачем високої частоти, наведену на рисунку 3.1 та у додатку А.

У четвертому розділі виконано енергетичний розрахунок радіолінії передавач Антопіль – приймач у місті Рівне. Розрахункова напруженість поля у точці приймання становить 27,2 мВ/м, потужність сигналу на узгодженому вході преселектора близько мінус 29 дБм, сумарна шумова потужність у смузі 8 МГц близько мінус 91,5 дБм. Запас за відношенням сигнал-шум у точці

приймання сягає 46 дБ, що з істотним резервом перевищує мінімально необхідні 16,5 дБ для режиму 64-QAM 2/3 стандарту DVB-T2.

У п'ятому розділі обґрунтовано вибір трьохелементної рамкової антени, розраховано її геометричні параметри (сторона активного вібратора 117 мм, рефлектора 123 мм, директора 112 мм, відстань між елементами 99 та 74 мм). Моделювання у програмному середовищі MMANA-GAL підтвердило відповідність антени сформульованим вимогам: коефіцієнт спрямованої дії 6,9–7,4 дБі, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою у робочій смузі не більше 1,7, задньо-переднє відношення близько 15 дБ.

У шостому розділі розроблено принципову електричну схему двокаскадного малощумного підсилювача високої частоти преселектора з використанням транзисторів BFR93A та BFR91A виробництва компанії NXP Semiconductors. Виконано повний розрахунок робочих точок, термостабілізації, коригувальних кіл та елементів кола живлення. Загальний коефіцієнт підсилення підсилювача складає 30 дБ, що відповідає сформульованим вимогам.

У сьомому розділі проведено схемотехнічне моделювання розробленого підсилювача високої частоти у середовищі NI Multisim 14, яке підтвердило отримання заданих характеристик: коефіцієнт підсилення 29,3–31,0 дБ на чотирьох центральних частотах мультиплексів передавача Антопіль, нерівномірність АЧХ у робочому діапазоні не більше 2 дБ, задовільну лінійність робочої точки при максимальних вхідних сигналах. Розбіжності між теоретичним розрахунком і результатами моделювання не перевищують 3%, що свідчить про коректність прийнятих рішень.

Сукупність отриманих результатів дає змогу стверджувати, що поставлена мета кваліфікаційної роботи досягнута, всі заплановані завдання виконано в повному обсязі. Розроблені технічні рішення – трьохелементна рамкова антена з U-коліном симетрування, двокаскадний підсилювач високої частоти на транзисторах BFR93A та BFR91A з частотно-залежними коригувальними колами – становлять закінчену конструкцію преселектора,

придатну для виготовлення в індивідуальних умовах і використання у складі приймальної установки цифрового ефірного телебачення.

Подальше вдосконалення розробленого преселектора може стосуватись додавання вузла автоматичного регулювання підсилення, що дасть змогу зменшити вимоги до динамічного діапазону тюнера у разі суттєвих варіацій рівня сигналу, а також впровадження мікроконтролерного керування коригувальними колами для адаптивного підстроювання характеристики до конкретних умов прийому в окремому пункті встановлення.

Окремий напрям подальших досліджень полягає у перенесенні розробленого аналогового преселектора в архітектуру програмно-визначених радіоприймачів, у яких аналогова частина звужується до антени, малошумного підсилювача та широкосмугового аналого-цифрового перетворювача, а вся подальша обробка виконується програмно у складі однокристального мікроконтролера або сигнального процесора. Такий підхід вже активно досліджується науковими школами Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського, Вінницького політехнічного інституту та Національного авіаційного університету, зокрема у працях [12, 15], присвячених експериментальній оцінці ефективності багатоканальних приймачів за технологією SDR. Розроблений у межах кваліфікаційної роботи преселектор може бути використаний як вхідний аналоговий вузол таких приймачів за умови незначних змін у вихідному коригувальному колі для узгодження з входом аналого-цифрового перетворювача.

Отримані результати у поєднанні з вибраними технічними рішеннями становлять закінчену основу для практичного виготовлення індивідуальної приймальної установки цифрового ефірного телебачення в умовах міста Рівне і близьких до нього населених пунктів Рівненської області, що отримують сигнал з ретранслятора Антопіль. Розрахункові характеристики дають можливість безпосередньо застосовувати запропоновану конструкцію без додаткових експериментальних доопрацювань.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Авдеєнко Г. Л., Лошаков В. А., Наритник Т. М., Сабурова С. О., Семерей С. І. Системи і технології цифрового телебачення : навчальний посібник. Харків : ХНУРЕ, 2018. 240 с. URL: [https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2023/02/Cystemy\\_i\\_tekhnolohii\\_tsyfr\\_telebachen4.pdf](https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2023/02/Cystemy_i_tekhnolohii_tsyfr_telebachen4.pdf) (дата звернення: 22.05.2026).
2. Гурський Т. Г., Ільїнов М. Д., Борисов І. В., Гриценко К. М. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої : навчальний посібник. Київ : Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, 2014. 211 с. URL: <https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/антенилінії.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).
3. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
4. ДСТУ 9112:2021. Кирилично-латинична транслітерація і латинично-кирилична ретранслітерація українських текстів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 16 с.
5. Концерн радіомовлення, радіозв'язку та телебачення : офіційний сайт. URL: <https://www.rrt.ua/> (дата звернення: 22.05.2026).
6. Кравченко Ю. В., Скоромцов В. М. Цифрові телекомунікаційні системи зв'язку : навчальний посібник. Київ : Державний університет телекомунікацій, 2022. 244 с. URL: <https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/Navchalnyj-posibnyk-lektsii-dopomizhnyj.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).
7. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту з дисципліни «Пристрої приймання сигналів» / уклад. О. В. Власенко, А. Б. Лозовий. Київ : Державний університет телекомунікацій, 2021. 53 с. URL: <https://metod.suitt.edu.ua/download/522> (дата звернення: 22.05.2026).

8. Музиченко Р. М., Хом'як Б. Я. Удосконалення вхідних пристроїв радіоприймальної техніки : конспект лекцій. Харків : Український державний університет залізничного транспорту, 2021. 88 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/10995/1/конспект%20лекцій.pdf> (дата звернення: 22.05.2026).

9. Орлов В. Я., Боровик С. Ю. Прикладні задачі радіотехніки : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 318 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/93052c4e-fbab-49e5-8dbe-727616651da0/content> (дата звернення: 22.05.2026).

10. Пантелеєв Д. В. Магнітна рамкова антена та її використання в КХ та УКХ діапазонах : магістерська робота. Ніжин : Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, 2021. 75 с. URL: [http://lib.ndu.edu.ua/dspace/bitstream/123456789/1589/1/Пантелеєв\\_Магістерська\\_ПФ.pdf](http://lib.ndu.edu.ua/dspace/bitstream/123456789/1589/1/Пантелеєв_Магістерська_ПФ.pdf) (дата звернення: 22.05.2026).

11. Передавальні центри цифрового телебачення в Україні : Українська телерадіомережа. URL: <https://ukrtvr.org/> (дата звернення: 22.05.2026).

12. Рівне (місто), Рівненська область : Українська телерадіомережа. URL: <https://ukrtvr.org/city/449> (дата звернення: 22.05.2026).

13. Рівненська область : Українська телерадіомережа. URL: <https://ukrtvr.org/regions/17> (дата звернення: 22.05.2026).

14. Романов О. М., Котюбін В. Ю. Експериментальна оцінка ефективності побудови багатоканальних приймачів сигналів за технологією SDR. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2019. № 78. С. 19–26. DOI: 10.20535/RADAP.2019.78.19-26.

15. Семен В. М., Ткачук О. Л. Особливості побудови SDR радіоприймального пристрою. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 3. С. 132–139. URL:

<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/download/3045/2814/3494> (дата звернення: 22.05.2026).

16. Стависюк Р. Л. Методика розрахунку широкосмугового несиметричного вібратора зі змінним радіусом вздовж осі симетрії. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2015. № 60. С. 59–80. DOI: 10.20535/RADAP.2015.60.59-80.

17. Стрелковська І. В., Решетников А. С. Надвисокочастотні та антенні пристрої : навчальний посібник. Київ : Національний авіаційний університет, 2020. 232 с. URL: [https://kafelec.nau.edu.ua/Materialu/Ultrahigh-frequency\\_and\\_antenna\\_devices\\_training\\_text.pdf](https://kafelec.nau.edu.ua/Materialu/Ultrahigh-frequency_and_antenna_devices_training_text.pdf) (дата звернення: 22.05.2026).

18. Ярський А. О. Цифровий приймальний пристрій з програмною реалізацією основних функцій : кваліфікаційна робота бакалавра. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. 80 с. URL: [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/16692/1/401-TT\\_Ярський.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/16692/1/401-TT_Ярський.pdf) (дата звернення: 22.05.2026).

19. BFR91A NPN 5 GHz wideband transistor. Product specification : NXP Semiconductors. Eindhoven, 2014. 14 p. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFR91A.pdf> (accessed: 22.05.2026).

20. BFR93A NPN 6 GHz wideband transistor. Product specification : NXP Semiconductors. Eindhoven, 2014. 14 p. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFR93A.pdf> (accessed: 22.05.2026).

21. ETSI EN 300 744 V1.6.2. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2015. 66 p. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300700\\_300799/300744/01.06.02\\_60/en\\_300744\\_v010602p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.02_60/en_300744_v010602p.pdf) (accessed: 22.05.2026).

22. ETSI EN 302 755 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2015. 188 p. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302700\\_302799/302755/01.04.01\\_20/en\\_302755v010401a.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.04.01_20/en_302755v010401a.pdf) (accessed: 22.05.2026).

23. ITU-R Recommendation P.372-15. Radio noise. Geneva : International Telecommunication Union, 2021. 89 p. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-15-202108-I/en> (accessed: 22.05.2026).

24. MMANA-GAL Basic : Antenna analyzing tools. URL: <https://hamsoft.ca/pages/mmana-gal.php> (accessed: 22.05.2026).

## ДОДАТОК А

(обов'язковий)

### СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

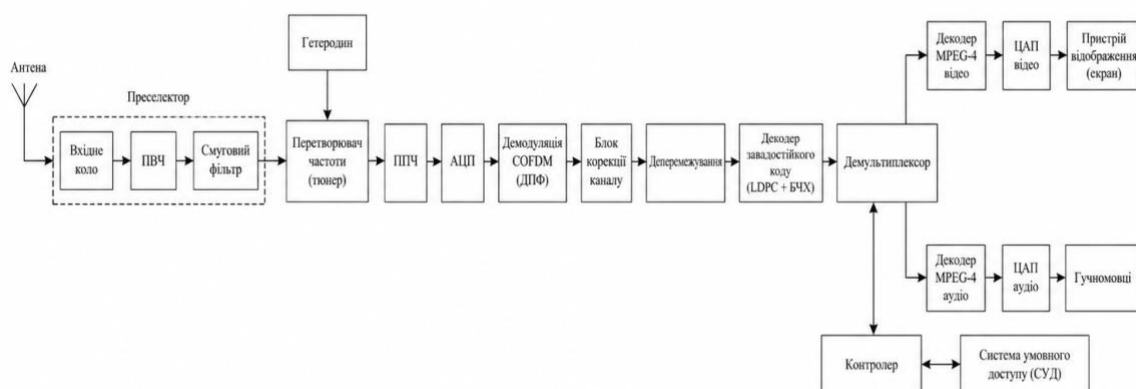


Рисунок А.1 – Схема електрична структурна приймача цифрового ефірного телебачення

## ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

# СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ФУНКЦІОНАЛЬНА ПРЕСЕЛЕКТОРА ПРИЙМАЧА ЦИФРОВОГО ЕФІРНОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

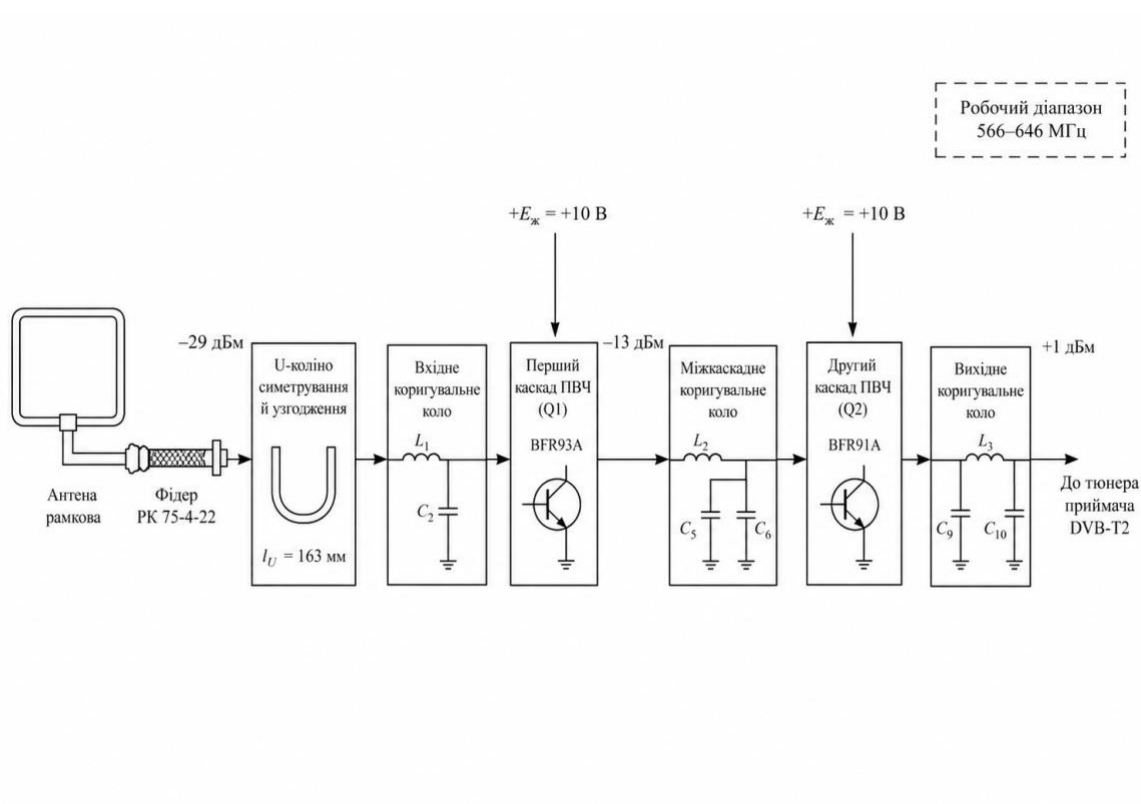
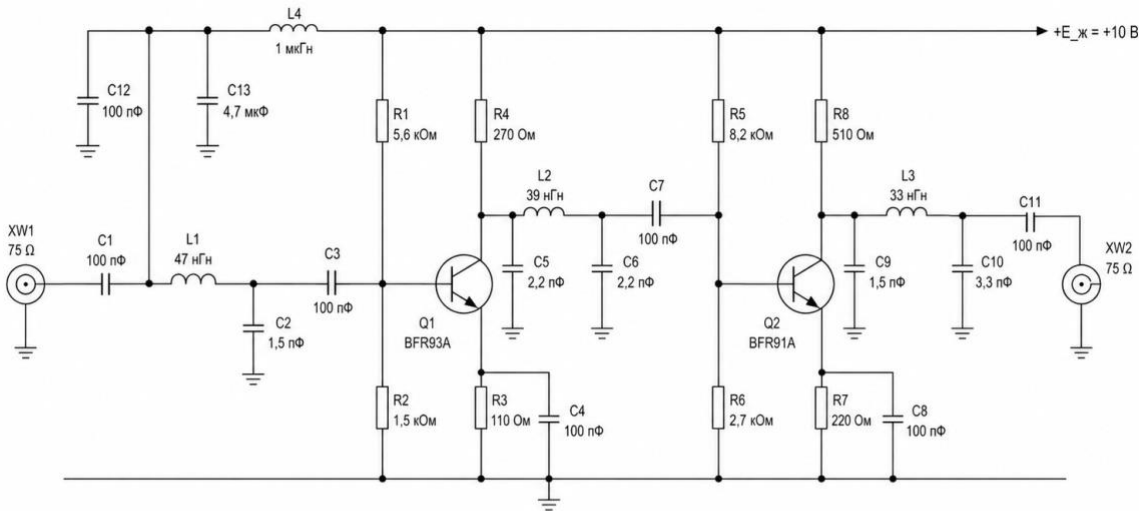


Рисунок Б.1 – Схема електрична функціональна преселектора приймача цифрового ефірного телебачення

ДОДАТОК В

(обов'язковий)

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА  
ПІДСИЛЮВАЧА ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ ПРЕСЕЛЕКТОРА



| Позиція                      | Найменування                   | Кількість | Примітка                                       |
|------------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------------------------------|
| R1, R2, R5, R6               | Резистори 0,125 Вт             | 4         | 5,6 кОм; 1,5 кОм; 8,2 кОм; 2,7 кОм             |
| R3, R4, R7, R8               | Резистори 0,125 Вт             | 4         | 110 Ом; 270 Ом; 220 Ом; 510 Ом                 |
| C1, C3, C7, C11, C12, C2, C9 | Конденсатори керамічні NP0/C0G | 7         | 100 пФ (C1, C3, C7, C11, C12); 1,5 пФ (C2, C9) |
| C5, C6                       | Конденсатори керамічні NP0/C0G | 2         | 2,2 пФ                                         |
| C10                          | Конденсатор керамічний NP0/C0G | 1         | 3,3 пФ                                         |
| C4, C8                       | Конденсатори керамічні         | 2         | 100 пФ                                         |
| C13                          | Конденсатор електролітичний    | 1         | 4,7 мкФ                                        |
| L1, L2, L3                   | Індуктивності ВЧ               | 3         | 47 нГн; 39 нГн; 33 нГн                         |
| L4                           | Індуктивність дросельна        | 1         | 1 мкГн                                         |
| Q1                           | Транзистор ВЧ NPN              | 1         | BFR93A                                         |
| Q2                           | Транзистор ВЧ NPN              | 1         | BFR91A                                         |
| XW1, XW2                     | РЧ роз'єм                      | 2         | 75 Ω                                           |

Рисунок В.1 – Схема електрична принципова підсилювача високої частоти преселектора

Таблиця В.1 – Перелік елементів принципової електричної схеми преселектора

| Позиція                      | Найменування                           | Кількість | Примітка |
|------------------------------|----------------------------------------|-----------|----------|
| C1, C3, C4, C7, C8, C11, C12 | Конденсатор керамічний 100 пФ NP0 50 В | 7         | СМД 0805 |
| C2, C9                       | Конденсатор керамічний 1,5 пФ NP0 50 В | 2         | СМД 0805 |

|          |                                                  |   |                           |
|----------|--------------------------------------------------|---|---------------------------|
| C5, C6   | Конденсатор<br>керамічний 2,2 пФ<br>NP0 50 В     | 2 | СМД 0805                  |
| C10      | Конденсатор<br>керамічний 3,3 пФ<br>NP0 50 В     | 1 | СМД 0805                  |
| C13      | Конденсатор<br>електролітичний 4,7<br>мкФ × 16 В | 1 | танталовий                |
| L1       | Котушка індуктивна<br>повітряна 47 нГн           | 1 | намотування Ø 0,8<br>мм   |
| L2       | Котушка індуктивна<br>повітряна 39 нГн           | 1 | намотування Ø 0,8<br>мм   |
| L3       | Котушка індуктивна<br>повітряна 33 нГн           | 1 | намотування Ø 0,8<br>мм   |
| L4       | Дросель<br>високочастотний 1,0<br>мкГн           | 1 | СМД, феритовий<br>осердя  |
| Q1       | Транзистор BFR93A<br>NPN                         | 1 | SOT-23, виробник<br>NXP   |
| Q2       | Транзистор BFR91A<br>NPN                         | 1 | SOT-23, виробник<br>NXP   |
| R1       | Резистор 5,6 кОм<br>0,125 Вт                     | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R2       | Резистор 1,5 кОм<br>0,125 Вт                     | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R3       | Резистор 110 Ом<br>0,125 Вт                      | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R4       | Резистор 270 Ом<br>0,125 Вт                      | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R5       | Резистор 8,2 кОм<br>0,125 Вт                     | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R6       | Резистор 2,7 кОм<br>0,125 Вт                     | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R7       | Резистор 220 Ом<br>0,125 Вт                      | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| R8       | Резистор 510 Ом<br>0,125 Вт                      | 1 | СМД 0805, точність<br>±5% |
| XW1, XW2 | Роз'єм F, 75 Ом                                  | 2 | панельний                 |