Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бездротові технології інтелектуальної радіоелектронної апаратури

Курсова робота

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»
спеціальності 172 Електронні комунікації та Радіотехніка

Н. В. Єзерський

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

Автор: *Єзерський Нікіта Валерійович*, PhD, ст. викл.

Рецензент *Чмельов В.О.*, к.т.н., доцент КПІ ім. І. Сікорського

Відповідальний редактор *Мовчанюк, А.В.*, к.т.н., проф. КПІ ім. І. Сікорського

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 10.04. 2025 р.)
за поданням вченої ради радіотехнічного факультету
(протокол № 03/25 від 31.03.2025 р.)

БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ. КУРСОВА РОБОТА [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки» спец. 172 Електронні комунікації та Радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Н. В. Єзерський – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 34 с.

В даному посібнику викладено матеріал, що містить вказівки щодо виконання курсової роботи з курсу «**Бездротові технології інтелектуальної радіоелектронної апаратури**» призначений для здобувачів ступеня магістр за спеціальністю 172 Електронні комунікації та Радіотехніка

УДК XXX.XX (XXX)

Реєстр. № НП XX/XX-XXX. Обсяг 1.5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

♥ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

Зміст

Вступ 4
Мета та основні завдання курсової роботи 5
Прелік скорочень 6
Курсова робота з предмету БІТРА: 7
Розрахунок п.п. 2: 8
Розрахунок п.п. 3: 9
Розрахунок п.п. 4: 9
Розрахунок п.п. 5: 16
Розрахунок п.п. 6: 18
Розрахунок п.п. 7: 20
Розрахунок п.п. 8: 21
Розрахунок п.п. 9: 22
Розрахунок п.п. 10: 24
Літературні джерела: 29
Додаток А 32
Додаток Б 34

Вступ

Під час виконання курсової роботи студент має зробити розрахунок, що пов'язаний з додетекторним трактом радіоприймального пристрою (РПП) і демодуляцією амплітудно (АМ) та частотно (ЧМ) модульованих сигналів радіомовного РПП. Фактично, цей розрахунок завершується на етапі складання структурної схеми РПП.

При виконанні курсової роботи студент набуватиме таких навичок:

1) Застосування стандартних методів розрахунку при проектуванні вузлів телекомунікаційних та радіотехнічних пристроїв і систем.
2) Використання базових методів, способів та засобів отримання, передавання, обробки та зберігання інформації.
3) Вирішення стандартних завданнь професійної діяльності на основі інформаційної та бібліографічної культури із застосуванням інформаційно-комунікаційних технологій
4) Розуміння сутності і значення інформації в розвитку сучасного інформаційного суспільства

Мета та основні завдання курсової роботи

1) Зробити короткий огляд побудови РПП вказаного у завданні та потенційного застосування.
2) Розрахувати ширину спектру сигналу.
3) Обрати нерівномірність частотної характеристики лінійного тракту в межах смуги пропускання:
4) Розрахувати допустимий коефіцієнт шуму РПП
5) Обрати активний елемент
6) Розрахувати коефіцієнт підсилення лінійного тракту до детектора
7) Обрати резонансну систему для перелаштування РПП до діапазону робочих частот та розбити на піддіапазони за необхідності.
8) Вибір значення проміжної частоти та розрахунок частот паразитних каналів РПП
9) Розрахувати ослаблення на границях смуги пропускання та обрати селективну систему тракту СЧ.
10) Обрати селективну систему тракту ПЧ та визначити чисельно за графіками досягнуте значення селективності
11) Накреслити структурну схему РПП

Прелік скорочень

АМ — амплітудна модуляція

ЕРС — електрорушійна сила

ДС — діаграма спрямованості

ЛТ — лінійний тракт

ПСЧ —підсилювач сигнальної частоти

РПП — радіоприймальний пристрій

ССх — структурна схема

ЧМ — частотна модуляція

Курсова робота з предмету БІТРА:

За десятиліття існування галузі РПП структурні схеми (далі ССх) АМ та ЧМ сигналів майже не змінился у вигляді, рис. 1.1, 1.2:

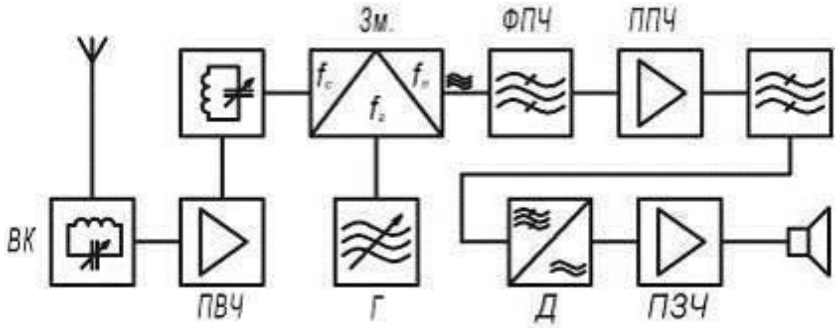


Рисунок 1.1 – Один з варіантів структурної схеми узагальненого супергетеродинного радіоприймача (АМ сигналів) (Г – гетеродин, ВК вхідне коло, ПВЧ – підсилювач високої частоти, Зм.–змішувач, ФПЧ–фільтр проміжної частоти, ППЧ–підсилювач проміжної частоти, Д–детектор, ПЗЧ–підсилювач звукової частоти)

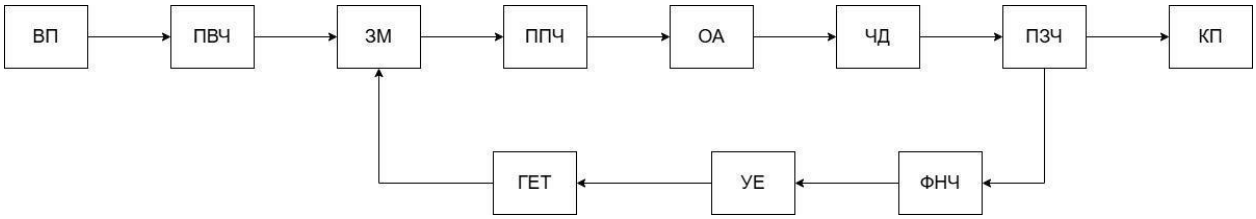


Рисунок 1.2 – Один з варіантів структурної схеми узагальненого супергетеродинного радіоприймача (ЧМ сигналів) (ОА–обмежувач амплітуди, ЧД–частотний детектор)

Якщо умова по придушенню побічних каналів приймання не виконується за допомогою застосування найпростіших структурних схем, то переходять до РПП інфрадинного типу з подвійним перетворенням частот, рис. 1.3 [1].

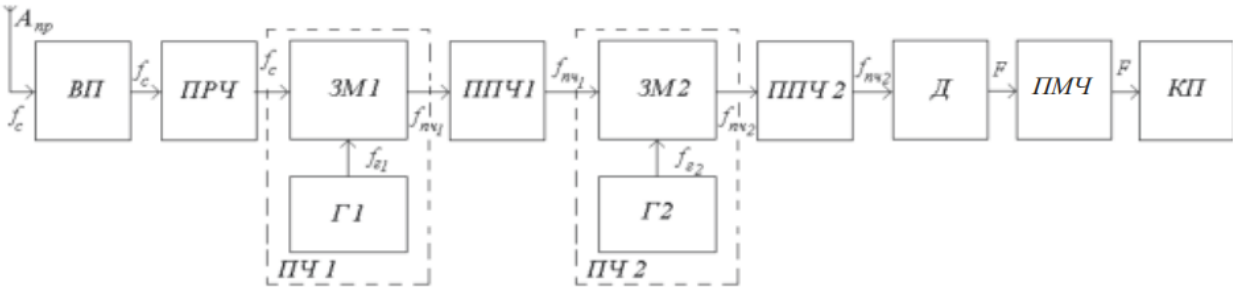


Рисунок 1.3 – Структурна схема узагальненого супергетеродинного РПП інфрадинного типу [1]

де: ПРЧ–підсилювач радіо частоти, ПМЧ–підсилювач частоти модуляції

Приклади побудови структурних НВЧ схем з підбором елементів РПП стандартів GSM, TDMA, LAN, Bluetooth, GPS, АМ/ЧМ тюнерів можна побачити в [2, с. 41-57]. Також в цьому документі присутня довідка з параметрів транзисторів.

Розрахунок п.п. 2:

Ширина спектру сигналу визначається, рис. 1.4 [3]:

<u>Для АМ сигналу:</u>

$$\Delta F_c = 2*F_{max}$$

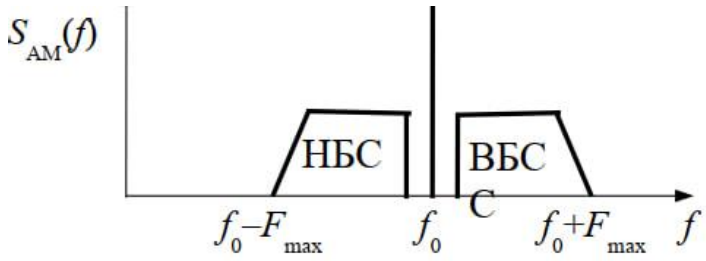


Рис. 1.4 – Спектр АМ сигналу

де: F_{max} – це максимальна частота сигналу в спектрі інформаційного повідомлення (не задається у варіанті завдання), не має нічого спільного з носійною частотою.

<u>Для ЧМ сигналу:</u>

$$\Delta F_c = 2*F_{max}*(1+\psi+\sqrt{\psi_м})$$

де: ψ – це індекс модуляції*

*максимальну девіацію частоти при розрахунку ψ $\Delta f_{m\ max}$ обрати рівною номеру варіанту в кГц, але не більше 50.

$$\Psi = \Delta f_{m\ max} / F_{max}$$

Розрахунок п.п. 3:

Нерівномірність частотної характеристики лінійного тракту в межах смуги пропускання розрахуємо за виразом [3]:

Для АМ:

$$\sigma_П \leq (\sigma_{П\ прк} + \sigma_{П\ ПЗч}) - (\sigma_{ПА} + \sigma_{ПД})$$

де: $\sigma_{П\ прк}$ – задана нерівномірність частотної характеристики (ЧХ) приймача за звуковим тиском (для АМ та ЧМ сигналу прийняти 14 дБ [4]).

$\sigma_{П\ ПЗч}$, $\sigma_{ПА}$, $\sigma_{ПД}$ – це нерівномірність частотної характеристики у області верхніх частот ПЗЧ, детектора (Дет), акустичної системи.

Стандартними значеннями для РПП є:

$\sigma_{П\ ПЗч}$= 4...6 дБ;

$\sigma_{ПА}$=6...8 дБ;

$\sigma_{ПД}$=1…2 дБ.

Для ЧМ: $\sigma_П$ задають в межах від 3 до 6 дБ. Зауважте, що чим менша нерівномірність обирається для реалізації, тим складніше її реалізувати.

Розрахунок п.п. 4:

Розраховувати допустимий коефіцієнт шуму потрібно з таких міркувань, рис. 1.5, 1.6 [3]:

ЕРС завад у антені визначається наступним виразом:

$$E_{АП} = \acute{\varepsilon}_З * h_д * sqrt(П_Ш)$$

де: $\acute{\varepsilon}_З$ – питомий рівень завад, наведених у антені в смузі 1 кГц, рис. 1.5, 1.6

$h_д$ – діюча висота антени

$П_{Ш}$ – шумова смуга РПП, при проектуванні структурної схеми РПП її приймають рівною 1,1……2*П

Якщо значення чутливості не задовільняє розробників, то можна зменшити смугу пропускання РПП.

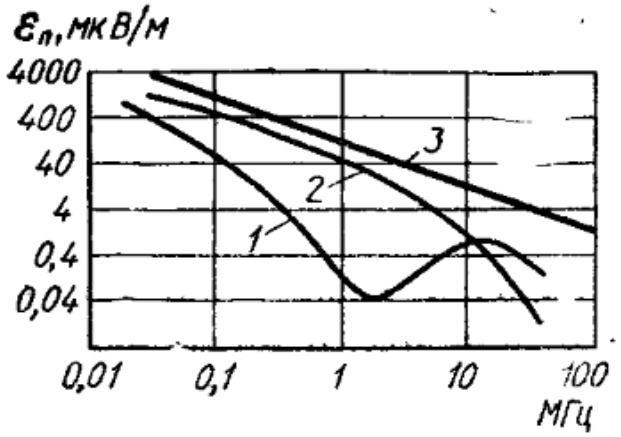


Рисунок 1.5 – Залежність питомої напруженості поля зовнішніх завад від частоти [3]: 1 – середній рівень завад вдень, 2 – середній рівень завад вночі 3 – середній рівень індустріальних завад в містах.

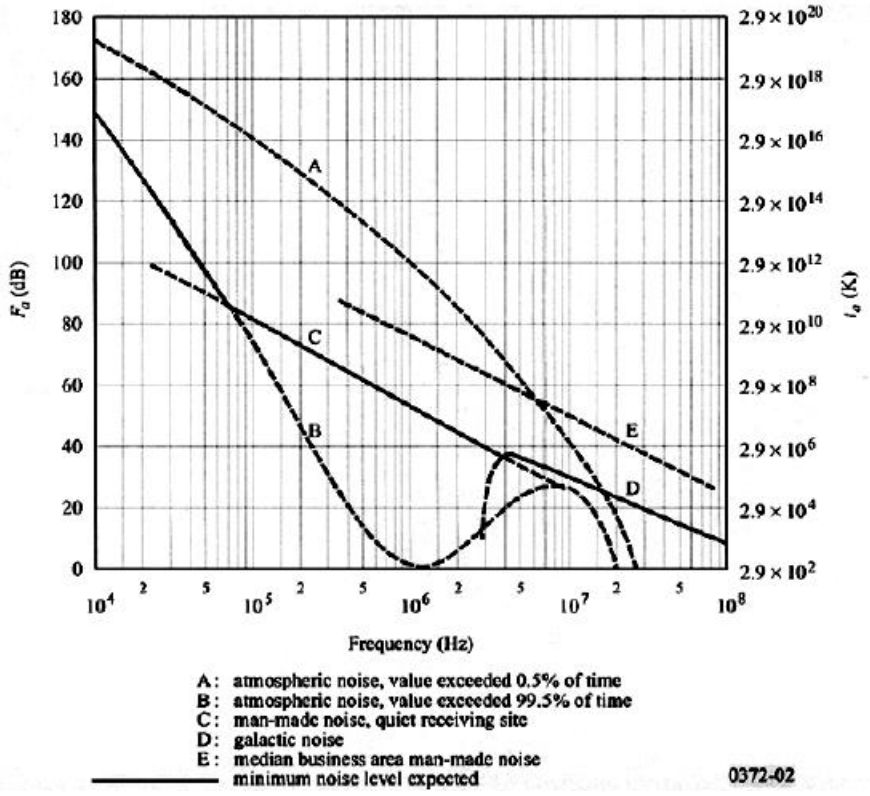


Рисунок 1.6 – Типовий природний і штучний рівень шуму від VLF до VHF діапазонів [5]

Загальний рівень завад визначається виразом:

$$E_з=\text{sqrt}((E_а)^2+(E_к)^2+(E_{пром})^2+(E_{внутр})^2)$$

де: $E_а$–напруженість поля атмосферних завад

$E_к$–напруженість поля космічних завад

$E_{пром}$–напруженість поля промислових завад

$E_{внутр}$–напруженість поля внутрішніх завад РПП

Діючою висотою антени є висота деякої уявної антени еквівалентної дії випромінювання реальної антени

Для визначення діючої довжини антени та опору скористаємось формулами для симетричного вібратора, рис. 1.7, 1.8 [6]:

$$h_д=(\lambda/\pi)*\mathbf{tg(}kl\,/\,2\mathbf{)} \text{ при } l\,/\,\lambda \le 0\mathbf{,}35 \text{ , або}$$

$$h_д=(\lambda/\pi)*[(\mathbf{1-cos}kl)\,/\,\sin kl] \text{ при } l\,/\,\lambda \approx 0\mathbf{,}6\ldots0{,}7$$

де: $k=2\pi/\lambda$

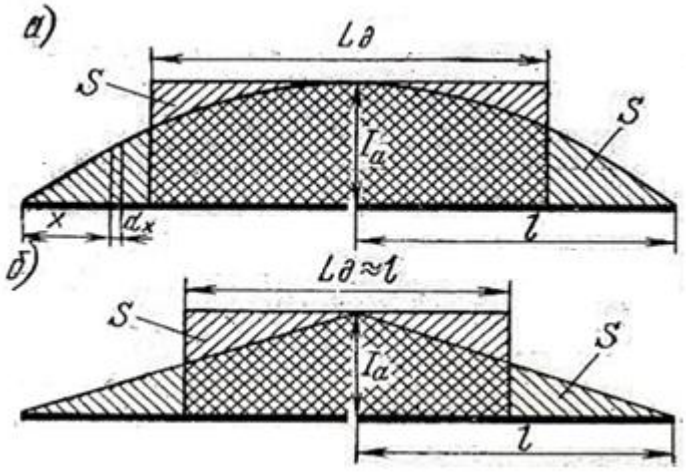


Рисунок 1.7 – Симетричний вібратор а – загальний випадок; б – короткий вібратор L<< λ; L – довжина вібратора; $L_д$ – діюча довжина вібратора; l – довжина плеча вібратора.

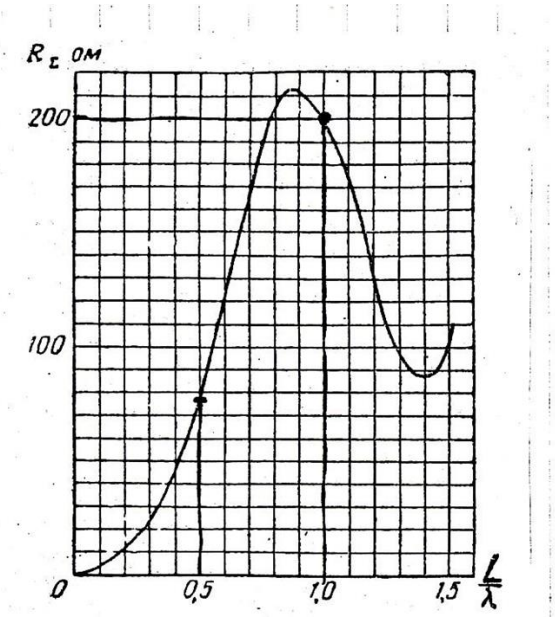


Рисунок 1.8 Залежність опору симетричного вібратору від співвідношення довжини плеча до довжини хвилі l/ λ.

Також можна використати магнітну рамкову антену, яка буде компактною конструктивно, особливо на низьких частотах в порівнянні з симетричним вібратором, рис. 1.9 [7]:

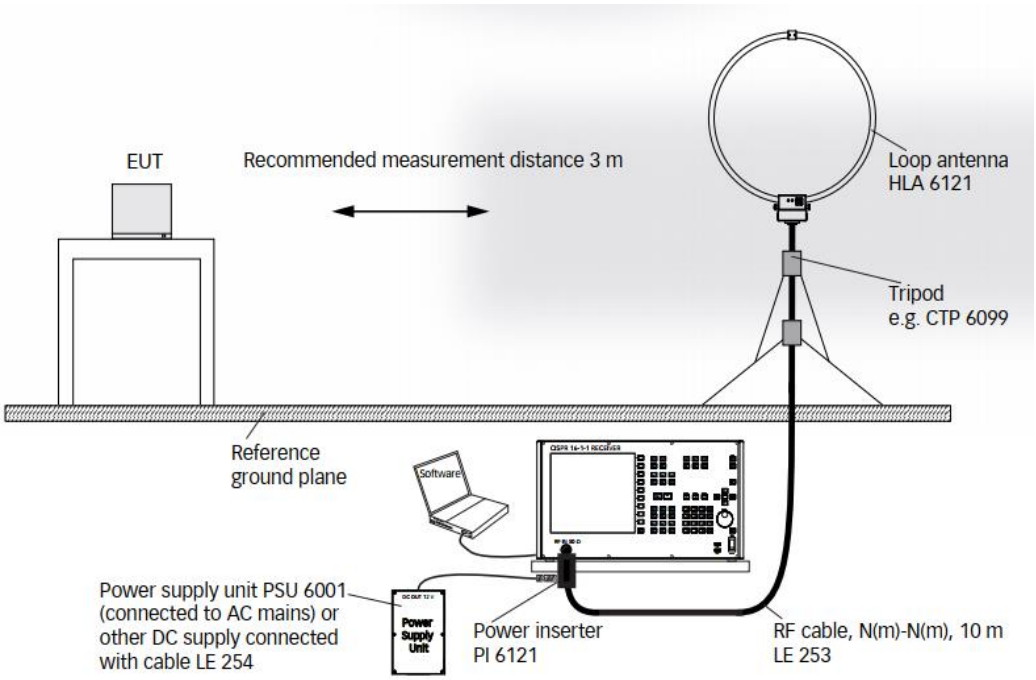


Рисунок 1.9 Магнітна антена HLA6121 в схемі установки для вимірювання електромагнітної сумісності [7]

$$h_d = Q*k*n*S$$

де: Q – добротність антени, порядку декілька сотень, безрозмірна

$k=2\pi/\lambda$;

n–кількість витків

S – площа рамки

Зображені на рис. 1.9 умови застосовуються при калібруванні та тестуванні на електромагнітну сумісність в безеховій камері, або на випробувальному майданчику.

Склад устаткування, зображені на рис. 1.9

EUT – equipment under test (пристрій, що випробовується)

Loop antenna – магнітна антена

Tripod – тринога

Power inserter – пристрій вводу потужності

Reference ground plane – опорна площина заземлення і вона має мати реальне заземлення.

Power supply unit – пристрій живлення

І тепер можемо розрахувати допустимий коефіцієнт шуму РПП [3]:

$$NF_{Доп}=[(E_{Ар}/\gamma)^2-(E_З)^2*(h_д)^2 *(П_Ш)^2]/(4k*T_0* П_Ш*r_А)$$

де: γ – мінімально допустиме значення середньоквадратичних значень сигнал/шум (С/Ш) на вході детектору.

T_0 – стаціонарна температура = 293К;

k – стала Больцмана

Якщо значення $NF_{Доп}$ було отримано від'ємним, то в чисельнику залишається тільки складова $(E_{Ар}/\gamma)^2$, а $(E_З)^2*(h_д)^2 *(П_Ш)^2$ виключаємо з розрахунку. Через те, що в такому разі шумова складова зведе нанівець корисний сигнал. Тобто без врахування зовнішніх завад.

І тут можна вважати, що РПП проектується з розрахунку на роботу в лабораторих умовах на еквівалент антени без дії на РПП зовнішніх завад.

<u>Для РПП АМ сигналів</u> [3]**<u>:</u>**

$$\gamma= \gamma_{вих}*sqrt[(k_п^2+m_{max}^2)П_{ПЗч}/(m_{max}^2*П_Ш)]$$

де: $k_п$ – пік-фактор (відношення максимального та середньоквадратичного заначення напруги повідомлення), для телефонних сигналів зазвичай приймають $k_п$=3;

$П_{ПЗч}$, смугу пропускання підсилювача звукових частот прийняти рівним добутку коефіцієнту 1.1 на смугу стандартного телефонного сигналу;

m_{max} – коефіцієнт АМ модуляції;

$γ_{вих}$ – задане співвідношення С/Ш на виході РПП, обирається в межах 3…..10

<u>Для РПП ЧМ сигналів</u> [3]<u>:</u>

$$γ= γ_{вих}* k_п \, sqrt(П_{ПЗч}/П_Ш)*/[sqrt(3)*ψ_м]$$

У діапазонах метрових і більш коротких хвиль вираз набуде такого вигляду [3]:

$$Ш_{Доп}=К_{РФ}[(P_{Ар}/(k*T_0* П_Ш* γ^2)-t_A+1)$$

де: $К_{РФ}$ – це коефіцієнт передачі потужності фідерної лінії (хвилеводу), що з'єднує антену з входом приймача, рис. 1.10, 1.11.

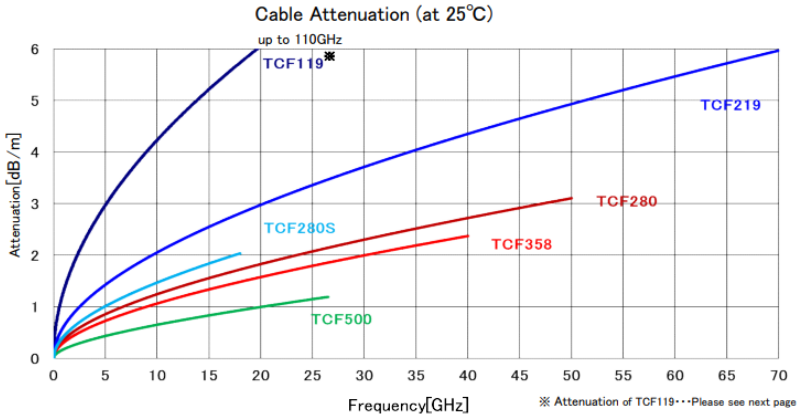
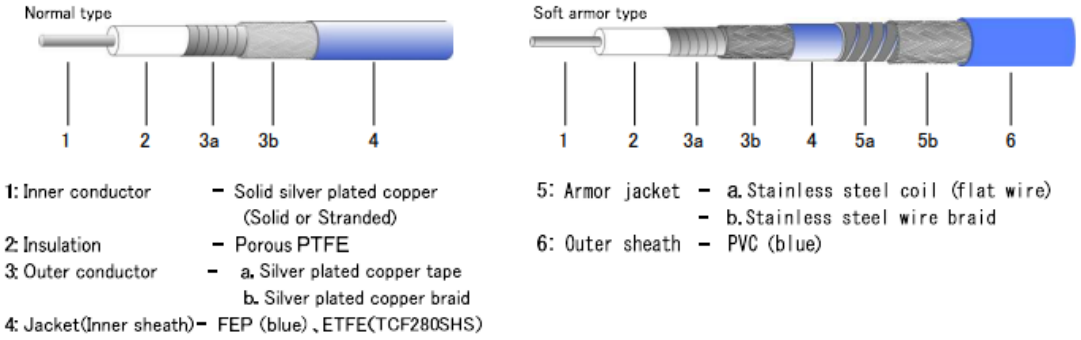


Рисунок 1.10 – Залежність затухання коаксіального кабелю (дБ/м) від частоти [8]

(а)



(б)

Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд (а) та внутрішня структура кабелю (б) [8]

t_A – відносна шумова температура антени

$t_A = T_A / T_0$

T_A – еквівалентна шумова температура антени і визначається за наступним виразом:

$$T_A = T_0*(1-\eta_A)+(T_K+ T_{ATM}+T_З)*\eta$$

де: $T_З$ – це температура, залежна від направлення антени (від зеніту до «на землю»), максимальне значення=10К при направлені «в зеніт», обрати її значення мінус № варіанту, якщо діапазон робочих частот РПП лежить в межах метрових і більш коротких хвиль.

Складові кабелю, зображені на рис. 1.11:

1 Внутрішній провідник – посріблена мідь

2 Ізоляція – пористий політетрафлуороетилен

3 Зовнішній провідник – а. посріблена мідна стрічка; б. посріблена мідна оплетка

4 Внутнішня оболонка – виконана з фторованого етилен-пропілену, або етилену-тетрафторетилену.

5 Броньована оплетка – а. спіраль із нержавіючої сталі; б. екран із нержавіючого дроту

6 Зовнішня оболонка – полівінілхлорид

$T_К$, $T_{АТМ}$ визначаються з графіку, наведеного на рис. 1.12:

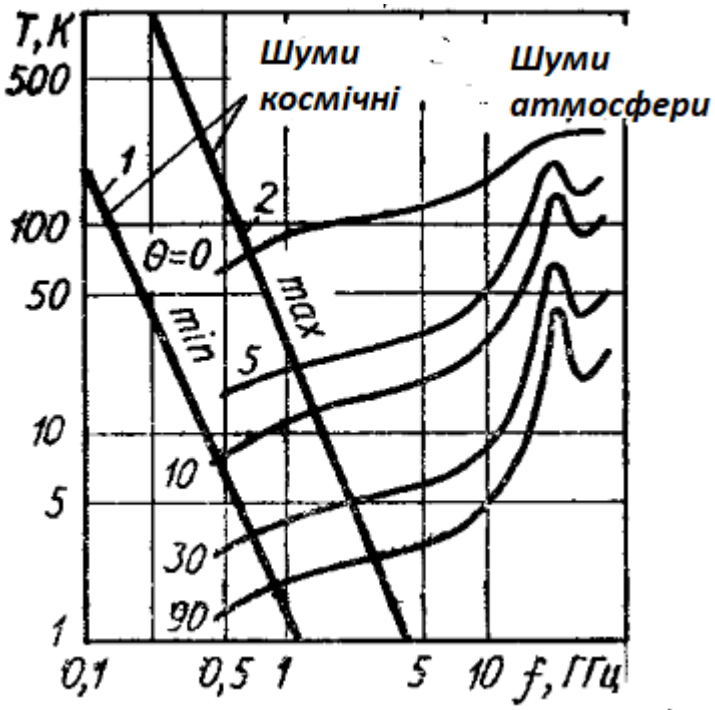


Рисунок 1.12 – Залежність космічних шумів (криві 1,2) та шумів атмосфери від частоти; θ є кутом нахилу ДС антени [3]:

Для РПП, діапазон робочих частот яких починається від 1 ГГц та вище, впливом зовнішніх завад можна знехтувати та прирівняти значення t_A=1.

Розрахунок п.п. 5:

Для вибору активного елементу (транзистор обрати з каталогу Моторола [9], [10], [11], Onsemi semiconductors [2]) вхідного каскаду перш за все визначимось, який ключовий параметр буде його описувати. Це

коефіцієнт шуму (Noise figure, NF) транзистора. Він вказується далеко не в усіх типах транзисторів. Наприклад, у каталогах фірми Motorola цей параметр вказується тільки для транзисторів типу small signal [9], [10] таблично, як значення для якоїсь конкретної частоти, рис. 1.13, або графічно, як залежність NF від опору джерела сигналу R_S, або частоти, рис. 1.14. Завдяки цьому можна оцінити досягнуту реальну чутливість (E_{AP}) РПП. Також необхідно не забути обрати робочу точку задаючись бажаним струмом колектора (I_C), щоб отримати конкретне значення NF.

	Gain — BW		Noise Figure		
Device Type	f_T GHz	I_C mA	NF dB	f MHz	I_C mA
MM8000	0.7	50	2.7	200	10
MM8001	0.9	50	2.7	200	10

Рисунок 1.13 – Вказання NF таблично [9]

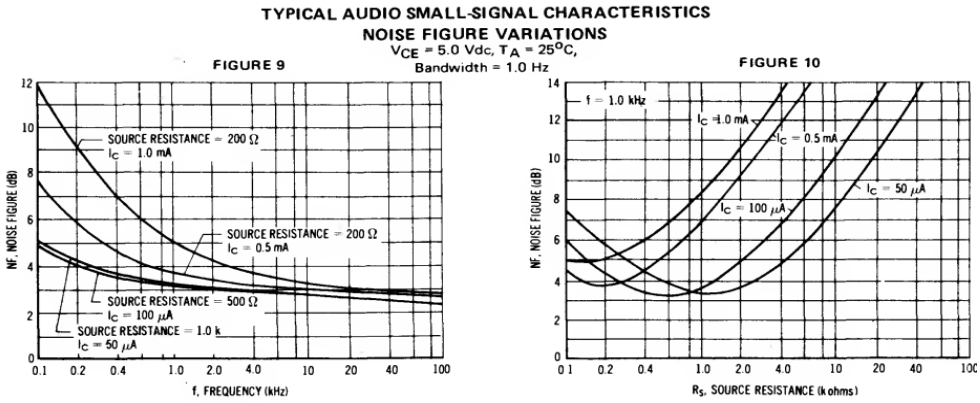


Рисунок 1.14 – Вказання NF графічно [9]

І першою умовою для перевірки є [3]:

$$\acute{\varepsilon}_З^2 * h_Д^2 \geq 5*(4*k*T_0*NF*r_A)$$

Якщо ця умова виконується, то чутливість РПП буде обмежена зовнішніми завадами [3]:

$$E_{AP} = \acute{\varepsilon}_З * h_Д * \gamma * \sqrt{(\Pi_Ш)}$$

Якщо умова (13) не виконується, то чутливість РПП буде обмежена як зовнішніми завадами, так і внутрішніми завадами і рівна за напругою для зовнішньої антени [3]:

$$E_{АР}=\sqrt{[(4*k*T_0*NF_{VT}*r_A+ \acute{\varepsilon}_З^2*h_Д^2)* П_Ш *\gamma^2]}$$

Варто зауважити, що мінімально досяжний NF преселектора, побудованого на базі транзисторів $\geq 2*NF_{VT}$

Якщо $\acute{\varepsilon}_З^2*h_Д^2<(4*k*T_0*NF*r_A)$ та $NF_{VT}< NF_{ДОП}$ то із ССх можна виключити ПСЧ. Якщо $\acute{\varepsilon}_З^2*h_Д^2<(4*k*T_0*NF*r_A)$ та $NF_{VT}< NF_{ДОП}$, то в ССх зберігається ПСЧ, або обирається інший транзистор з меншим значенням NF_{VT}.

Не слід застосовувати більше двох каскадів ПСЧ, особливо в діапазонних РПП.

Розрахунок п.п. 6:

Коефіцієнт підсилення ЛТ визначається таким виразом:

$$K_{ЛТ}=U_{Дет}/E_A$$

де: $U_{Дет}$-це напруга проміжної частоти (ПЧ), необхідна для нормальної роботи детектора, обирається з меж, вказаних у табл. 1.1 [3] для РПП відповідної групи складності:

Таблиця 1.1 – Мінімально допустимі напруги на вході АМ та ЧМ детекторів, [мВ]

Група складності РПП	АМ детектор		ЧМ детектор		
			На НП приладах		На ІС
	На НП приладах	На ІС	Дробний детектор	Частотний дискримінатор з обмежувачем	На схемі співпадінь
Найвища	500...1000	1.5	30....100	1000-2000	0.05
Перша-Друга	100.....500		10....30	500.....1000	
Третя-Четверта	50.....200		10	-	

E_A-це норма чутливості, що становить:

$$E_A = E_{A_ТЗ}/a_E$$

де: a_E – це коефіцієнт запасу, що обирається в межах 3….5

$E_{A_ТЗ}$ вказане у завданні.

Для РПП АМ сигналу [6], табл. 1.2:

Таблиця 1.2 – Вибір чутливості обмеженої шумами для різних діапазонів радіомовлення, АМ тракт

Тракт АМ			
Найменування параметра	Норма для РПП групи складності		
	0	1	2
Чутливість обмежена шумами при співвідношенні С/Ш не менше 20 дБ:			
За напругою з входу, або з входу для зовнішньої антени, мкВ в діапазонах, не гірше:			
ДХ	40	100	За ТУ
СХ	30	100	За ТУ
КХ	30	100	За ТУ
За напруженістю поля мВ/м, не гірше в діапазонах:			
ДХ	1	1,5	За ТУ
СХ	0,5	0,7	За ТУ
КХ	0,1	0,15	За ТУ

Для РПП ЧМ сигналу [4], табл. 1.3:

Таблиця 1.3 – Вибір чутливості обмеженої шумами для різних діапазонів радіомовлення, ЧМ тракт

Тракт ЧМ			
Найменування параметра	Норма для РПП групи складності		
	0	1	2

Чутливість обмежена шумами в стереорежимі при співвідношенні С/Ш не менше 50 дБ за напругою зі входу зовнішньої антени, мкВ, не гірше:	50	175	275

Розрахунок п.п. 7:

Розраховується коефіцієнт перекриття діапазон уробочих частот:

$$k_{пер.\ д}=f_{0_max}/\ f_{0_min}$$

Тепер необхідно обрати резонансну систему, яка забезпечуватиме перелаштування РПП, табл. 1.4 [1]:

Таблиця 1.4 – Типові значення коефіцієнтів перекриття різних резонансних систем $k_{д.р}$

Вид резонансної системи	kд.р
Контур з зосередженими параметрами , перелаштовуваний:	
Конденсатор змінної ємності	2,5.....3,0
Котушка змінної індуктивності	1,4....3,0
Варікап	2,3.....2,7
Транзистор реактивний	1.1.....1.15
Контур проміжного типу(гібридний)	1.3.....5,0
Чвертьхвильовий відрізок коаксіальної лінії, перелаштовуваний:	
Закорочений плунжером	1,4....2,0
Підстроювальним конденсатором	1,08.....1,1

Варто зазначити , що варікап має бути ввімкнений в резонансний контур. Але слід брати до уваги нелінійність залежності ємності від напруги керуючої.

Якщо $k_{пер.\ д} > k_{д.р}$, то необхідно описати розбиття на піддіапазони діапазону робочих частот РПП.

Кількість піддіапазонів встановлюється декількома різними виразами [3, ст. 29-31] та для варікапу [12, ст. 51-55].

Розрахунок п.п. 8:

АМ сигнал:

Зазвичай*, значення ПЧ обирають з ряду [13]: 110кГц, 215кГц, 450 кГц, 455кГц, 465 кГц, 500кГц, 930кГц, 1.6 МГц

ЧМ сигнал:

Зазвичай, значення ПЧ обирають з ряду [13]: 262 кГц; 455 кГц; 1,6 МГц; 5,5 МГц; 10,7 МГц; 10,8 МГц; 11,2 МГц; 11,7 МГц; 11,8 МГц; 21,4 МГц; 75 МГц та 98 МГц.

Далі частоту гетеродну обрати між [1, ст. 22-26]:

$f_{ПЧ} = | f_{гет} - f_c | < f_c$, $f_{гет} > f_c$ “верхім” перетворенням, або

$f_{ПЧ} = | f_c - f_{гет} | < f_c$, $f_{гет} < f_c$ “нижнім” перетворенням.

І розраховують частоту дзеркального каналу:

$f_{дк} = f_{гет} + f_{ПЧ} = f_c + 2f_{ПЧ}$ при “верхім” перетворенні, або

$f_{дк} = f_{гет} - f_{ПЧ} = f_c - 2f_{ПЧ}$ при “нижнім” перетворенні.

Зобразити отримані результати у вигляді частотного плану з підписаними частотами схематично в частотній області, як на рис. 1.15 [1].

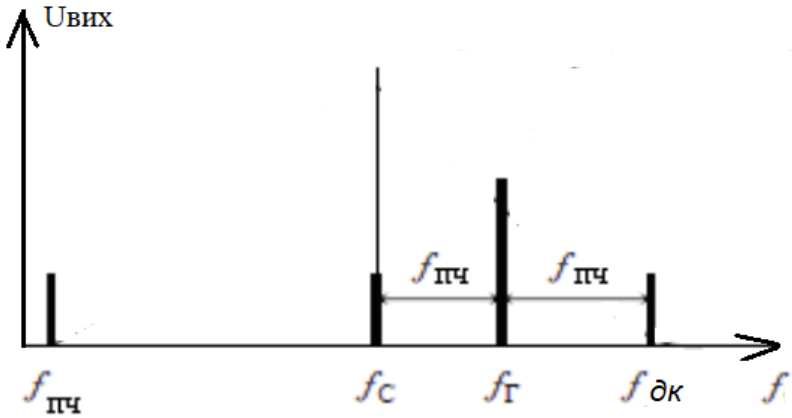


Рисунок 1.15 – Приклад відображення корисного та побічних каналів прийому [1]

Значення ПЧ для АМ тракту може братися з традиційних значень для ЧМ та навпаки на розсуд розробника, виходячи з досягнутої розрахованої селективності.

Розрахунок п.п. 9:

Розрахувати ослаблення на границях смуги пропускання можна скориставшись загальною нерівномірністю тракту [3]:

$$\sigma_{П\ СЧ}=\sigma_{П}-\sigma_{П\ ПЧ}$$

де: $\sigma_{П}$ визначається з виразу (4), $\sigma_{П\ ПЧ}$ для радіомовних РПП приймають в межах 3…6 дБ.

Для вибору придатної селективної системи необхідно розрахувати максимально допустимий по нелінійним спотворенням коефіцієнт передачі тракту СЧ [1]:

$$K_{СЧ\ МАХ} = U_{ЗМ}/E_A$$

де: E_A визначається з (17), $U_{ЗМ}$ з табл. 1.1

Орієнтовні коефіцієнти передачі каскадів радіомовних РПП представлено в табл. 1.5 [3]:

Таблиця 1.5 – Коефіцієнти передачі каскадів радіомовних РПП на основі біполярних транзисторів та напівпровідникових діодів.

Тракт	Каскад	Тип селективної системи	Коефіцієнт передачі		
			ДХ, СХ	КХ	УКХ
СЧ	Вхідний контур	Поодинокий резонансний контур	0,05….0,1		
		Двохконтурний смуговий фільтр	0,05….0,1	-	-
	Підсилювач сигнальної частоти	Поодинокий резонансний контур	5….30	3….10	2….5
		Аперіодичний підсилювач	2…5	-	-

			АМ тракт	ЧМ тракт
ПЧ	Підсилювач проміжної частоти	Поодинокий резонансний контур	20…80	10…40
		Двохконтурний смуговий фільтр	10…50	5…20
		Фільтр зосередженої селекції	3…15	2…5
		П'єзокерамічний фільтр	5…10	-
		Аперіодичний резисторний	5…10	-
Детектор		Діодний, послідовного типу	0,3…0,8	-
		Дробний детектор	-	1…2

Оскільки значення ПЧ не задане у завданні, тож треба оцінити селективність по дзеркальному каналу [1], (21) і обрати значення ПЧ з [13]:

$$f_{ПР} \geq 0{,}5 * f_0 * [0{,}5 * x_{ДЗ} * d_{Екв\ СЧ} - 1 + \sqrt{(0{,}25 * x_{ДЗ}^2\ d_{Екв\ СЧ}^2 + 1)}]$$

де: $x_{ДЗ}$ – це узагальнене розстроювання селективної системи за дзеркальним каналом, яке розраховується при налаштованій антені:

$$x_{ДЗ} = \sqrt[N_1+2N_2]{[\sigma_{ДЗ\ ТЗ}(1+a^2)/(0{,}5^{N_2})]}$$

де: N_1, N_2 – це зв'язані коливальні контури з коефіцієнтом трансформації n_1, n_2 і так далі, рис. 1.16, рис. 1.17

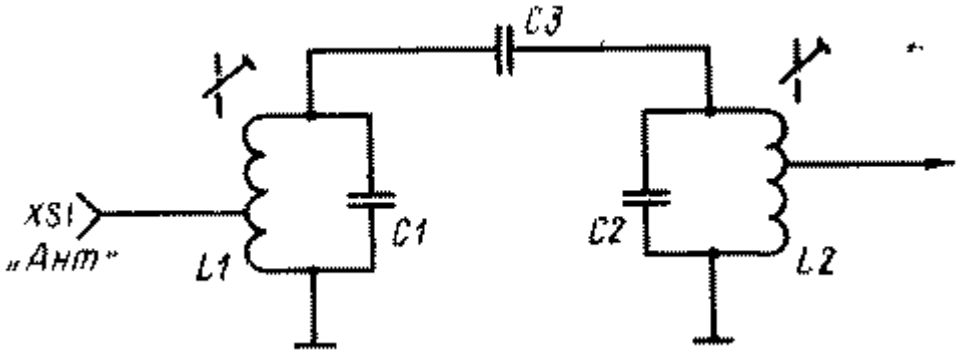


Рисунок 1.16 – Двоконтурний смуговий фільтр [14]

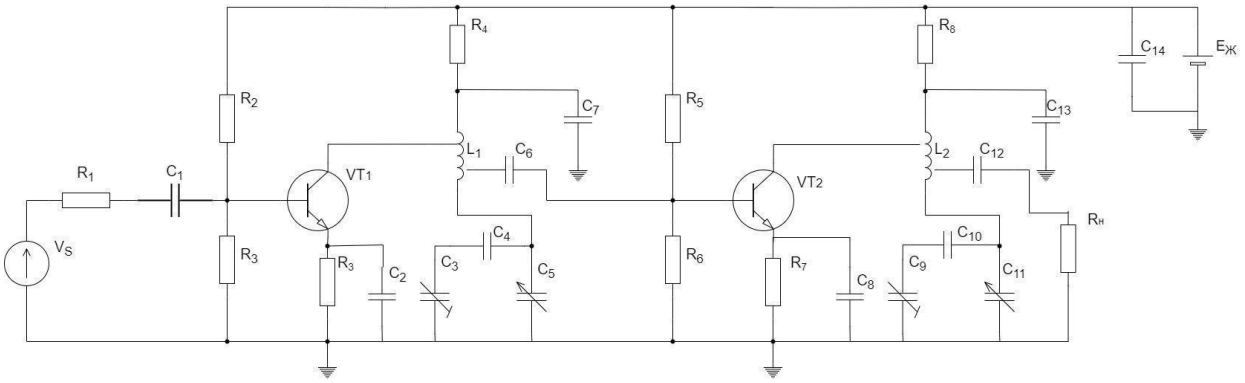


Рисунок 1.17 – Схема селективного підсилювача сигнальної частоти зі спільним емітером та двома контурами з автотрансформаторним ввімкненням (N=2)

Після визначення значення ПЧ, що задовільняє умові (21), переходять до еквівалентного затухання селективної системи та узагальненого розстроювання для сусіднього каналу.

При використанні транзисторного підсилювача треба визначити еквівалентне затухання [3]:

$$d_{екв\ СЧ}=(1-\alpha)\ *d_{екв0}$$

де: $d_{екв0}$ – це еквівалентне затухання контурів з врахуванням впливу джерела і навантаження.

α – коефіцієнт регенерації підсилювача (для режиму великих підсилень α=0,8…..0,9)

Далі визначають узагальнене розстроювання, що відповідає краям смуги пропускання тракту сигнальної частоти:

$$X_{П\ СЧ} = П_С / (d_{e\ СЧ}*f_{0\ min})$$

Нарешті, підраховують узагальнене розстроювання для сусіднього каналу:

$$X_{СК\ СЧ} = 2*\Delta f_{СК}*\ X_{П\ СЧ}/П$$

де: $\Delta f_{СК}$ прийняти =±9кГц, як в [4]

Розрахунок п.п. 10:

Оскільки значення $f_{ПЧ}$ було визначено в п.п. 9, тож її можна вважати заданою.

Коефіцієнт прямокутності $k_п$ оберемо рівним 10. Для вибору селективної системи ще треба визначити ослаблення сигналу на границі смуги пропускання $\sigma_{П\,ПЧ}$ [3]:

$$\sigma_{П\,ПЧ} = \sigma_П / \sigma_{П\,СЧ} \text{ [рази]}$$

Далі за графіком, рис. 1.18 (а, б) для вирахуваного значення $\sigma_{П\ ПЧ}$ і обраної селективної системи визначають значення для узагальненого розстроювання для країв смуги пропускання $x_{П\ ПЧ}$ і вираховують необхідне еквівалентне затухання контурів ПЧ:

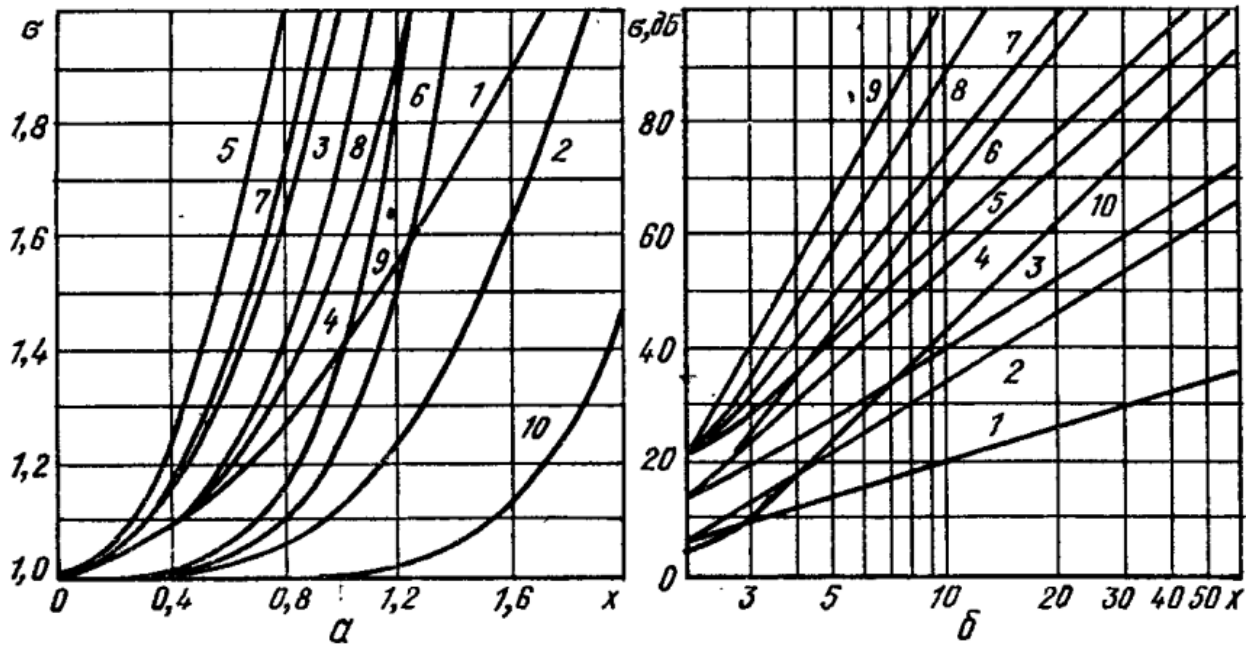


Рисунок 1.18 – Узагальнені криві вибірковості для малих (а) та великих розстройок (б) [3]

1 – одиничний резонансний контур (ОРК);

2 – двоконтурний смуговий фільтр (ДСФ);

3 – два налаштовані контури;

4 – ДСФ + ОРК;

5 – три налаштовані контури;

6 – два ДСФ;

7 – два ДСФ + два налаштовані контури;

8 – два ДСФ + ОРК;

9 – три ДСФ;

10 – ДСФ при $\eta=\sqrt{3}$ та ОРК з $d_{E1}= 2d_{E2}$

За графіком на рис. 1.18 (а) для значення $\sigma_{П\ ПЧ}$ та обраної селективної системи обирають значення узагальненої розстройки $x_{П\ ПЧ}$ і обчислюють необхідне еквівалентне затухання контурів тракту ПЧ [3]:

$$d_{екв\ ПЧ}= П/ (x_{П\ ПЧ}*f_{ПЧ})$$

Якщо $d_{екв\ ПЧ}< d_{екв\ min}$, то $d_{екв\ ПЧ}$ прирівнюють до $d_{екв\ min}$, табл. 1.6

Таблиця 1.6 – Мінімальні коефіцієнти затухання контурів і значення коефіцієнта d.

Діапазон робочих частот, МГц	Затухання контуру, d_{0min}	Коефіцієнт q	
		Для біполярних транзисторів	Для польових транзисторів
0,1	0,1…0,02	1	1,4…1,6
0,1…0,2	0,006..0,01	1	1,5…1,7
0,2…0,4	0,004…0,006	1	1,6…1,8
0,4…0,6	0,003…0,004	1	1,7…1,9
0,6…1,0	0,003…0,005	1	1,8…2,0
1,0…5,0	0,004…0,005	1	2,0…2,2
5,0…30,0	0,005…0,006	1,1	2,2…2,5
30,0….300	0,006…0,01	1,2	2,5…3,0
300…1000	0,0003…0,004	1,3	5…10

Після цього обчислюють узагальнену розстройку для сусіднього каналу:

$$X_{СК\ ПЧ}=2\Delta f_{СК}/ d_{екв\ ПЧ*}f_{ПЧ}$$

Та за графіком на рис. 1.18 (б) знаходять ослаблення по сусідньому каналу за обраної селективної системи $\sigma'_{СК\ пч}$.

$$\Delta f_{СК} = 0{,}5\ k_{П} * П$$

Якщо $\sigma'_{СК\ пч} < \sigma_{СК\ пч}$, вказане у завданні на курсову то обирають більш складну селективну систему та повторюють розрахунок.

Довідкові дані щодо фільтрів, коефіцієнту прямокутності відображено в додатку А та [3, с. 40-45].

Треба розрахувати ослаблення на границі смуги пропускання по сусідньому каналу [3]:

$$\sigma_{СК} = \sigma_{СК\ тз} - \sigma_{П\ сч}$$

Літературні джерела:

1. Дружинін В.А., Степанов М.М. БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ РАДІОАПАРАТУРИ. ЧАСТИНА 2. Kyiv : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 554 с.

2. RF Transistors. *Intelligent Power and Sensing Technologies | onsemi*. URL: https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/rf-transistors#products=fnN0YXR1c352YWx1ZX4yfiF+TGFzdCBTaGlwbWVudHN+IX5PYnNvbGV0ZX4=.

3. Белкин М.К. и др. Справочник по проектированию приёмно-усилительных устройств. К. Вища школа, 1988. – 472 с. URL: http://www.radioscanner.ru/files/download/file6564/spravochnik_po_uchebnomu_proekt_pus_1982.djvu

4. ETSI EN 303 345 : Broadcast Sound Receivers; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303300_303399/303345/01.01.07_30/en_303345v010107v.pdf.

5. Electrically Small Antenna Design for Low Frequency Systems / E. Richards et al. *ResearchGate*.
URL: https://www.researchgate.net/publication/276919686_Electrically_Small_Antenna_Design_for_Low_Frequency_Systems.

6. Цалієв Т. Антени: навч. посіб. з практичних занять. Одеса : Одеса: ОНАЗ ім О.С. Поп., 2015. 176 с. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj7ptmk-KCFAxVb1QIHHeY4BBEQFnoECA8QAQ&url=https://metod.suitt.edu.ua/download/186&usg=AOvVaw0I3LYugt2uXFHl5hY8sqLs&opi=89978449.

7. HLA6121. *toyotechus.com*. URL: https://toyotechus.com/wp-content/uploads/HLA_6121_datasheet_E04.pdf.

8. Flexible cable assemblies for microwave Wavemolle. *SHF Communication Technologies AG*. URL: https://www.shf-communication.com/wp-content/uploads/shf_brochure_totoku_tcf_series.pdf.

9. Small-signal transistors Data book. Switzerland : Motorola Inc., 1984. 1386 p. URL: https://media.searchelec.com/specshee/MOT/Small%20Signal%20Transistor%20DataBook%201984_text.pdf.

10. Motorola SMALL-SIGNAL TRANSISTORS, FETs AND DIODES. USA : Motorola, Inc., 1994. 934 p. URL: http://www.bitsavers.org/components/motorola/_dataBooks/1994_Motorola_Small-Signal_Transistors_FETs_and_Diodes_Device_Data.pdf.

11. Radio-Frequency Semiconductors Transistors, FETs, Cell Packs. *Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation*. URL: https://toshiba.semicon-storage.com/info/catalog_en_20060101_ALQ00221.pdf?did=10156.

12. Смирнов В. ЗАСОБИ ПРИЙМАННЯ І ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ КУРСОВА РОБОТА. Київ, 2019. 75 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d253a74b-72ba-4c3c-a4ef 19f18b74f568/content.

13. Contributors to Wikimedia projects. Промежуточная частота – Википедия. *Википедия – свободная энциклопедия*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Промежуточная_частота.

14. Основи схемотехніки. Аналогова та інтегральна схемотехніка / В. М. Кичак та ін. Вінниця, 2012. 252 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/2315?utm_source=chatgpt.com.

15. Glossary | Crystal Filters | Murata Manufacturing Co., Ltd. *Murata Manufacturing Co., Ltd.* URL: https://www.murata.com/en-global/products/filter/crystalfil/library/glossary.

16. MONOLITHIC CRYSTAL FILTER UM-1. *Fronter Electronics Co., Ltd*. URL: https://www.chinafronter.com/wp-content/uploads/2021/11/MCF-UM1-UM5-2-Poles.pdf.

17. MONOLITHIC CRYSTAL FILTER MCF-49. *Fronter Electronics Co., Ltd*. URL: https://www.chinafronter.com/wp-content/uploads/2021/11/MCF-49U49T.pdf (date of access: 11.04.2024).

18. SAW Filters for Mobile Communications. *Murata Manufacturing Co., Ltd.* URL: https://www.murata.com/-/media/webrenewal/support/library/catalog/products/filter/rf/p73e.ashx?la=en&cvid=20150203180320404100.

19. 2-Pole Crystal Filter. *SJK - Shenzhen Crystal Technology: Crystal & Oscillator Worldwide Supplier*. URL: https://www.q-crystal.com/Public/Uploads/Admin/2022-04-27/6268e703229d3.pdf.

Додаток А

Основні параметри смугових фільтрів, що застосовуються у РПП

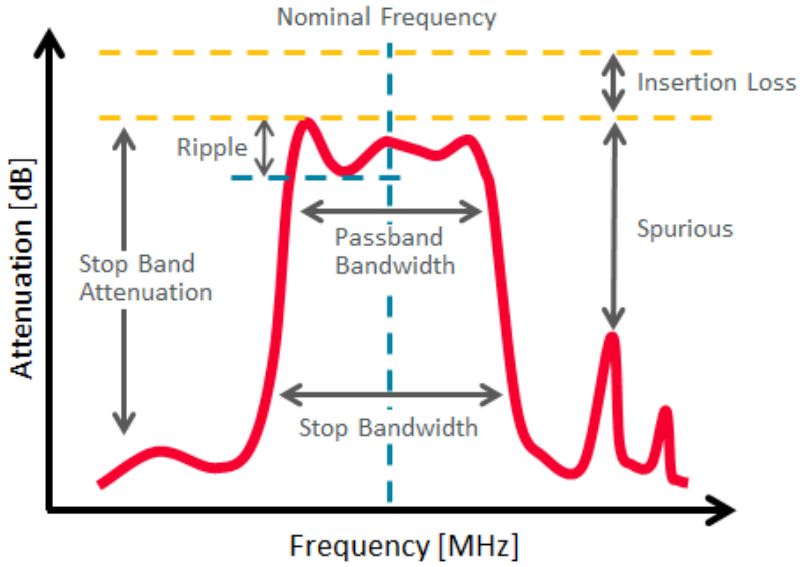


Рисунок А.1 – Приклад АЧХ фільтру в тракті ПЧ [15]

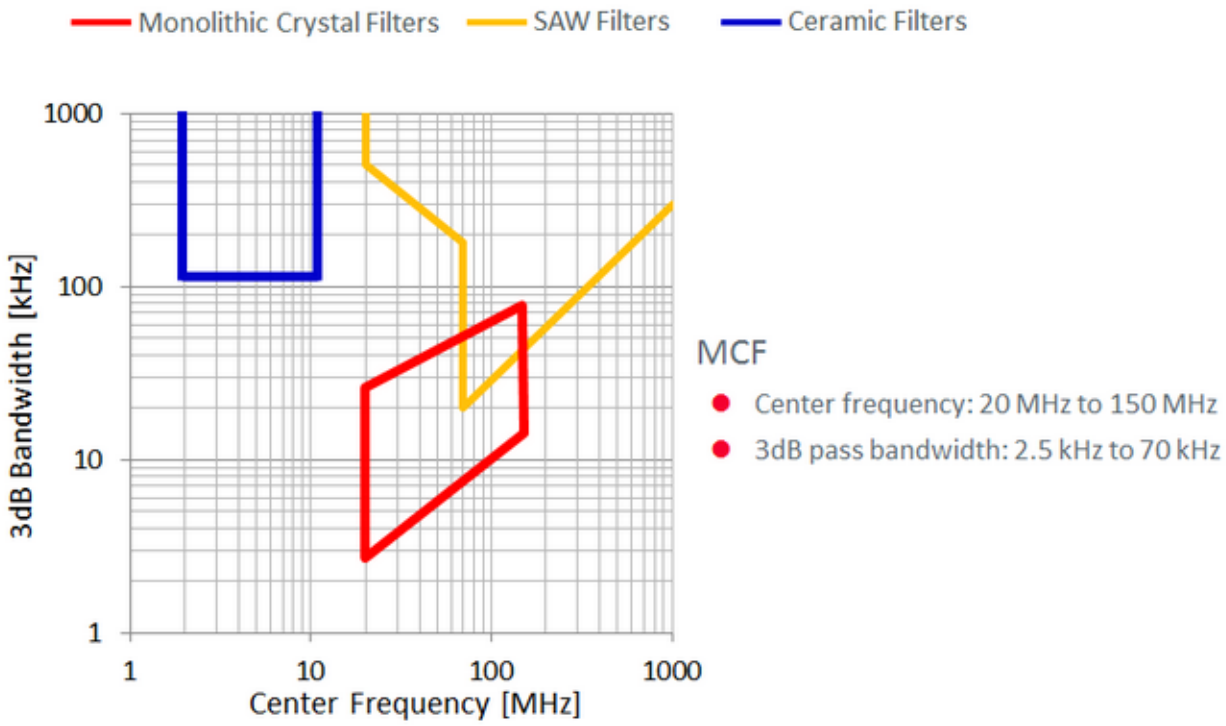


Рисунок А.2 – Діапазони робочих частот сучасних фільтрів [15]

де: SAW filters – це фільтри, засновані на ефекті поверхнево-акустичних хвиль використовуються в діапазонах до і після 1 ГГц [19].

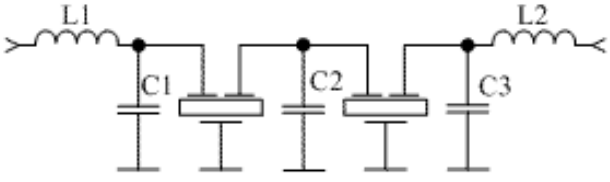


Рисунок А.3 – Електрична принципова схема кварцового фільтру четвертого порядку [19]

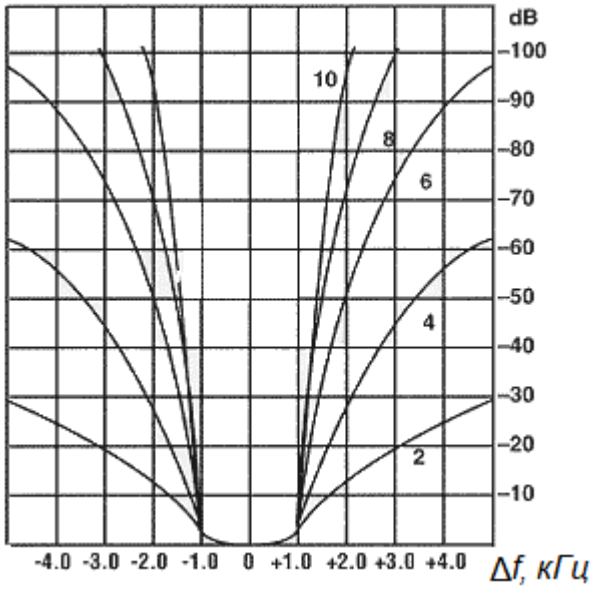


Рисунок А. 4 – Типова форма АЧХ кварцового фільтру в залежності від кількості полюсів (порядку), в перевернутому вигляді.

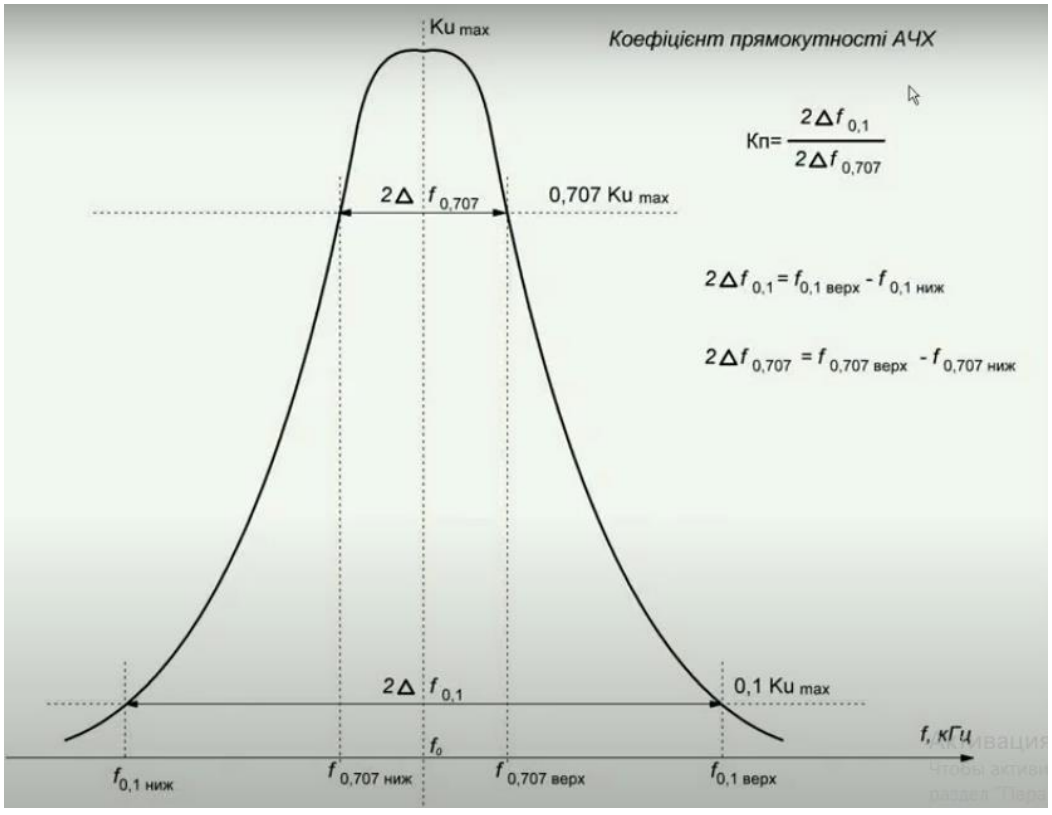


Рисунок А. 5 – Визначення коефіцієнту прямокутності АЧХ (фільтру) в разах

Додаток Б

Варіанти завдань

Номер варіанту	Діапазон робочих частот, МГц, $f_{0min}…f_{0max}$	Чутливість, мкВ	Частотна відстань до сусіднього каналу (крок сітки частот), кГц	Вибірковість щодо каналу прямого проходження, дБ	Вибірковість щодо дзеркального каналу, дБ
1	0,52…1,6	10	10	40	30
2	1,9…1,95	10	10	30	30
3	1,15…1,40	10	10	30	30
4	0,3…1,10	10	10	35	35
5	0,5…0,80	10	10	40	40
6	144…146	1,00	25	70	60
7	124…130	1,2	25	70	60
8	110…150	2,4	25	50	60
9	130…170	2	25	60	60
10	10…15	3,8	10	70	40
11	21…24	3,6	10	70	50
12	7…16	3,4	10	70	40
13	9…14	3,2	10	70	50
14	200…220	2,8	25	60	50
15	150…170	2,6	25	60	60
16	140…180	2,4	25	50	40
17	9…17	30	10	70	50
18	5…12	3	10	60	50
19	8…15	2,6	10	60	50
20	10…25	4,6	10	70	50
21	65,8…74.0	2,0	120	40	40
22	100…108	3	170	60	40
23	18…20	3	10	70	40
24	0,8…1,6	20	10	40	40
25	0,52…1,6	50	10	35	25
26	0,15…0,41	60	10	30	30
27	7,1…19,77	11	10	25	35
28	3,95…8,2	13	10	20	40
29	9,5…16,1	15	10	22	43
30	65,8…73	45	100	25	10

31	65,8…73	55	130	30	11
32	87,5…108	75	160	30	13
33	65,8…73	65	120	33	12
34	87,5…108	85	140	33	14
35	87,5…108	95	150	36	15
36	87,5…108	105	110	39	16
37	10…20	2,6	11	56	61
38	7…14	2,8	11	58	58
39	9…15	3,0	11	60	55
40	5…15	3,2	11	62	52
41	3…10	3,4	11	64	49
42	144…146	1,0	25	72	72
43	144…146	1,1	30	74	74
44	144…146	1,2	35	76	76
45	9…24	3,2	10	78	49
46	4…21	2,8	10	78	55
47	10…25	3,8	12	72	40
48	11…19	3,6	11	66	46
49	87,5…108	105	90	39	16
50	87,5…108	115	130	42	17
51	87,5…108	125	115	45	18

Продовження додатку Б

Номер варіанту	**Вибірковість щодо сусіднього каналу, дБ**	**Ефективність системи АРП**	**Вид модуляції**	**Клас радіовипромінювання**
1	40	60/6	АМ	A1A
2	40	60/6	АМ	A1A
3	40	60/6	АМ	A1A
4	40	60/6	АМ	A1A
5	40	60/6	АМ	A1A
6	40		ЧМ	F1A
7	40		ЧМ	F1A
8	40		ЧМ	F1A
9	40		ЧМ	F1A
10	40	60/6	АМ	A1A
11	40	60/6	АМ	A1A
12	40	60/6	АМ	A1A

13	40	60/6	АМ	A1A
14	40		ЧМ	F1A
15	40		ЧМ	F1A
16	40		ЧМ	F1A
17	40	60/6	АМ	A1A
18	40	60/6	АМ	A1A
19	40	60/6	АМ	A1A
20	40	60/6	АМ	A1A
21	40		ЧМ	F1A
22	40		ЧМ	F1A
23	40	60/6	АМ	A1A
24	40	60/6	АМ	A1A
25	45	60/5	АМ	A1A
26	50	70/8	АМ	A1A
27	55	50/5	АМ	A1A
28	60	60/4	АМ	A1A
29	62	60/4	АМ	A1A
30	33		ЧМ	F1A
31	44		ЧМ	F1A
32	46		ЧМ	F1A
33	45		ЧМ	F1A
34	48		ЧМ	F1A
35	37		ЧМ	F1A
36	51		ЧМ	F1A
37	57	70/9	АМ	A1A
38	56	74/5	АМ	A1A
39	55	70/10	АМ	A1A
40	54	74/6	АМ	A1A
41	53	70/11	АМ	A1A
42	60		ЧМ	F1A
43	65		ЧМ	F1A
44	70		ЧМ	F1A
45	55	66/4	АМ	A1A
46	57	74/10	АМ	A1A
47	52	65/4	АМ	A1A
48	52	74/7	АМ	A1A
49	45		ЧМ	F1A
50	53		ЧМ	F1A
51	46		ЧМ	F1A