

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри
_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня магістра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: підсилювач потужності електромагнітних сигналів в діапазоні

НВЧ хвиль

Виконав: студент 6 курсу, групи ДП-01мп

_____ Постнов Ян Олегович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник _____ Королюк В.Д. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

_____ Георгій СВЕЧНИКОВ _____

_____ (підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2021 року

Завдання на дипломну роботу

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

Інститут/факультет _____ Факультет електроніки _____

(повна назва)

Кафедра _____ мікроелектроніки _____

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 153 мікро- та наносистемна техніка _____

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Анатолій ОРЛОВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

Постнов Ян Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підсилювач потужності електромагнітних сигналів в діапазоні НВЧ хвиль»

науковий керівник дисертації Королюк В. Д.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 7 грудня 2021 р.

3. Об'єкт дослідження Об'єктом дослідження є високопотужний підсилювач електромагнітних сигналів

4. Предмет дослідження Підсилювач з вихідною потужністю 1 кВт призначений для підсилення сигналів у складі радіомовних передавачів, що здійснюють монофонічне та стереофонічне радіомовлення у діапазоні FM (87 – 108 МГц) в радіо – теле передавальних центрах, або використовується як попередній підсилювач в складі підсилювачів більшої потужності.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Розглянути аналоги підсилювачів та розібрати їх конструкцію. Обрати елементну базу та структурну схему. Провести розрахунки, що підтверджують працездатність та фізико-технічні характеристики приладу

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 19 рисунків, 15 таблиць

7. Дата видачі завдання 20.10.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики.	11.09.2021	
	Огляд аналогів, вибір варіанту побудови	23.09.2021	
	Вибір елементної бази, матеріалів та покриттів	28.09.2021	
	Створення структурної схеми та розрахунок	15.11.2021	
	Оформлення звіту, формулювання висновків, перевірка, захист.	01.12.2021	

Студент

(підпис)

Постнов Я. О.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Корольок В. Д.

(ініціали, прізвище)

Реферат

Змістом даного дипломного проекту є розробка конструкції підсилювача з вихідною потужністю 1 кВт, що призначений для підсилення сигналів у складі радіомовних передавачів, які в свою чергу, здійснюють монофонічне та стереофонічне радіомовлення у діапазоні FM (87 – 108 МГц) в радіо - теле передавальних центрах, або використовується як попередній підсилювач в складі підсилювачів більшої потужності. Підсилювач побудовано за мостовою схемою складання потужностей окремих підсилювальних модулів, які виготовлено за твердотільною технологією з застосуванням сучасної елементної бази. В пристрої використаний модуль контролю і захисту, який базується на цифровому мікроконтролері. За допомогою цифрового LCD –індикатору, що розташований на передній панелі, можливий контроль вихідної та відбитої потужностей , температури, розбалансу модулів, напруг живлення ВЧ модулів. Проведені розрахунки, що підтверджують працездатність пристрою.

Abstract

The content of this diploma project is the development of an amplifier design with an output power of 1, which is designed to amplify signals as part of broadcasting transmitters, which, in turn, perform mono and stereo broadcasting in the FM band (87-108 MHz) in radio - TV transmitting centers, or or it is used as a pre-amplifier in the composition of amplifiers of higher power. The amplifier is built according to a bridge circuit for adding the powers of individual amplifying modules, which are manufactured using solid-state technology using modern element base. The device uses a control and protection module based on a digital microcontroller. With the help of the LCD-indicator, which is located on the front panel, it is possible to control the output and reflected power, temperature, imbalance of modules, supply voltages of RF modules. Calculations that confirm the device's performance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	Ошибка! Закладка не определена.
1 АНАЛІЗ ВИМОГ	Ошибка! Закладка не определена.
2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ, ВИБІР ВАРІАНТУ ПОБУДОВИ ТА КОНСТРУКЦІЇ.....	12
2.1. Огляд аналогів та вибір варіанту побудови підсилювача	12
2.2. Вибір варіанту конструкції	17
3 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ, МАТЕРІАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ.....	20
3.1. Вибір матеріалу друкованої плати	20
3.2. Вибір матеріалу покриття друкованої плати.	21
3.3. Вибір матеріалу корпусу	25
3.4. Вибір елементної бази	26
4 ВИБІР СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА ТА ЙОГО ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК.....	36
4.1. Вибір структурної схеми.....	36
4.2. Попередній розрахунок підсилювача	42
5 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА 350 Вт, ВИХІДНОГО ТА ВХІДНОГО КОЛА УЗГОДЖЕННЯ.....	45
5.1. Електричний розрахунок підсилювача 350 Вт	45
5.2. Розрахунок вихідного кола узгодження	50
5.3. Розрахунок вхідного кола узгодження	51
6 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРИСТРОЮ ...	55
6.1. Розрахунок теплового режиму	55
6.2. Розрахунок надійності за раптовими експлуатаційними відмовами	59

	7
7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ	63
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ВСТУП

Особливе місце в розвитку сучасних інформаційних систем зв'язку відводиться підвищенню надійності передавальних пристроїв, збільшення їх строку експлуатації, підвищення лінійності та покращення їх основних параметрів та характеристик.

В даній роботі розглянутий підсилювач з вихідною потужністю 1 кВт призначений для підсилення сигналів у складі радіомовних передавачів, що здійснюють монофонічне та стереофонічне мовлення у діапазоні FM (87 – 108МГц) в РТПЦ, або ж використовується як попередній підсилювач в складі підсилювачів більшої потужності.

Сучасні підсилювачі потужності повинні забезпечити постійність своїх параметрів на протязі довгого строку експлуатації і мати малу масу і габарити. Виконання цих умов стало можливим при використанні нової елементної бази та нових схемотехнічних рішень вони прийшли на заміну морально застарілим ламповим підсилювачам і успішно використовуються в більшості країн світу. До того ж, з ростом кількості не тільки національних телекомпаній, а й регіональних та місцевих, постає необхідність виготовлення якісних передавачів різних потужностей та діапазонів частот саме промисловістю нашої країни.

В пояснювальній записці наведені результати розробки підсилювача потужності. Проведений вибір варіанта конструкції, матеріалів та елементної бази. Виконані розрахунки, що підтверджують працездатність виробу, техніко-економічні розрахунки, а також проведений аналіз та оцінка шкідливих та небезпечних факторів при розробці, виготовленні та експлуатації спроектованого підсилювача.

1 АНАЛІЗ ВИМОГ

Високоякісна підсилювальна апаратура в наш час користується широкою популярністю та попитом, тому при її виготовленні слід користуватись основними критеріями - зменшення собівартості та підвищення якості. Завданням даного проекту є розробка конструкції високоякісного підсилювача потужності радіомовних сигналів в діапазоні метрових хвиль, експлуатаційні параметри якого відповідали б основним нормам та вимогам.

Проаналізуємо вимоги до підсилювача висунуті в технічному завданні, з метою намітити основні шляхи реалізації конструкції виробу. З технічного завдання слідує, що підсилювач повинен зберігати основні параметри і характеристики протягом тривалого строку експлуатації.

За умовами експлуатації апаратура повинна задовольняти вимоги категорії розміщення 3.1 виконання У ГОСТ 15150-69.

Для забезпечення в блоках РЕА нормального теплового режиму повинна застосовуватись система охолодження, що забезпечує в залежності від температури навколишнього середовища, в блоці допустиму температуру РЕЕ.

В апаратурі повинна забезпечуватись взаємозамінність однотипних складових частин. Тому при розробці виробу було прийняте рішення виготовляти його за блочно – модульним методом. Основними перевагами такого принципу побудови являються:

- вільний доступ до блоку;
- паралельність виготовлення блоків на виробництві;
- скорочення строків проектування та виготовлення РЕА;
- простота модернізації як блоку, так і РЕА в цілому;

За своїми конструктивними призначеннями підсилювачі, як правило, призначені для встановлення в стандартні стійки, тому вибір варіанта конструктивного виконання пристрою характеризується варіантом конструкції стійки.

Відповідно до технічного завдання до виробу висуваються високі вимоги за масо - габаритними показниками: його маса і габаритні розміри мають бути мінімальними, але водночас він повинен забезпечувати найбільшу зручність у користуванні. Зовнішній вигляд пристрою повинен відповідати вимогам ДСТУ 2429-94 та ДСТУ 3963-2000 і якісно відрізнятись від аналогів. Поряд із іншими характеристиками виріб повинен мати мінімальну вартість, що пов'язана з використанням сучасної елементної бази, сировини та матеріалів.

Високі вимоги по надійності можна забезпечити за рахунок спрощення схеми (тобто зменшенням кількості пайок, з'єднань), використання мікросхем та мікрозборок, систем охолодження, а також застосування сучасних систем захисту і контролю.

Розташування, а також характер приєднання елементів індикації і комутації приладу повинен забезпечити простоту та доступність в оперуванні.

При розміщенні елементів та функціональних вузлів необхідно керуватися наступними правилами:

При виготовленні виробу необхідно максимально використовувати типові технологічні процеси та оптимальну кількість обладнання для забезпечення якісного виробництва апаратури при відповідній продуктивності праці.

Отже після проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. конструкція підсилювача багатоблочна. Складається з функціонально завершених окремих вузлів;
2. при розробці пристрою основну увагу приділити функціонально завершеному блоку підсилювача;
3. конструкція підсилювача повинна забезпечувати зручний доступ до елементів індикації та управління;
4. матеріали, напівфабрикати і комплектуючі повинні відповідати ТУ і обиратись відповідно до обмежувальних списків підприємства;
5. надійність виробу можна забезпечити за рахунок вибору елементної бази та використання сучасних систем захисту та управління;
6. пристрій повинен розроблятися з урахуванням серійності;

7. конструкція повинна забезпечувати електробезпеку персоналу при налаштуванні та експлуатації.

2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ, ВИБІР ВАРІАНТУ ПОБУДОВИ ТА КОНСТРУКЦІЇ

2.1. Огляд аналогів та вибір варіанту побудови підсилювача.

На даний час промисловістю багатьох країн світу випускається чимало радіомовних передавачів метрового діапазону хвиль, які мають в своєму складі кінцеві підсилювачі потужності, побудовані за різними схемами та з використанням сучасної елементної бази. Найбільш відомими фірмами, що займаються радіопередавальною технікою (зокрема широкосмуговими підсилювачами) є італійські Eletronica, ABE, Screen Service; німецькі Plisch та Rohde&Schwarz; російські Сігма та Тріада-ТВ; латвійська TERRA та інші. На ринку України одним з провідних виробників радіопередавальної техніки є НВП “Квант-Ефір”, що вже зараз має серед своєї продукції якісні передавачі радіомовного сигналу різних потужностей.

Основними електричними характеристиками передавача, що визначають його конструкцію, є потужність, діапазон робочих частот, вид модуляції, вимоги забезпечення ЕМС – допустимі нестабільність частоти і рівні бічних та позасмугових випромінювань. Поряд з цим істотну роль грають призначення передавача і відповідні цьому умови його майбутньої експлуатації.

Дуже важливим є вимога підвищення промислового (повного) ККД передавача і його окремих каскадів. Справа не тільки в тім, що підвищення ККД відповідно знижує витрати на оплату електроенергії, при низькому ККД, тобто при великих втратах енергії на тепло, виникає необхідність у більш ефективній системі охолодження, для чого доводиться ставити більш потужні вентилятори чи насосні системи примусового охолодження, тобто витратити додаткову енергію на їхню роботу, що, у свою чергу, приводить до додаткового зниження ККД. Нарешті, при роботі транзисторів, ламп та інших деталей при температурі, близької до гранично припустимої, істотно знижується надійність цих деталей і передавача в цілому.

Головним шляхом забезпечення високого ККД є раціональний вибір режиму роботи транзисторів і ламп, використання котушок індуктивності та конденсаторів

з малими втратами (з високою добротністю), прагнення по можливості не використовувати активні опори (резистори) у ланцюгах з великими струмами. Стосовно транзисторів і радіоламп, найбільш доцільний граничний чи злегка перенапружений режим при куті відсічки близько 90° . І хоча деякі ТРК (теле- та радіокомпанії) в нашій країні ще використовують лампову техніку, яка має ряд недоліків, а саме: високі напруги живлення, недостатньо висока надійність, значний рівень випромінювання ВЧ енергії, низький час готовності, тому з огляду на це всі сучасні виробники все більше відмовляються від енергомісткої лампової техніки, переходячи до більш економічно та енергетично вигідної напівпровідникової техніки.

В данному розділі коротко розглянемо та охарактеризуємо деякі підсилювачі потужності провідних в цій галузі фірм.

Італійська фірма Eletronica, а також НВП “Квант-Ефір”, випускають передавач TXFM - 5000, призначений для здійснення монофонічного або стереофонічного радіомовлення в метровому діапазоні хвиль. В передавачі в якості активних елементів, в тому числі і вихідних потужних каскадах, використовуються напівпровідникові елементи, що забезпечує високу надійність та довговічність, відсутність в більшості вузлів небезпечних для життя напруг живлення. Підсилювач данного передавача ЕКА-1500 має в своєму складі:

- вихідні каскади підсилення (6 модулів 300Вт);
- імпульсні модулі живлення підсилювальних модулів;
- систему контролю та захисту підсилювача та LCD-дисплей.

Блок підсилювача побудований на 6 підсилювальних модулях потужністю 300 Вт з потужними MOSFET транзисторами MRF151G (Motorola), суматора і подільника Вілкінсона, збалансованих потужними резисторами, що забезпечує високу розв'язку між модулями. Подільник розподіляє вхідний сигнал на входи відгалужувачів. Відгалужувачі - це мости 3 дБ, призначені для розподілу вхідної потужності на входи двох підсилювачів 300 Вт. Крім цього відгалужувачі забезпечують необхідну розв'язку між входами. Плата суматора містить відгалужувачі, призначені для вимірювання рівнів вихідної потужності та

відгалужування тестового сигналу. З виходу плати суматора сигнал проходить через відгалужувач (використовується для вимірювання відбитої потужності), і надходить на вихідний з'єднувач.

Живлення плат підсилювачів здійснюється від 6 імпульсних модулів живлення SP500-48. Даний модуль має номінальну потужність 500Вт. Загальний контроль параметрів підсилювача, його захист та зв'язок з зовнішніми пристроями (що мають інтерфейс RS485) здійснюється мікропроцесорною системою контролю. До неї входять плати:

- модуль процесора;
- модуль комутації;
- модуль дисплею та клавіатури;
- модуль живлення;

Основні параметри підсилювача контролюються за допомогою LCD дисплея, розташованого на передній панелі.

Підсилювач має примусове повітряне охолодження, яке здійснюється трьома вентиляторами, встановленими на задній стінці підсилювача. Завдяки конструкції блока можлива заміна вентиляторів без перерви у роботі блока.

Загальні характеристики всього підсилювача:

- номінальна вихідна потужність 1500 Вт;
- вхідний та вихідний опір 50 Ом;
- діапазон частот 87/108 МГц;
- коефіцієнт підсилення 18 дБ \pm 1 дБ;
- напруга мережі живлення 220 В 50 Гц.

Даний підсилювач має гарні характеристики лінійності, має високу надійність та довговічність за рахунок недовантаження вихідних транзисторів і паралельного включення каскадів (при виході з ладу одного з них вихідна потужність змінюється неістотно).

Розглянемо ще один підсилювач. Це підсилювач метрового діапазону хвиль Росава - 1500. Підсилювач складається з 6 підсилювальних модулів, зібраних на транзисторах вітчизняного виробництва. Різниця параметрів між транзисторами

однієї партії приводить до неможливості точного та правильно збалансування каскадів, що працюють на один суматор.

Подільники та суматори зібрані по схемі Вілкінсона. Баластні навантаження – вітчизняного виробництва, охолодження підсилювача - пасивне. Нагрівання через розбалансування каскадів велике, що приводить до виходу з ладу підсилювача.

Пасивне охолодження призводить до великих габаритних розмірів і незручної конфігурації.

Інші елементи не відрізняються особливою надійністю як до електричних, так і до механічних впливів.

Система контролю та захисту – аналогова, на вітчизняних елементах. Відхід параметрів цих елементів обумовлює низьку достовірність вимірювань та ненадійність систем захисту.

Аналогові джерела живлення з низьким рівнем стабілізації не забезпечують високої стабільності вихідних параметрів та надійності.

Загальні характеристики всього підсилювача:

- номінальна вихідна потужність 1000 Вт;
- вхідний та вихідний опір 50/75 Ом;
- діапазон частот 87/108 МГц;
- коефіцієнт підсилення 12 дБ \pm 2 дБ
- напруга мережі живлення 220 В 50 Гц.

В II кварталі 2014 р. фірма "Tesla" почала випускати нову продукцію – оновлений ряд транзисторних ВЧ - передавачів потужністю 20 Вт...20 кВт для всіх ВЧ діапазонів. Особливістю нових передавачів є використання в вихідних каскадах потужних горизонтальних двохдифузійних МОН-транзисторів (LDMOS) фірми Philips Semiconductors, що відрізняються високою надійністю, стійкістю до розузгодження, великим коефіцієнтом підсилення, повною повторюваністю параметрів, хорошою енергетичною ефективністю.

Підсилювач потужності такого 1 кВт передавача діапазону 87.5-108 МГц складається з шести 200 Вт модулів вихідних підсилювачів. Всі модулі ідентичні і

взаємозамінні. Для більш ефективного відводу тепла від вихідних транзисторів, що дозволяє підвищити надійність підсилювача - використовується радіатор з міді. На виході кожного модуля встановлено ВЧ вентиль, що забезпечує повний захист вихідних транзисторів від будь-яких паразитних впливів, що можуть наводитися з передавальної антени. В склад кожного модуля вихідних підсилювачів входить блок функціонального контролю та індикації, який забезпечує контроль напруги живлення, температури каскадів, КСХ по виходу, індикацію вихідної потужності та струмів транзисторів. Оригінальна схема суматора потужності побудована таким чином, щоб звести втрати на узгодженні до мінімально можливих, дозволяє проводити заміну несправних модулів без виключення передавача (тобто без переривання трансляції). При цьому, при виході з ладу одного модуля сумарна вихідна потужність передавача зменшується лише на величину потужності несправної ланки (порядку 200 Вт).

Характеристики підсилювача:

- номінальна вихідна потужність 1000 Вт;
- вхідний та вихідний опір 50/75 Ом;
- діапазон частот 87/108 МГц;
- коефіцієнт підсилення 15 дБ \pm 1 дБ
- напруга мережі живлення 220 В 50 Гц.

З розгляду вище приведених аналогів можна зробити наступні висновки:

- більшість виробників базуються на побудові багатокаскадних модулів підсилення по блочно – модульній системі, що в свою чергу забезпечує легку взаємозаміну в разі аварійної ситуації, а також не призводить до виходу з ладу всього підсилювача через «пробій» одного з каскадів;

- провідні моделі мають досить зручну та широко - функціональну сучасну комп'ютерну систему контролю та моніторингу вихідних характеристик з можливістю дистанційного керування за допомогою комп'ютерних мереж;

- вихідні каскади в основному будуються на сучасних потужних MOSFET транзисторах стійких до перенавантажень по КСХ виходу та перегріву, а

транзистори побудовані по LD - MOS технології, незважаючи на свої переваги.

Розглянувши вище наведені аналоги було вирішено взяти за основу підсилювач фірми "Tesla" потужністю 1кВт, оскільки він має досить високі вихідні характеристики, транзистори MRF151G (Motorola) забезпечують високий коефіцієнт підсилення, суматор і подільник збалансовані потужними баластними резисторами, що забезпечують високу розв'язку між модулями. Плата суматора містить відгалужувачі, призначені для вимірювання рівнів вихідної потужності та відгалужування тестового сигналу, що дозволяє контролювати вихідні параметри підсилювача в процесі роботи.

Підсилювач побудований на базі даного буде відповідати всім сучасним вимогам, мати вихідні характеристики не гірше ніж підсилювачі закордонних виробників при значно меншій вартості. Тому можна сказати, що розробка даного пристрою є необхідною у першу чергу для заміни давно застарілого устаткування, а в перспективі можливий експорт таких передавачів до країн СНД та за кордон.

2.2. Вибір варіанту конструкції.

В основному блоки конструктивно виконуються в формі паралелепіпеда, за виключенням блоків, що встановлюються в спеціальних відсіках. Форма блоку може відрізнитися від паралелепіпедної тільки в технічно обґрунтованих випадках, так як таке відхилення робить неможливим застосування автоматизованих методів проектування і виключає можливість використання типових технологічних процесів, складально – монтажних і регулювальних робіт, а також застосування високотехнологічного обладнання, що в цілому збільшує собівартість і строки освоєння апаратури.

Отже зупинимося на паралелепідному варіанті виконання підсилювача.

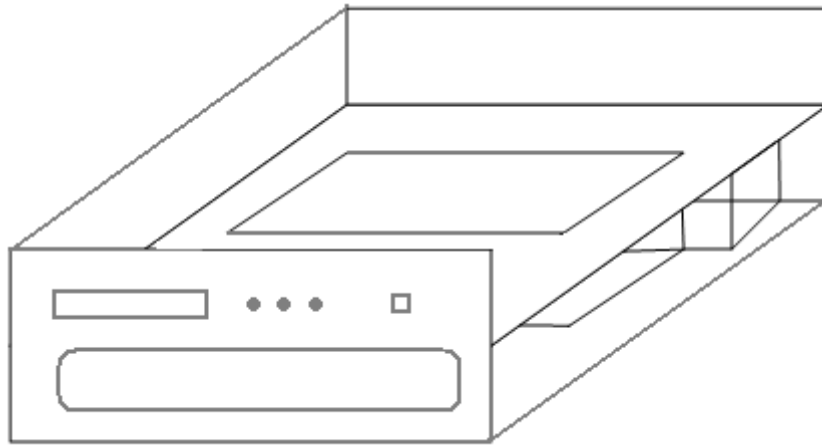


Рисунок 2.1 - Варіант виконання корпусу

Конструкція має найпростіший спосіб виготовлення корпусу, органи керування і налаштування винесені на передню панель, на задню – роз'єми комутації. Всі необхідні вузли виконані у вигляді завершених вузлів з роз'ємами, за допомогою дротів комутації з'єднуються з платою керування. Дана конструкція потребує спеціального місця для встановлення.

Сучасні радіопередавачі в конструктивному відношенні виконують в вигляді декількох стійок стандартного розміру з блоками, що знімаються, на передню панель яких виносять органи керування та контролю (рис.2.3.). В кожній зі стійок міститься пристрій примусового повітряного чи рідинного охолодження.



Рисунок 2.2 - Вигляд сучасних передавачів

Підсилювач потужності виконаємо у вигляді одного блоку з розмірами, що дозволяють встановити пристрій в стандартну 19-дюймову стійку. Корпус підсилювача складений з бокових, нижньої та верхньої, задньої та передньої панелей виготовлених штампуванням з нержавіючої сталі. Варіант виконання конструкції блоку закордонного виробництва зображений на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 - Корпус закордонного виробництва

Розглянемо детальніше конструкцію підсилювача: блок має примусове повітряне охолодження, яке здійснюється трьома вентиляторами, що встановлені на його задній стінці, які охолоджують радіатор блока (M1 – M3), та вбудованими вентиляторами модулів живлення, які відводять нагріте повітря через отвори у боковій стінці блока. Керування роботою блока, вимірювання та відображення його робочих параметрів здійснюється мікропроцесорною системою контролю, для цього на передній панелі корпусу розташовані кнопки керування; робочі параметри блока відображуються на дворядковому LCD дисплеї. Індикація режиму роботи підсилювача здійснюється за допомогою світлодіодів, що розміщенні також на передній панелі. На задній панелі підсилювача розташовуються всі комутаційні роз'єми. Габаритні розміри підсилювача (b×h×l) 483 x 175 x 780мм, маса підсилювача 36 кг.

3 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ, МАТЕРІАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ

3.1. Вибір матеріалу друкованої плати.

Для виготовлення друкованої плати нам необхідно вибрати наступні матеріали: матеріал для діелектричної основи друкованої плати, матеріал для друкованих провідників і матеріал для захисного покриття від впливу вологи. Існує велике розмаїття фольгованих міддю шаруватих пластиків. Їх можна розділити на дві групи:

- на паперовій основі;
- на основі склотканини.

Для вибору матеріала друкованої плати проведемо порівняння характеристик найбільш широко використовуваних склотекстоліта марки СФ та гетинакса марки ГФ. Дані для порівняння занесем в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Характеристики матеріалів друкованих плат.

Матеріал	$\text{tg}\delta$	Тепло- стійкість $^{\circ}\text{C}$	Межа міцності, МПа	Питома в'язкість	Щільність, $\text{г}/\text{см}^3$	$E_{\text{пр}}$, мВ/м
Гетинакс ГФ-2	0.20	85	100	15	1.38	30
Скло- текстоліт СФ-2	0.04	125	300	180	1.75	18

Ці матеріали в вигляді жорстких листів формуються з декількох шарів паперу чи склотканини, скріплених між собою сполучною речовиною шляхом гарячого пресування. Сполучною речовиною зазвичай являються фенольна смола для паперу чи епоксидна для склотканини. В окремих випадках можуть також застосовуватись поліефірні, силіконові смоли або фторопласт. Шаровані пластики вкриваються з одної чи з обох сторін мідною фольгою стандартної товщини.

Характеристики готової друкованої плати залежать від конкретної сукупності вихідних матеріалів, а також від технології, що включає і механічну обробку плат.

В залежності від основи і просочувального матеріалу розрізняють декілька типів матеріалів для діелектричної основи друкованої плати.

Фенольний гетинакс - це паперова основа, просочена фенольною смолою. Гетинаксові плати призначені для використання в побутовій апаратурі, оскільки дуже дешеві.

Епоксидний гетинакс - це матеріал на такій же паперовій основі, але просочений епоксидною смолою.

Епоксидний склотекстоліт - це матеріал на основі склотканини, просочений епоксидною смолою. В цьому матеріалі поєднуються висока механічна міцність та гарні електричні властивості.

Міцність на згинання та ударна в'язкість друкованої плати повинні бути досить високими, щоб плата без пошкоджень могла бути навантажена встановленими на неї елементами з великою масою.

Як правило, шаруваті пластики на фенольному, а також епоксидному гетинаксі не використовуються в платах з металізованими отворами. В таких платах на стінки отворів наноситься тонкий шар міді. Так як температурний коефіцієнт розширення міді в 6 - 12 раз менше, ніж у фенольного гетинакса, присутній певний ризик утворення тріщин в металізованому шарі на стінках отворів при термоударі, якого зазнає друкована плата в машині для групової пайки.

Тріщина в металізованому шарі на стінках отворів різко знижує надійність з'єднань. У випадку застосування епоксидного склотекстоліту відношення температурних коефіцієнтів розширення приблизно рівно трьом, і ризик утворення тріщин в отворах достатньо малий.

Порівнявши характеристики основ робимо висновок, що у всіх відношеннях (за виключенням вартості) основи з епоксидного склотекстоліту переважають основи з гетинаксу.

Друковані плати з епоксидного склотекстоліту характеризуються меншою деформацією, ніж друковані плати з фенольного і епоксидного гетинаксу; останні мають ступінь деформації в десять раз більше, ніж склотекстоліт.

Деякі характеристики різних типів шаруватих пластиків наведені в таблиці. Порівнюючи ці характеристики, робимо висновок, що для виготовлення двосторонньої друкованої плати слід застосовувати епоксидний склотекстоліт.

В якості фольги, що застосовується для фольгування діелектричної основи можна використовувати мідну, алюмінієву або нікелеву фольгу. Однак, алюмінієва фольга поступається мідній через погану пайку, а нікелева - через велику вартість. Тому в якості фольги вибираємо мідь.

Вигодячи з усіх вищеперерахованих порівнянь, для виготовлення двосторонньої друкованої плати позитивним комбінованим методом обираємо фольгований склотекстоліт FR – 4 – 0.05 – 2.0.

3.2. Вибір матеріалу покриття друкованої плати.

Тепер розглянемо необхідність застосування захисного покриття від вологи. Нормальні умови при експлуатації радіоапаратури витримуються далеко не завжди. Перш за все, це відноситься до вологості повітря. Слід відрізнити абсолютну вологість, що характеризується кількістю водяної пари в грамах, що міститься в 1 м³ повітря, від відносної вологості, що являє собою виражене в відсотках відношення абсолютної вологості до тої кількості водяної пари, при якій повітря насичене при кожній даній температурі. Підвищення температури призводить до зменшення відносної вологості, а зниження, навпаки, - до її збільшення, аж до випадіння роси.

Вплив вологого повітря на радіоапаратуру пояснюється малими розмірами молекул води (до $3 \cdot 10^{-8}$ см). Це дозволяє їй проникати в найменші пори та тріщини діелектриків, а так як вона гарно розчинює солі та луги, то процес електrolітичної дисоціації, що відбувається при цьому, призводить до утворення провідних електrolітів, що різко знижують поверхневий та об'ємний опір ізоляції. Навіть при

нормальній відносній вологості повітря (65%) всі тіла вкриті тоненькою (0,001...0,01 мкм) плівкою вологи, яка може бути неперервною (на гідрофільній поверхні) або перервною (на гідрофобній). Зі зростом відносної вологості товщина плівки росте і при 93...96% досягає сотен мікрон, різко знижуючи поверхневий опір ізолятора.

Зниження поверхневого і об'ємного опору призводить до шунтування елементів, появи гальванічних зв'язків між ними, зростання втрат в конденсаторах та трансформаторах, падінню добротності котушок і так далі. Все це викликає погіршення роботи пристрою і в ряді випадків вихід його з ладу через електричний пробій.

Вельми небезпечна, особливо для срібла та олова, електрохімічна корозія, що призводить до порушення паяних з'єднань в друкованому монтажі, зростання перехідного опору контактів реле та перемикачів (аж до повного розриву кола). Велику небезпеку висока відносна вологість несе для самих друкованих плат - через невеликі відстані між провідниками поява плівки та крапель вологи призводить до пробію між ними.

Отже, повітря з високою (більше 80%) відносною вологістю, що діє тривалий час на радіоапаратуру - фактор, який необхідно враховувати при її конструюванні та експлуатації.

Методи захисту радіоелектронної апаратури від впливу вологого повітря бувають пасивними та активними. Пасивний захист оснований на створенні бар'єру, або сповільнюючого проникнення вологи, або ж повністю ізолюючого його від вологого повітря. В першому випадку це досягається просоченням або покриттям об'єкта різними речовинами (смолами, лаками, компаундами), в другому - встановленням його в герметичний корпус (металевий корпус, скляний чи керамічний балон). Активний захист заключається в поглинанні вологи адсорбентами, що знижують відносну вологість повітря в кожусі апарату до безпечного рівня.

Пасивні методи в теперішній час - основні при захисті радіоапаратури. Слідуює, проте, відмітити, що повна герметизація апаратів зазвичай не застосовується через

велику вартість, значної матеріалоемності, збільшенням маси та об'єму апарату, складності ущільнення осей органів керування, поганої ремонтпридатності і так далі.

Найпоширеніший і дешевий спосіб захисту гетинаксових і склотекстолітних друкованих плат - покриття їх бакелітовими, епоксидними та іншими лаками. Найбільш стійке до впливу вологи - покриття з епоксидної смоли, що забезпечує саме високе значення поверхневого опору. Деяко гірші захисні властивості перхлорвінілових, фенольних та епоксидних лаків. Погано захищає покриття з полістиролу, але на відміну від інших, при переміщенні виробу в нормальні умови воно швидко відновлює свої властивості.

Далі наведені найбільш розповсюджені матеріали, що застосовуються в якості захисних покриттів.

Лак СБ-1с, на основі фенолформальдегідної смоли, нанесений на поверхню сохне при температурі 600°C протягом 4 годин, наносять його до п'яти шарів з сушінням після кожного матеріалу, в результаті отримуємо щільну еластичну плівку товщиною до 140 мкм.

Лак УР-231 відрізняється підвищеною еластичністю, вологостійкістю та термостійкістю, тому може застосовуватись для гнучких основ. Лак готують перед нанесенням згідно інструкції і наносять на поверхню пульверизацією, зануренням або пензлем. Наносять чотири шари з сушінням після кожного шару при температурі $18-230^{\circ}\text{C}$ протягом 1,5 год.

Для апаратури, що працює в тропічних умовах, в якості захисного покриття застосовують лак на основі епоксидної смоли Э - 4100. Перед покриттям в лак додають 3,5% затверджувача № 1, змішують та розводять сумішшю, що складається з ацетону, етилцелюлози та ксилола до в'язкості, 18 - 20 сек за вискозиметром ВЗ - 4. Після змішування рідину фільтрують через марлю, складену в декілька шарів. В отриману суміш занурюють чисту висушену плату. Після кожного занурення струшують залишки суміші і ставлять сушити на 10 хвилин, таким чином наносять шість шарів. Це покриття володіє малою усадкою та щільною структурою.

Виходячи з вищеперерахованих порівнянь, обираємо в якості захисного покриття від впливу вологи лак УР-231. ТУ6-10-863-84.

3.3. Вибір матеріалу корпусу.

Матеріал корпусу вибирається, виходячи з того, що виріб буде експлуатуватися в закритих приміщеннях тривалий час. Корпус повинен забезпечувати достатню корозійну стійкість, міцність та жорсткість конструкції. У виробництві бажано застосовувати матеріали, що дозволяють використати прогресивне формоутворення: лиття, штампування, пресування. У нашому випадку, основним критерієм вибору є електромеханічні властивості. Складемо таблицю для вибору матеріалів.

Таблиця 3.2. Вибір матеріалів корпусу

Показник\Тип матеріалу.	Щільність -10^3 кг/м^3		Модуль пружності $E \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$		Модуль зсуву $G \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$		Ціна за 1 т, в у.е.		Коеф. екр. погл. H_n на $f = 10 \text{ МГц}$ при $S = 0,1 \text{ мм}$		Σ
Ваговий коефіцієнт	0,15		0,1		0,1		0,3		0,35		1
Сталь Ст3 -1.5	7,83		2,1		7,8		500		30		2,8
	2	0,3	3	0,3	3	0,3	3	0,9	3	1,05	5
Сплав АМГ3	2,67		0,3		2,6		800		12		1,6
	3	0,45	1	0,1	1	0,1	2	0,6	1	0,35	
Латунь Л68	8,6		0,95		3,5		1000		15		1,8
	13	0,3	2	0,2	3	0,3	1	0,3	2	0,7	

Провівши аналіз вищеперерахованих матеріалів, в якості матеріалу корпусу обираємо сталь Ст3 -1.5.

3.4. Вибір елементної бази.

Провівши огляд аналогів, можна було побачити, що підсилювачі побудовані з використанням сучасних потужних польових MOSFET та LDMOS транзисторах, що володіють рядом переваг перед біполярними:

1. Перша перевага польового транзистора - він керується не струмом, а напругою (електричним полем), це значно спрощує схему та знижує потужність, яка витрачається на керування.
2. Друга перевага польового транзистора: в біполярному транзисторі, окрім основних носіїв струму, існують також і неосновні, які пристрій набуває, завдяки струму бази. З наявністю неосновних носіїв пов'язаний час розсмоктування, що в свою чергу зумовлює затримку вимикання транзистора. В польових транзисторах немає неосновних носіїв, тому вони можуть перемикатися зі значно більшою швидкістю, а також падають втрати потужності на перемикання.
3. Третя перевага зумовлена підвищеною теплостійкістю. Зростання температури польового транзистора при подачі на нього напруги призведе, згідно закону Ома, до підвищення опору відкритого транзистора і, відповідно, до зменшення струму. Поведінка біполярного транзистора більш складна, підвищення його температури веде до збільшення струму. Це означає, що біполярні транзистори не являються термостійкими приборами. В них може виникнути дуже небезпечний саморозігрів, який легко виводить транзистор з ладу.
4. Термостійкість польового транзистора допомагає розробнику при паралельному з'єднанні приборів для збільшення навантажувальної здатності. Можна вмикати паралельно достатньо велику кількість MOSFETів без вирівнюючих резисторів в силових ланках і при цьому не боятися розсиметрування струмів, що дуже небезпечно для біполярних транзисторів. Проте паралельне з'єднання польових транзисторів теж має свої особливості.

5. П'ята перевага польового транзистора пов'язана з його тепловими властивостями - повна відсутність вторинного пробою. Ця властивість дозволяє ефективніше використовувати польовий транзистор по потужності, що передається.

Врахувавши вище перераховані переваги зупинимось на застосуванні в підсилювачі польових транзисторів в якості активних елементів. Із застосуванням сучасної елементної бази потрібний коефіцієнт підсилення та вихідну потужність підсилювача на одному транзисторному каскаді, який працює у режимі класу В, ми не отримаємо, тому дане завдання будемо вирішувати використанням мостових схем складання потужностей.

Вибір транзистора для підсилювача обумовлюється наступними факторами:

- транзистор повинен працювати у діапазоні частот 87.5..108 МГц;
- транзистор повинен забезпечувати пікову вихідну потужність не менше 300 Вт.
- транзистор повинен забезпечувати коефіцієнт підсилення не менше 15 дБ.

Оскільки вітчизняна промисловість транзисторів з потрібними параметрами не випускає, зупинимось на виборі високоякісних транзисторів виробництва закордонних фірм. Нижче наведено порівняльні характеристики транзисторів різних виробників (табл. 3.3).

Таблиця.3.3. Порівняльні характеристики транзисторів

Тип транзистора	Вихідна потужність, Вт	Коеф. підсилення, дБ	Напруга живлення, В	Режим класу	Виробник
MRF151G	300	14	50	В	Motorola
2П979В	300	15	50	В	НИИЭТ
D5029UK	350	13	50	В	SEME LAB
SD2942	350	15	50	В	STM

Провівши попередній розрахунок згідно прийнятої структурної схеми (п.3) для транзистора D5029UK, отримали наступні результати: транзистор D5029UK потребує мінімальне значення вхідної потужності 70,78 Вт, що перевищує значення вимог ТЗ(50), для транзисторів MRF151G та 2П979В розрахунок вести не має потреби, оскільки вони мають гірші показники, а це призведе до збільшення ланок підсилення, а отже і кількості мостів додавання. Щодо попереднього розрахунку структурної схеми з транзистором SD2942, то отримані результати задовольняють вимогам ТЗ.

Виходячи з вищевказаних критеріїв вибору, для використання у підсилювачі потужності обрано транзистор SD2942. Транзистор SD2942 являє собою балансний транзистор, що складається, власне, з двох однакових транзисторів, створений саме для використання у балансних двотактних каскадах підсилення. Параметри та еквівалентна схема (загальний витік) наведені нижче.

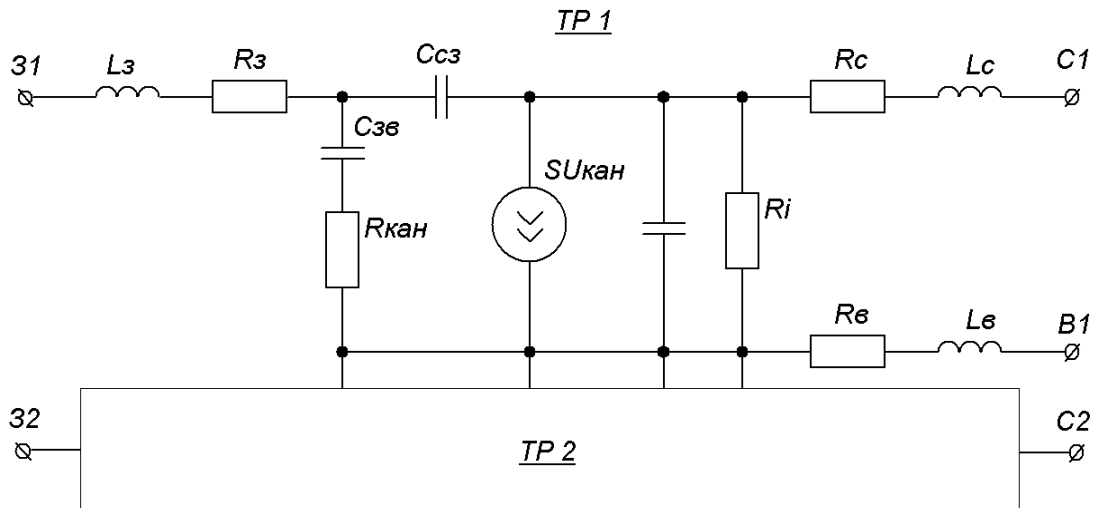


Рисунок 3.1 - Еквівалентна схема транзистора

Параметри:

- Максимальна напруга на стоці $E_{св\ max} = 130\ В$;
- Максимальна напруга на заслоні $E_{зв\ доп} = \pm 20\ В$;
- Максимальний струм стоку $I_{с\ max\ доп} = 40\ А$;
- Потужність розсіювання $P_{роз} = 500\ Вт$;
- Гранична температура $T_{гр} = 200$;
- Ємність заслін-витік $C_{зв} = 415\ пФ$;
- Ємність заслін-стік $C_{зс} = 17\ пФ$;
- Ємність стік-витік $C_{св} = 236\ пФ$;
- Напруга відсікання $E_{від} = 2..6\ В$;
- Крутизна $S = 3.1\ А/В$;
- Опір насичення $r_{нас} = 0,8\ Ом$.

Тепер потрібно обрати квадратурні мости складання/ділення потужності. В даний час фірма НВП «Квант-Ефір» випускає велике розмаїття суматорів за відносно невеликою ціною, порівняно з виробниками закордонних фірм. Параметри і характеристики наведені на рис. 3.4.

Діапазон робочих частот	VHF, UHF
Потужність вхідних сигналів по кожному з входів	до 20 кВт – для мостових суматорів
Максимальна кількість каналів, що складаються	2 – для мостових суматорів
Мінімальна відстань між каналами	0,8 МГц – для мостових суматорів
Смуга пропускання суматора за рівнем КСХН < 1,2	300 кГц
Хвильовий опір входів та виходу суматора	50 Ом
Тип вхідних та вихідного з'єднувача	EIA 7/8", 1-5/8" або інший на вимогу замовника
Ослаблення сигналу при проходженні з входів на вихід	0,1–0,3 дБ
КСХН кожного входу на робочій частоті	1,1
Розв'язка між входами суматора	30 дБ

Рисунок 3.2 - Технічні характеристики суматорів потужності

При виборі резисторів перш за все звертаємо увагу на їх габарити, вартість та надійність, що зумовлена напрацюванням на відмову. А виходячи з того що сучасні інтегральні технології дуже просунулися, порівняно з минулими роками, ми маємо резистори, які характеризуються: високою надійністю та низькою собівартістю, компактними розмірами та великим розмаїттям.

Порівняємо декілька типів резисторів.

Таблиця 3.4. Товстоплівкові резистори з допуском $\pm 5\%$. Технічні параметри.

Параметри	Значення				
	RC01	RC11	RC21	RC31	RC41
Тип	RC01	RC11	RC21	RC31	RC41
Типорозмір корпусу	1206	0805	0603	0402	0201
Діапазон номіналів опорів	1 Ом ... 1 МОм				100м...1МОм
Допуск	$\pm 5\%$				
Максимальна потужність	0.25 Вт	0.125Вт	0.1 Вт	0.063Вт	0.005 Вт
Максимальна робоча напруга	200 В	150 В	50 В		15 В
Діапазон робочих температур	-55 ... +155 °С				

Таблиця 3.5. Типорозміри SMD резисторів.

Типорозмір корпусу	L (мм)	W (мм)	T (мм)	Маса (г)
0201	0.6	0.3	0.3	0.02
0402	1.0	0.5	0.35	0.06
0603	1.6	0.8	0.45	0.2
0805	2.0	1.25	0.55	0.55
1206	3.2	1.6	0.55	1.0

Виходячи з вищенаведених таблиць в якості опорів обираємо резистори RC01 з типорозміром корпусу 1206.

Таблиця 3.6. Потужні SMD резистори. Технічні параметри.

Параметри	Значення		
	Тип	XC0204	RWN5020
Типорозмір корпусу	SMD MELF	SMD POW	SMD POW
Діапазон номіналів опорів	0.22Ом...10МОм	0.003Ом...1МОм	1Ом...0.1МОм
Допуск	0.1%...5%	1;2;5%	1;5%
Максимальна потужність	1 Вт	1.6Вт	1.6Вт
Максимальна робоча напруга	300 В		
Діапазон робочих температур	-55 ... +155°C		

Виходячи з таб.3.6. в якості потужних опорів обираємо резистори RWN5020 з типорозміром корпусу SMD POW.

В якості підстроювальних опорів вибираємо резистори PVG5A фірми Murata.

Підстроювальні резистори PVG5A.

Таблиця 3.7. Технічні параметри.

Функціональна характеристика	Лінійна
Номінальна потужність	0.1Вт при 50°C
Максимальна робоча напруга	50V
Робочий діапазон температур	-25°C...85°C
Допустиме відхилення номінального значення опору	±30%
Кут повороту	230°± 10°

При виборі конденсаторів, враховуючи умови експлуатації виробу, а також електричні параметри, будемо керуватися тим, що для конденсаторів висуваються наступні вимоги:

- найменша маса;
- найменші розміри;
- відносна дешевизна;
- висока стабільність;
- висока надійність;

Візьмемо на розгляд декілька типів конденсаторів, і зробимо порівняння відносно класу діелектрика у вигляді таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - SMD конденсатори. Технічні параметри

Клас діелектрика	Клас 1	Клас 2
Типорозмір корпусу	0402...1210	0402...2220
Номінальна постійна напруга U_n	50В; 200В; 500В; 1кВ; 3кВ	25В; 50 В; 100В; 200В; 500В; 1кВ; 2кВ; 3кВ
Діапазон ємностей	1 пФ...10 нФ; 1нФ...10мкФ	1 пФ...1 нФ; 1нФ...10мкФ

Продовження таблиці 3.8

Допуск ємностей (в % чи пФ)	При $C_n < 10$ пФ: ± 0.1 пФ ± 0.25 пФ ± 0.5 пФ При $C_n \geq 10$ пФ: ± 1 % ± 2 % ± 5 % ± 10 %	± 5 % ± 10 % ± 20 %
Максимально відносна девіація ємності ДС/С	-	± 15 %
Діапазон робочих температур	$-55 \dots +125^\circ\text{C}$	$-55 \dots +125^\circ\text{C}$
Максимальне значення тангенса кута втрат $\text{tg } \delta$	$< 1 \cdot 10^{-3}$	$< 25 \cdot 10^{-3}$ $< 35 \cdot 10^{-3}$ (16В)
Опір ізоляції при 25°C	$> 10^5$ МОм	$> 10^5$ МОм
при 125°C	-	$> 10^4$ МОм
Постійна часу при 25°C	> 1000 с	> 1000 с
при 125°C	> 100 с	> 100 с

Таблиця 3.9. Типорозміри SMD конденсаторів.

Розмір	0402	06032	0805	1206	1210
мм	1005	1608	2012	3216	3225
L	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.15	2.0 ± 0.02	3.2 ± 0.2	3.2 ± 0.3
b	0.5 ± 0.05	0.8 ± 0.1	1.25 ± 0.15	1.6 ± 0.15	2.5 ± 0.3
s	0.5 ± 0.05	0.8 ± 0.1	1.35max	1.3max	1.7max
k	0.1-0.4	0.1-0.4	0.13-0.75	0.25-0.75	0.25-0.75

Виходячи з табл. 3.8 - 9 в якості SMD конденсаторів обираємо конденсатори з діелектриком 1 класу, типорозміром корпусу 1210.

В якості електролітичних конденсаторів обираємо конденсатори фірми Nitano, для звичайного монтажу серії EXR.

Серія EXR:

діапазон напруг	6.3...100В	160...450В
діапазон ємностей	0.47...15000 мкФ	0.47...470 мкФ
температурний діапазон	-40...+105°C	-25...+105°C
струм втрат	<0.01CU	<0.03CU
розкид ємності	±20% при 20°C, 120Гц	

Діелектричні втрати ($\text{tg}\sigma$), не більше:

U,В	16	25	35	50	63	100	200	350	400
$\text{tg}\sigma(\text{D4-6.3})$	0.16	0.14	0.12	0.1	0.1	0.08	0.18	0.2	0.2

Стабільність при низьких температурах (відношення імпедансів на частоті 120 Гц).

U,В	16	25	35	50	63	100	200	350	400
$Z(-25^\circ\text{C})/ Z(+20^\circ\text{C})$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$Z(-40^\circ\text{C})/ Z(+20^\circ\text{C})$	4	4	3	3	3	3			

Таблиця 3.10 - Типорозміри електролітичних конденсаторів

мкФ/ В	16	25	35	50	63	100	200	350	400
1				5×11	5×11	5×11	5×11	6×11	6×11
2.2				5×11	5×11	5×11	6×11	6×11	8×12
4.7				5×11	5×11	5×11	8×12	8×12	10×1 3
10	5×11	5×11	5×11	5×11	5×11	6×11	10×1 6	10×1 3	10×1 3
22	5×11	5×11	5×11	5×11	6×11	6×11	10×2 1	10×1 3	10×1 6

Продовження таблиці 3.10

33	5×11	5×11	5×11	6×11	6×11	8×12	13×2	10×2	10×2
							1	1	1
47	5×11	5×11	5×11	6×11	6×11	10×1	13×2	13×2	13×2
						3	1	1	6
100	5×11	6×11	6×11	8×12	10×1	10×2	16×2	16×3	16×3
					3	1	6	2	2
220	6×11	8×12	8×14	10×1	10×1	13×2	18×3	18×4	
				3	6	6	6	1	
330	8×12	8×14	10×1	10×1	10×2	13×2			
			3	7	0	6			
470	8×12	8×14	10×1	13×2	13×2	16×2			
			6	1	6	6			
1000	10×1	10×2	13×2	13×2	16×2	18×4			
	6	1	1	6	5	1			
2200	13×2	13×2	16×2	16×3	18×3				
	1	1	6	6	6				
3300	13×2	16×2	16×3	18×3	22×4				
	6	6	2	6	1				
4700	16×2	16×3	18×3	22×4	25×4				
	6	2	6	1	1				

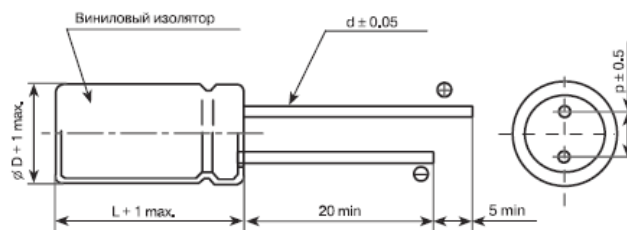


Рисунок 3.3 - Габаритні розміри електролітичних конденсаторів

4 ВИБІР СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПІДСИЛЮВАЧА ТА ЙОГО ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК

4.1. Вибір структурної схеми.

Розробка структурної схеми підсилювача полягає у тому, щоб обрати раціональну кількість каскадів та тип застосованих в них активних елементів, які б задовольнили вимогам технічного завдання при мінімальних затратах коштів на виготовлення, при високому рівні якості та надійності роботи.

Потрібна потужність радіомовних передавачів сучасних РТС в більшості випадках на 3 - 5 порядків перевищує максимальну потужність, що генерується електронними приборами. Ця різниця між потужністю радіопередавача і потужністю одиничного генератора стає суттєво відчутна при переході від електровакуумних пристроїв до напівпровідникових. Вирішення цієї проблеми являється використання підсилювачів, що побудовані шляхом складення потужностей декількох однотипних генераторів чи транзисторних каскадів (модулів).

Можливі три основні способи сумування потужностей сигналів однотипних генераторів:

- використання багатополюсних схем суматорів;
- використання ФАР;
- складання потужності в спільному резонаторі.

В першому випадку до спеціального багатополюсного пристрою підключається велика кількість однотипних генераторів, потужність яких потрапляє в загальний вихідний канал, з'єднаний з навантаженням (рис.4.1).

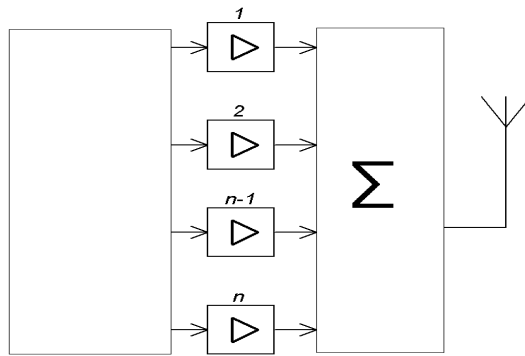


Рисунок 4.1 - Використання багатополюсних схем суматорів

В другому випадку додавання потужностей сигналів відбувається в просторі за допомогою фазованих антенних решіток, що складаються з великої кількості певним чином орієнтованих випромінювачів, кожен з яких збуджується від самостійного генератора. Всі сигнали, підведені до випромінювача, ідентичні, за винятком значень початкових фаз, що пов'язані між собою певним законом. В даному випадку постає завдання стабілізації і керування фронтом фаз сигналів однакової структури(рис.4.2).

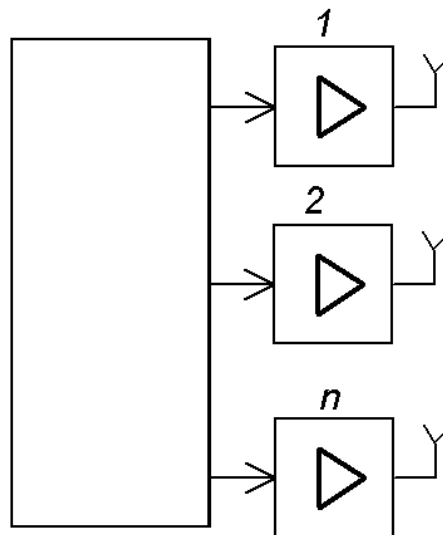


Рисунок 4.2 - Використання ФАР

В третьому випадку сигнали генераторів підводяться до загальної коливальної системи (для НВЧ – об’ємний резонатор), в якому і відбувається їх складання (рис.4.3).

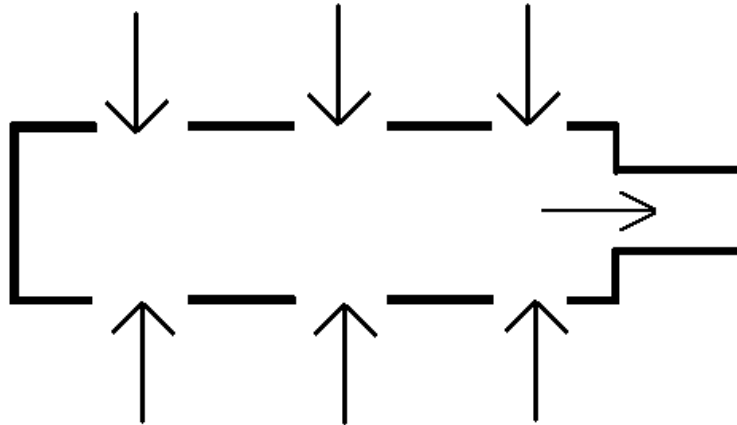


Рисунок 4.3 - Складання потужності в спільному резонаторі

Практично перший спосіб дозволяє збільшити потужність радіопередавача по відношенню до потужності одного н/п приладу на 15..20дБ, другий – 30..40дБ, третій - 10..13дБ. Всі ці способи дозволяють суттєво підвищити надійність радіопередавача і стійкість роботи підсилювального тракту, так як суматори покращують розв’язку між окремими каскадами. Крім того, при додаванні потужності сигналів покращується охолодження потужних н/п пристроїв, що розосереджені на великій поверхні.

Суматори потужностей повинні відповідати наступним вимогам:

- всі виходи суматора повинні бути розв’язані між собою або взаємно незалежними;
- потужність відбитих сигналів по всім входам повинна прямувати до «0»;
- перераховані вище властивості повинні зберігатися в необхідній смузі частот.

Наведеними вище вимогам відповідають наступні суматори:

- створені з K ступенів мостових квадратурних пристроїв;
- створені з K ступенів пристроїв синфазного типу;
- типу «зірка».

Сучасні суматори FM та УКХ - ЧМ діапазонів (87,5 – 108 та 66-74 МГц) виконуються на базі смугових дворезонаторних коаксіальних фільтрів за мостовою схемою або схемою «зірка». Мінімальні розніс між сигналами передавачів по частоті 11 МГц для суматорів типу зірка та 0,8 МГц для мостових суматорів. На даний момент випускаються суматори з вихідною потужністю до 30 кВт. Максимальна кількість входів – 7. Суматори типу «зірка» – найпростіші за конструкцією (а отже й найдешевші), але вони виготовляються тільки на конкретні канали. Випускаються тільки двоканальні суматори типу «зірка» з максимальною вихідною потужністю 4 кВт. Мостові суматори є найбільш універсальними, на їх базі можливе створення багатоканальних суматорів, що досягається за рахунок наявності у них широкосмугового входу. Мостові суматори можуть перенастроюватися в межах усього дециметрового діапазону. Максимальна вихідна потужність мостів, які випускаються на даний момент, досягає 30 кВт. Мінімальний рознос між сигналами по частоті – 2 ТВК (1 канал між робочими). Суматори на різниці ходу займають проміжне місце між мостовими суматорами та суматорами типу «зірка». Вони дозволяють складати два сигнали конкретних телевізійних каналів з мінімальним розносом 3 ТВК (2 канали між робочими). Максимальна вихідна потужність – 4 кВт.

Провівши аналіз, зупинемось на використанні багатополосного пристрою з мостовим квадратурним складанням потужностей окремих підсилювальних модулів (транзисторних каскадів), так як він цілком може задовольнити наші вимоги щодо всього тракту підсилення, і не потребує, як для методу з використання ФАР, додаткової стабілізації і системи керування фронтом фаз сигналів.

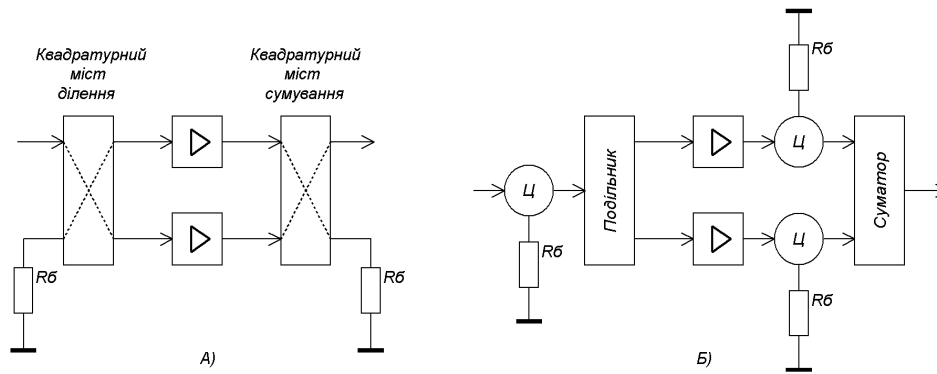


Рисунок 4.4 - Варіанти побудови підсилювального модуля

Підсилювач можна побудувати не тільки застосовуючи схеми з квадратурним складанням потужностей двох ідентичних каскадів, а й з використанням циркуляторів. Варіанти схем побудови показано на рис.4.4. Аналізуючи дані варіанти схем відзначимо, що циркулятори мають великі втрати, їх перехідне згасання в прямому напрямку сягає 1 дБ, вони є дуже вузькосмуговими (до 12% відносно середньої частоти діапазону), а також до недоліків можна віднести їх габарити.

Зупинимось на розгляді пристрою НВЧ мостового пристрою, два типи якого – зі шлейфами і на зв'язних несиметричних мікροстрічкових лініях – представлені на рис.5.5. Кожен з чотирьох входів мостового пристрою пов'язаний з двома іншими і розв'язаний з третім. При підведенні сигналу до одного зі входів пристрій являється подільником потужності, при одночасному збудженні двох входів з виконанням певного фазового співвідношення – суматор потужності сигналів. Так, в мостових пристроях, наведених на рисунку 4.5, попарно розв'язані по два входи: 1-2 та 3-4.

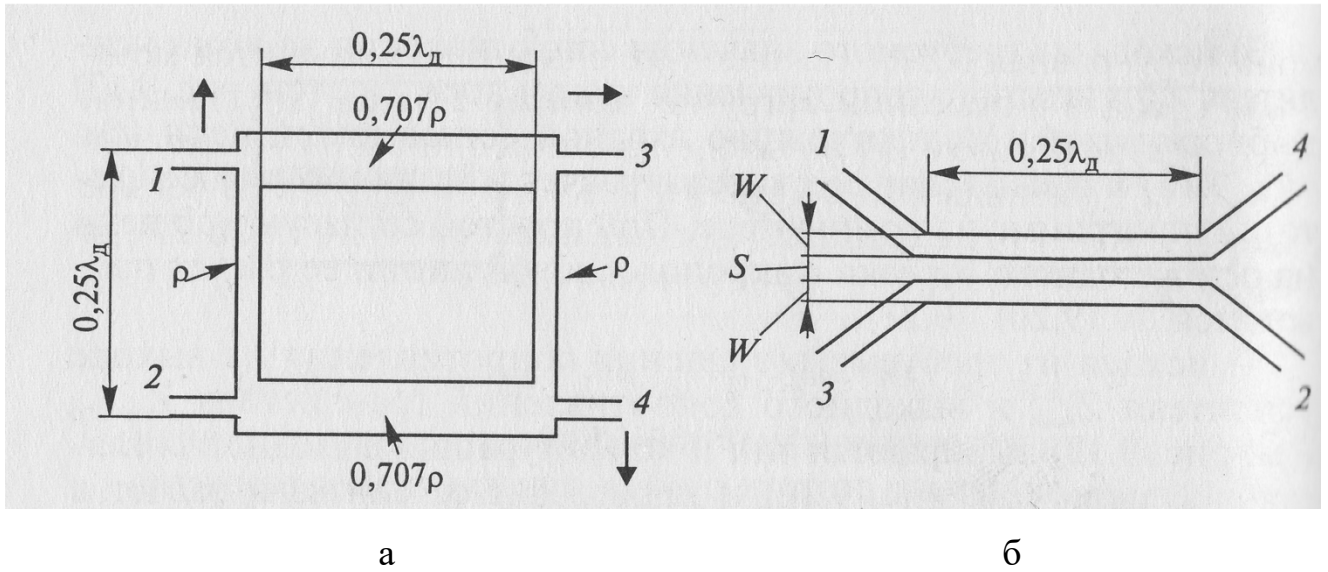


Рисунок 4.5 - НВЧ мостові пристрої

Сигнал, підведений до входу 1, порівну ділиться між входами 3 та 4. Причому на вході 3 він зсунутий по фазі на 90° градусів, на вході 4 – на 180° по відношенню до сигналу на вході 1. Різниця в зсуві фази на 90° градусів і зумовлює назву пристрою як квадратурного. При підведенні до входів 1 та 2 двох однакових сигналів рівної потужності P_1 , зсунутих по фазі на 90° градусів, на вході 3 чи 4 з'явиться сумарний сигнал потужністю $2 \cdot P_1$.

В схемі на рис 5.6 мостовий пристрій на вході підсилювачів використовується як подільник потужності сигналу в два рази, на виході як суматор двох сигналів. При розузгодженні по входу транзисторів відбиті сигнали потрапляють в баластне навантаження R_{b1} . Даний пристрій, а також незалежна робота обох НВЧ підсилювачів підвищують стійкість роботи всього тракту підсилення НВЧ сигналу радіопередавача.

Мостові пристрої зберігають свої властивості в певній смузі частот, поділяючись на вузько- та широкопasmові. Так, пристрій зі шлейфами (рис 4.5,а) являється вузькопasmовим, зі зв'язаними лініями (рис 4.5,б) – широкопasmовим.

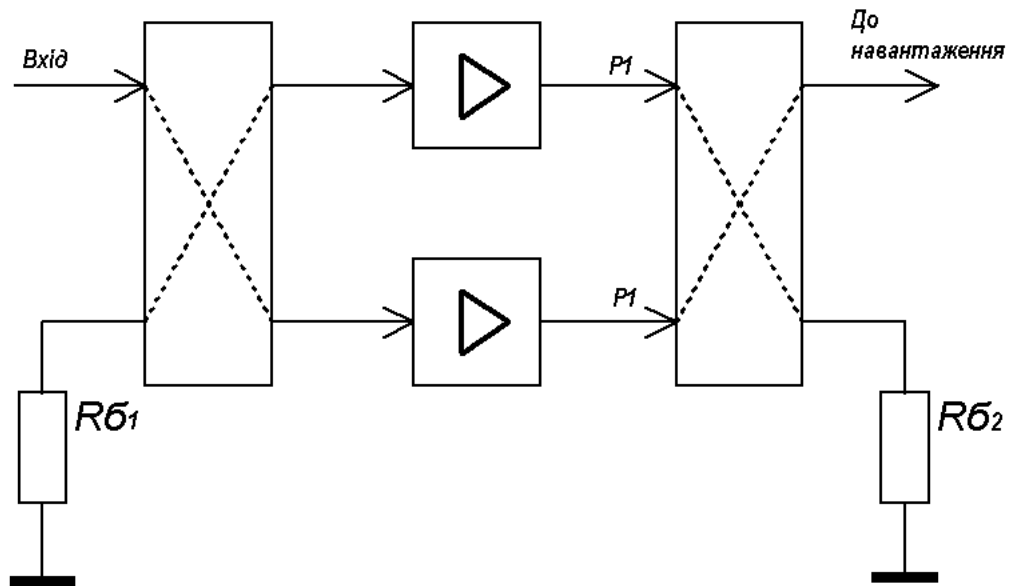


Рисунок 4.6 - Мостова схема

4.2. Попередній розрахунок підсилювача.

За ТЗ необхідно розвинути потужність 1кВт на виході підсилювача, прийємо попередньо структурну схему зображену на рис.4.7. Та проведемо попередній розрахунок підсилювача.

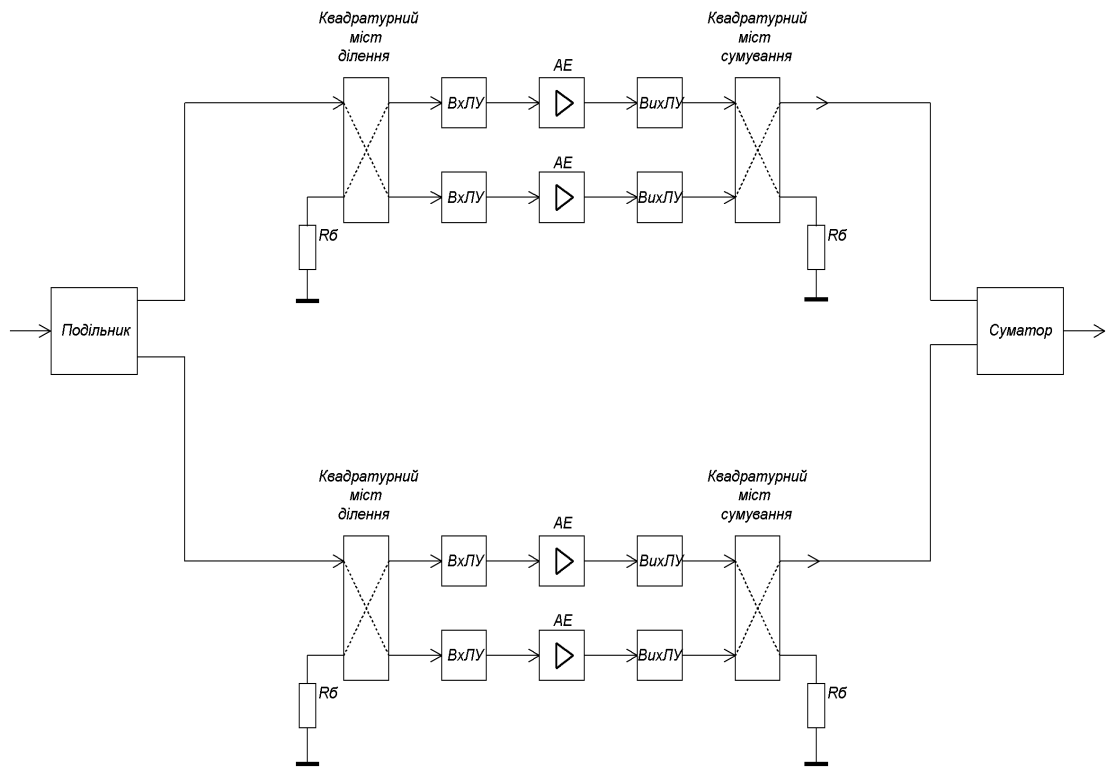


Рисунок 4.7 - Попередньо прийнята до розрахунку структурна схема

На виході підсилювального модуля для контролю падаючої та відбитої потужності встановлюємо вимірювальний відгалужувач, який вносить втрати в розмірі 0,3 дБ. За ТЗ необхідно розвинути потужність в 1 кВт після проходження вимірювального відгалужувача, знайдемо потужність на його вході: потужність на вході відгалужувача становить

$$P_{BX.від} = P_{ВЛХ} \cdot 10^{\frac{\Delta P}{10}} = 1000 \cdot 10^{\frac{0.3}{10}} = 1072(Bm)$$

Ця потужність надходить з суматора, що вносить згасання 0,3 дБ, знаходимо потужність на вході суматора:

$$P_{BX.см} = P_{BX.від} \cdot 10^{\frac{\Delta P}{10}} = 1072 \cdot 10^{\frac{0.3}{10}} = 1149(Bm)$$

Далі ця потужність порівну ділиться між двома квадратурними мостами, тобто на виході кожного моста маємо по 574,5 Вт (1149/2). Кожен міст, в свою чергу, вносить втрати 0,3 дБ. Отже на вході однакових мостів отримаємо

$$P_{Bx.M} = P_{Bix.M} \cdot 10^{\frac{0,3}{10}} = 574,5 \cdot 10^{\frac{0,3}{10}} = 615(Bm) \text{ Тобто по } 307,5 (615/2) \text{ Вт на } 4 \text{ входи двох суматорів.}$$

Отже на один каскад підсилення припадає по 307,5 Вт, сучасні транзистори дають нам коефіцієнт підсилення 15 дБ та вихідну потужність 350 Вт.

Маємо $P_{Bx.VT} = P_{Bix.VT} / 10^{\frac{15}{10}} = 307,52 / 10^{\frac{15}{10}} = 9,725 Bm$ на входах підсилювальних каскадів.

Так як квадратурний подільник аналогічний за своєю будовою суматору, то втрати на двох мостах складатимуть 0,6 дБ. Отримаємо 44,66 Вт на подільнику (

$$9,725 \cdot 4 \cdot 10^{\frac{0,6}{10}}), \text{ що вносить втрати } 0,3 \text{ дБ, а отже на його вході - } 47,857 \text{ Вт (}$$

$$44,66 \cdot 4 \cdot 10^{\frac{0,3}{10}}), \text{ що задовольняє вимогам ТЗ - мінімальна вхідна потужність } 50 \text{ Вт.}$$

Остаточна структурна схема зображена на рис. 4.8.

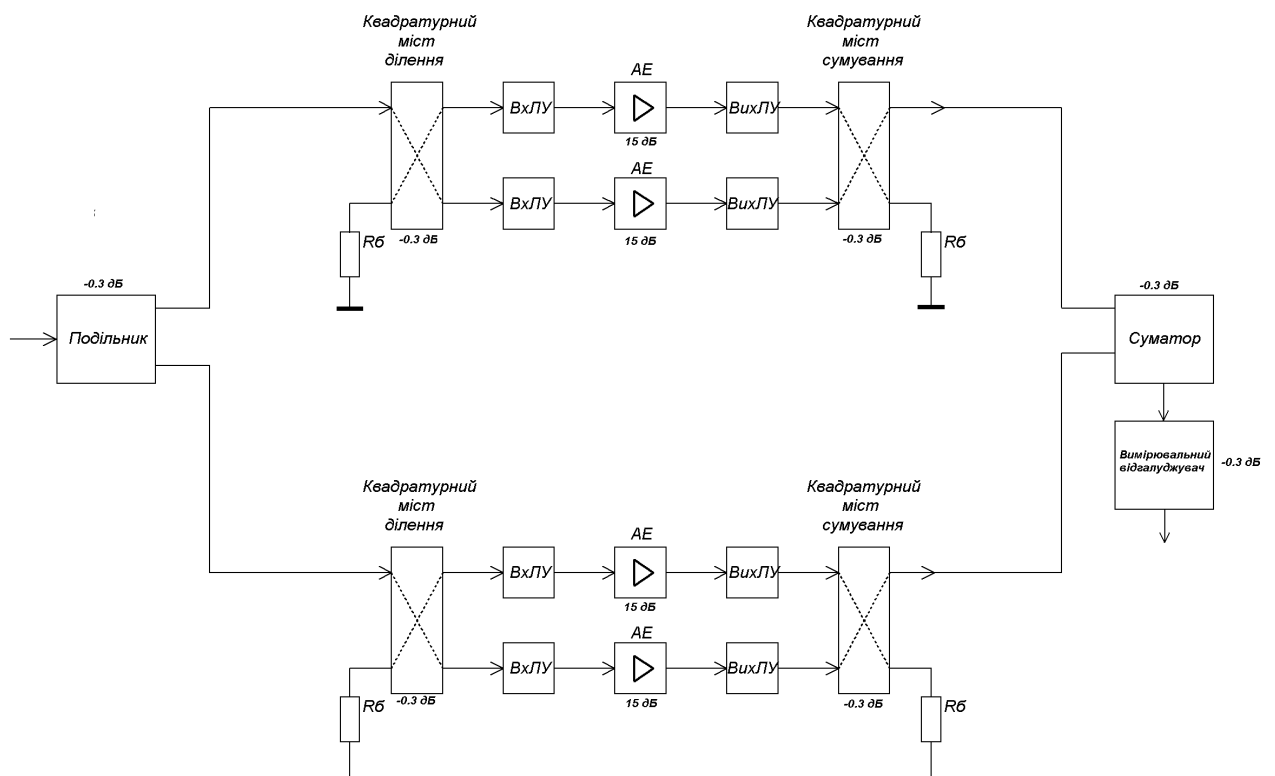


Рисунок 4.8 - Структурна схема підсилювача

5 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА 350 Вт, ВИХІДНОГО ТА ВХІДНОГО КОЛА УЗГОДЖЕННЯ

5.1. Електричний розрахунок підсилювача 350 Вт.

В якості АЕ в попередньому розділі був обраний балансний польовий високолінійний МДП - транзистор фірми STM SD2942, параметри та еквівалентна схема (загальний витік) якого наведено нижче.

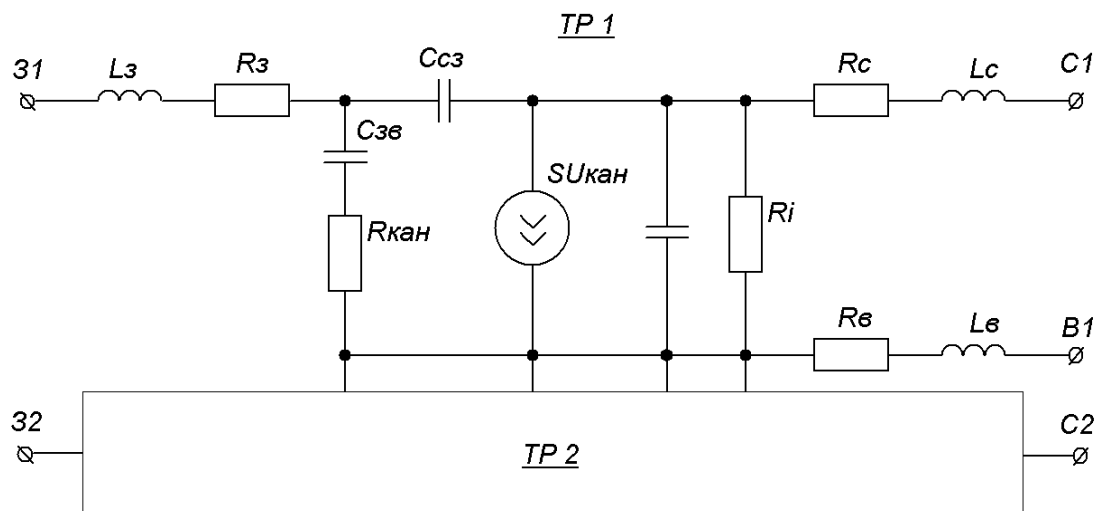


Рисунок 5.1 - Еквівалентна схема транзистора

- Максимальна напруга на стоці $E_{св\ max} = 130\ В$;
- Максимальна напруга на заслоні $E_{зв\ доп} = \pm 20\ В$;
- Максимальний струм стоку $I_{с\ max\ доп} = 40\ А$;
- Потужність розсіювання $P_{роз} = 500\ Вт$;
- Гранична температура $T_{гр} = 200$;
- Ємність заслін-витік $C_{зв} = 415\ пФ$;
- Ємність заслін-стік $C_{зс} = 17\ пФ$;
- Ємність стік-витік $C_{св} = 236\ пФ$;
- Напруга відсікання $E_{від} = 2..6\ В$;
- Крутизна $S = 3.1\ А/В$;

- Опір насичення $r_{нас} = 0,8 \text{ Ом}$.

Проведемо електричний розрахунок стокового (вихідного) кола за методикою викладеною в [1]. Транзистори використаємо в режимі класу В ($\theta=90^\circ$).

Оскільки даних по внутрішньому опорі R_i , опорів виводів r_3 , r_c та r_b , опору каналу $r_{кан}$ в літературі не вказано, то для приблизних розрахунків приймаємо $R_i = \infty$, $r_3=r_c=r_b=r_{кан}=0$. Також приведемо дані про вхідний та навантажувальний імпеданс транзистора в робочому діапазоні частот при $E_c = 32 \text{ В}$ таблиця 5.1.

Таблиця 5.1 - Вхідний та вихідний імпеданс транзистора

f	$Z_{IN} (\Omega)$	$Z_{DL} (\Omega)$
250 MHz	1.3 - j 1.9	1.9 + j 3.2
230 MHz	1.2 - j 1.8	2.1 + j 3.7
200 MHz	1.1 - j 1.6	2.7 + j 4.2
175 MHz	1.0 - j 1.4	3.3 + j 4.8
100 MHz	1.8 - j 2.5	7.5 + j 9
50 MHz	3.2 - j 4.4	10 + j 12

1. Визначаємо амплітуду першої гармоніки напруги стоку:

$$U_{c1zp} = \sqrt{2 \cdot P_{ном} \cdot R_{екв.вих.}}$$

де: $P_{ном}$ – номінальна вихідна потужність на один транзистор (для половини SD2942 складає вона складає – $307.52/2=153.76 \text{ Вт}$);

$R_{екв.вих.}$ – еквівалентний навантажувальний опір транзистора ($R_{екв.вих.}=7.5 \text{ Ом}$ на частоті 100 МГц).

$$U_{c1zp} = \sqrt{2 \cdot 153.76 \cdot 7.5} = 48.025 \text{ В}$$

2. Амплітуда першої гармоніки стокового струму:

$$I_{c1} = \frac{2 \cdot P_{ном}}{U_{c1zp}}$$

$$I_{c1} = \frac{2 \cdot 153.76}{48.025} = 6.4 \text{ A}$$

3. Постійна складова стокового струму:

$$I_{c0} = \frac{\alpha_0(\theta)}{\alpha_1(\theta)} \cdot I_{c1}$$

де $\alpha_0(\theta), \alpha_1(\theta)$ – коефіцієнти Берга. Для $\theta=90^\circ$ $\alpha_0(\theta) = 0.318$, $\alpha_1(\theta) = 0.5$

$$I_{c0} = \frac{0.318}{0.5} \cdot 6.4 = 4.073 \text{ A}$$

4. Максимальный стоковый струм:

$$I_{c\max} = \frac{I_{c0}}{\alpha_0(\theta)}$$

$$I_{c\max} = \frac{4.073}{0.318} = 12.8 \text{ A} < I_{c\max.\text{доп.}} = 40 \text{ A}$$

5. Напряга стокового живлення:

$$E_c = U_{c1zp} + r_{нас} \cdot I_{c\max}$$

$$E_c = 48.025 + 0.8 \cdot 12.8 = 58.27 \text{ (В)}$$

6. Максимальна напруга стоку:

$$E_{c\max} = E_c + (1.2 \dots 1.3) \cdot U_{c1zp} \leq E_{c\max 0.\text{дон.}}$$

$$E_{c\max} = 58.27 + 1.3 \cdot 48.025 = 120.7 \text{ В} \leq 130 \text{ В}$$

7. Максимальна потужність, споживана від джерела живлення:

$$P_{0\max} = E_c \cdot I_{c0}$$

$$P_{0\max} = 58.27 \cdot 4.073 = 237.3 \text{ Вт}$$

8. Коефіцієнт корисної дії стокового кола при номінальній потужності:

$$\eta = \frac{P_{1\text{ном}}}{P_{0\max}}$$

$$\eta = \frac{153.76}{237.3} = 0.65$$

9. Максимальна розсіювана потужність на стоці:

$$P_{c.\text{MAX}} = P_{0\text{MAX}} - P_{1\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{1}{K\text{CX}_{\text{MAX}}}},$$

$K\text{CX}_{\text{MAX}}$ – максимальний КСХ навантаження (приймаємо рівним 10).

$$P_{c\max} = 237.3 - 153.76 \cdot \sqrt{0.1} = 188.68 \text{ Вт}$$

на пів транзистора, 377.36 Вт ($188.68 \cdot 2$) на транзистор $< P_{\text{роз}} = 500$ Вт.

Проведемо розрахунок вхідного кола транзистора.

1. Амплітуда змінної напруги на каналі:

$$U_{\text{кан}} = \frac{I_{c1} \cdot \left(1 + \frac{R_{\text{екв}}}{R_i}\right)}{S \cdot \gamma_1(\theta)}$$

де $\gamma_1(\theta)$ -коефіцієнт розкладення косинусоїдальних імпульсів з кутом відсікання θ (для $\theta=90^\circ$ $\gamma_1(\theta)=0.318$):

$$U_{\text{кан}} = \frac{6.4 \cdot \left(1 + \frac{7.5}{\infty}\right)}{3.3 \cdot 0.318} = 6.49 \text{ B}$$

2. Напруга зміщення на заслоні:

$$E_3 = E_{\text{відс}} + U_{\text{кан}} \cdot \cos\theta$$

$$E_3 = 3 + 6.49 \cdot \cos(90) = 5.91 \text{ B}$$

3. Максимальна напруга на заслоні:

$$\pm E_{\text{звмах}} = E_3 \pm U_{\text{кан}} < E_{\text{звдон}}$$

$$E_{\text{звмах}} = 5.91 + 6.49 = 12.4 \text{ (B)} < E_{\text{звдон}} = \pm 20 \text{ B.}$$

4. Амплітуда струму заслону:

$$I_3 = 2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot f \cdot C_{36} \cdot I_{c1} \cdot \left(1 + \frac{R_{екв}}{R_i}\right) / S \cdot \gamma_1(\theta),$$

де $f=100$ МГц;

$$\chi = 1 + (\gamma_1(\theta) \cdot S \cdot R_{екв} \cdot R_i / (R_{екв} + R_i) + 1) \cdot C_{3c} / C_{36}$$

$$\chi = 1 + (0.318 \cdot 3.1 \cdot 7.5 / (7.5 + \infty) + 1) \cdot 17 \cdot 10^{-12} / 415 \cdot 10^{-12} = 1.3$$

$$I_3 = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.55 \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot 4115 \cdot 10^{-12} \cdot 6.4 \cdot \left(1 + \frac{7.5}{\infty}\right)}{3.1 \cdot 0.318} = 2.331(A).$$

5. Вхідна потужність:

$$P_{вх} = 0.5 \cdot I_3^2 \cdot R_{вх} = 4,89 \text{ Вт}$$

6. Коефіцієнт підсилення по потужності:

$$K_p = \frac{P_{1ном}}{P_{вх}}$$

$$K_p = \frac{153.76}{4.89} = 31.442 = 15(\text{дБ}).$$

Отже, проведені розрахунки задовольняють вимогам ТЗ та попереднім розрахункам структурної схеми і для всього модуля ми отримуємо такі результати:

$P_{\text{вх}} = 2 \cdot 4.89 = 9.78 \text{ Вт}$ (9,75 Вт для попереднього розрахунку), $K_p = 15 \text{ дБ}$.

5.2. Розрахунок вихідного кола узгодження.

В діапазоні робочих частот підсилювача симетруючі пристрої найчастіше виконуються на відрізках зв'язаних ліній – коаксіальних або мікροстрічкових. Хвильовий опір ліній повинен бути рівним 50 Ом для узгодження його з входом суматора потужності . Виходячи з того, що хвильовий опір такої лінії залежить від хвильового опору використаного коаксіального кабелю, обираємо з потрібним нам хвильовим опором 50 Ом. Для компенсації реактивної складової вихідного опору транзистора та трансформації активної складової необхідне використання одношлейфного узгодження, проте тут виникає проблема – довжина хвилі в даному діапазоні відносно велика, а звідси великі розміри узгоджувальних пристроїв. Тому в нашому випадку для компенсації реактивної складової вихідного опору транзистора використаємо реактивність протилежного знаку, тобто індуктивність, що виконаємо з посрібленого дроту діаметром 2 мм і намотана на каркасі 8 мм у вигляді двох витків. Для трансформації активної складової вихідного опору транзистора використовуємо коаксіальну лінію. Довжина лінії визначається із умови $l \leq \lambda/8$, на максимальній частоті діапазону:

$$l = \frac{\lambda_{\text{MIN}}}{8} = \frac{c}{f_{\text{MAX}} \cdot 8} = \frac{3 \cdot 10^8}{108 \cdot 10^6 \cdot 8} = 0.347 \text{ м} = 34.7 \text{ см}$$

Вибираємо довжину коаксіального кабелю 347 мм.

Для зменшення габаритних розмірів кола узгодження та спрощення монтажу, його доцільно виконати у вигляді одного витка коаксіального кабелю, лінія узгодження наведена на рисунку.

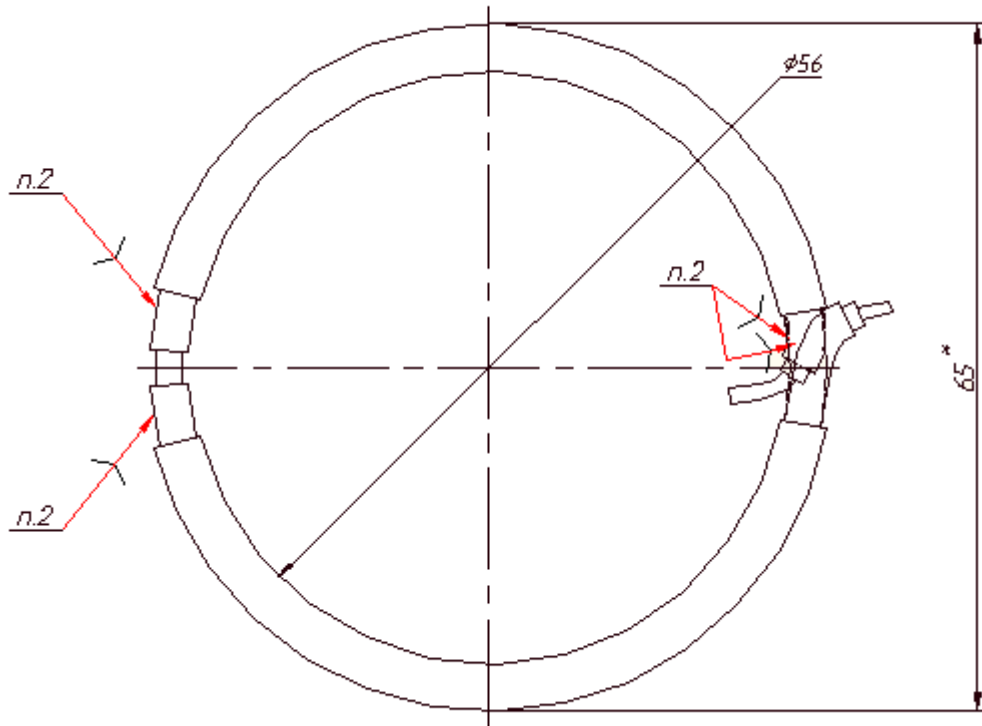


Рисунок 5.2 - Вихідне коло узгодження

5.3. Розрахунок вхідного кола узгодження.

Для узгодження опору та симетрії вхідного кола в підсилюючому модулі використовуємо широкопasmовий трансформатор.

При аналізі роботи трансформаторів даного типу користуються наближеною еквівалентною схемою (рис.5.3) із зосередженими параметрами, де L_1 – індуктивність первинної обмотки, L_{S1} , L_{S2} – еквівалентні індуктивності розсіяння первинної та вторинної обмоток, а C_1 , C_2 – їх власні еквівалентні ємності; r_1 , r_2 та R_c – еквівалентні опори втрат в обмотках та осерді; C_{1-2} – еквівалентна ємність між обмотками; ΠT – ідеальний трансформатор, в якому нема втрат та паразитних параметрів, а $n(w) = \text{const}$.

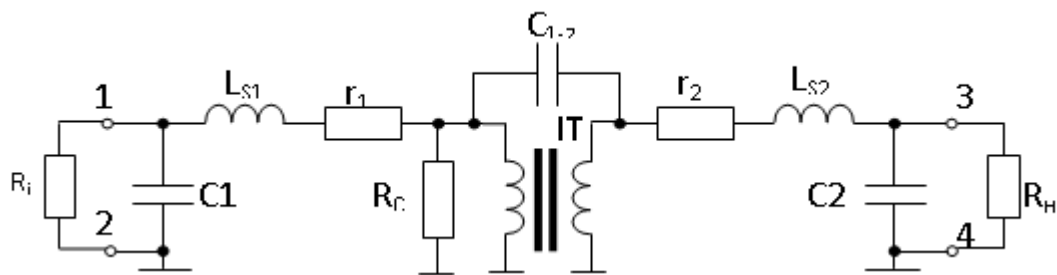


Рисунок 5.3 - Еквівалентна схема трансформатору.

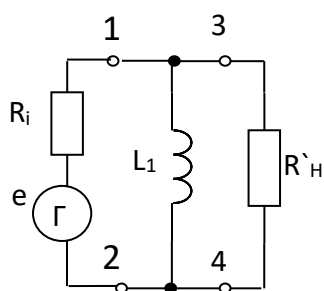


Рисунок 5.4 - На НЧ

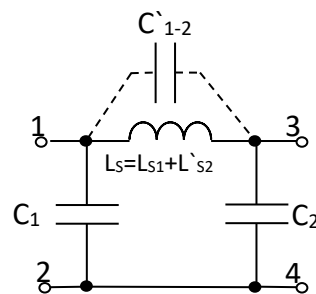


Рисунок 5.5 - На ВЧ

При аналізі АЧХ та визначенні робочої смуги частот трансформатора втратами в r_1 , r_2 та R_c звичайно зневажають і схему рис.5.3 спрощують для НЧ області до виду рис. 5.4, а для області ВЧ – до виду рис 5.5.

Розрахунок будемо проводити згідно [1].

$$f_c = (f_B \cdot f_H) / 2 = 97,75 \text{ МГц,}$$

$$\text{де: } f_H = 87.5 \text{ МГц, } f_B = 108 \text{ МГц.}$$

Вхідний опір транзистора визначаємо за довідниковими даними. Для транзистора у довіднику $Z_{ВХ} = 1,8 - j \cdot 2,5 \text{ Ом}$.

Таким чином, на середній частоті активна складова вхідного опору одного затвору складає 1,8 Ом.

Вихідні дані до розрахунку:

Потужність передана до навантаження $P_H = 9.78 \text{ Вт}$;

$R_{ВІХ} = 1.8 \text{ Ом}$; $R_{ВХ} = 50 \text{ Ом}$; $M_{н.доп} = 3 \text{ дБ}$; $M_{в.доп} = 3 \text{ дБ}$ – допустимі спотворення,

$\eta_{тр} = 0.95$; $K_{бв} \leq 1$.

1. Коефіцієнт трансформації на середніх частотах:

$$n = \sqrt{\frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}} \eta_{\text{мп}} = \sqrt{\frac{1.8}{50}} \cdot 0.95 = 0.185$$

2. Індуктивність первинної обмотки трансформатора:

$$L_1 \geq \frac{R_i \cdot R'_H}{R_i + R'_H} \cdot \frac{1}{\omega_H \sqrt{M_H^2 - 1}}$$

де $R'_H = R_H / n^2$ – приведений до входу опір навантаження:

$$R'_H = \frac{1.8}{0.185^2} = 52.593 \text{ Ом}$$

R_i – опір джерела (генератора), живлячого трансформатор.

При $|M_H| \leq 3\text{дБ}$ можна користуватися співвідношенням:

$$L_1 \geq (2...4) \frac{R'_H}{\omega_H} \quad L_1 \geq (2...4) \frac{52,593}{2\pi \cdot 87,5} \quad L_1 \geq 0.287 \text{ мкГн}$$

3. Індуктивність розсіювання визначається при $|M_B| \leq 3\text{дБ}$

$$L_S \leq 1.2 \frac{R_{\text{вх}}}{\omega_6} \quad L_S \leq 1.2 \frac{50}{2\pi \cdot 108} \quad L_S \leq 88.5 \text{ нГн.}$$

4. Власні ємності обмоток:

$$C_1 \approx C_2 \leq \frac{1.2}{\omega_B \cdot R_{BX}} = \frac{1.2}{2\pi \cdot 108 \cdot 50} = 35n\Phi \quad \text{де } R_{BX} \approx R'_H ;$$

5. При $K_{бв} < 1$ опір навантаження приймає екстремальні значення:

$$R_{H.МИН} = R_{H0} K_{бв}; R_{H.МАКС} = R_{H0} / K_{бв}.$$

І відповідно напруги $U_{вх}$ та $U_{вих}$, а також струми $I_{вх}$ та $I_{вих}$ можуть змінюватись в стільки ж разів, що змушує перетин проводу обмоток та перетин феритового сердечника вибирати з запасом по максимально можливим струмам та напругам. Реалізація ШСТ не викликає труднощів, якщо значення коефіцієнта розсіяння:

$$\sigma = \frac{L_S}{L_1} \geq 3...5\%$$

$$\sigma = \frac{88.5 \cdot 10^{-9}}{0.287 \cdot 10^{-6}} = 0.308$$

6. Із таблиці 3.2 в [1] обираємо ферит 90 ВЧ для даного діапазону та потужності. Із таблиці 3.3 [1] для даного фериту знайдемо B_{\sim} в залежності від середньої робочої частоти $B_{\sim} = 30$ Гс.

7. Число витків первинної обмотки трансформатора:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi D_{CP} L_1}{1.25 \cdot \mu S} \cdot 10^8},$$

де $D_{\text{CP}} = D + d/2$ – середній діаметр вибраних торов, см; μ – відносна магнітна проникність ферита; S – необхідний переріз феритового осердя.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi \cdot 3 \cdot 0.287 \cdot 10^{-6}}{1.25 \cdot 90 \cdot 0.2}} \cdot 10^8 = 3.764$$

8. Число витків вторинної обмотки трансформатора:

$$\omega_2 = n \cdot \omega_1 = 0.185 \cdot 3.764 = 0.696$$

ω_1 та ω_2 слід округлити до найближчого цілого числа, тому:

$$\omega_1 = 4,$$

$$\omega_2 = 1.$$

6 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРИСТРОЮ

6.1. Розрахунок теплового режиму.

Проблема відведення теплової енергії є однією з основних при створенні сучасної потужної високочастотної РЕА. Щільність теплового потоку (теплові втрати на одиницю поверхні) в РЕА досягають сотен (тисяч) Вт/см² та часто обмежують можливість зменшення габаритів.

Для попереднього вибору системи охолодження скористаємося графіком наведеними в [2], за рисунком 7.4 визначаємо, що для потужності розсіювання 1509,44 Вт (знайдена в 6 розділі), доцільно використовувати сукупність природного та примусового охолодження.

Розрахуємо припустиму температуру та геометричні розміри радіатора підсилувального вузла 1000 Вт. Цей вузол складається з чотирьох підсилувальних модулів 350 Вт. Усі ці модулі доцільно розмістити на одному радіаторі.

Згідно [3], максимальна температура переходу транзистора розраховується за формулою:

$$t_{П.МАХ} = t_{С.МАХ} + P_{РОЗС} \cdot (R_{П.С.} + R_{Р.С.}),$$

де

$t_{С.МАХ}$ – максимальна температура середовища;

$P_{РОЗС}$ – потужність, що розсіюється транзистором;

$R_{П.С.}$ – тепловий опір перехід-середовище;

$R_{Р.С.}$ – тепловий опір радіатор-середовище.

Враховуючи те, що температура середовища для транзистора фактично дорівнює температурі радіатора, за максимальну температуру середовища можна прийняти температуру радіатора.

Розсіювана потужність була знайдена у розділі 5, і дорівнює 377,36 Вт.

Тепловий опір перехід-середовище (радіатор) знаходимо з паспортних даних транзистора SD2942 – 0.3 °C/Вт. Тепловим опором радіатор-середовище задамося у розмірі 0.1 °C/Вт.

Тоді, знаючи максимальну припустиму температуру переходу транзистора (згідно документації 200 °C), можна визначити максимальну припустиму температуру радіатору:

$$t_{P.MAX} = t_{П.MAX} - P_{PO3C} \cdot (R_{П.C.} + R_T) = 200 - 377,36 \cdot (0,3 + 0,1) = 49,05 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приймаємо максимальну температуру радіатору рівною 50 °C.

Даний підсилювач проектується для встановлення у 19 - дюймові стійки. Тому розміри радіатору залежать від габаритних розмірів вузла підсилювання, що придатний до встановлення для у цій же стійці.

Виходячи з розмірів підсилювального блоку, що встановлюється, можна визначити ширину радіатору – 320 мм. Задаючись довжиною радіатора $l_P = 450$ мм та його висотою $h=41$ мм з конструктивних міркувань, отримуємо його площу:

$$S_p = 32 \cdot 45 = 1440 \text{ см}^2.$$

Визначимо кількість пластин радіатора:

$$n = \frac{b}{t_{П} + t_{ПР}},$$

де

b – ширина радіатора (320 мм);

$t_{П}$ – товщина пластини;

$t_{ПР}$ – ширина проміжку між пластинами.

Приймаючи з конструктивних міркувань $t_{\text{П}} = t_{\text{ПР}} = 5$ мм, отримаємо

$$n = \frac{320}{5+5} = 32.$$

Визначимо повну площу радіатора:

$$S = 2 \cdot S_p + n \cdot S_{\text{ПЛ}} + 2 \cdot b \cdot h,$$

де

S_p – площа радіатора;

n - кількість пластин радіатора;

b – ширина радіатора (320 мм);

h - висоту радіатора.

$S_{\text{ПЛ}}$ – площа однієї пластини:

$$S_{\text{ПЛ}} = 2 \cdot l_p \cdot h = 2 \cdot 45 \cdot 4,1 = 369 \text{ см}^2.$$

де

l_p – довжина радіатора.

Тоді отримуємо $S = 5129 \text{ см}^2$.

2. Визначимо питомий тепловий потік:

$$q = \frac{P}{S},$$

де

P – розсіювана на радіаторі потужність, S – площа радіатору.

Оскільки на радіаторі знаходяться чотири модулі підсилювання, загальна потужність розсіювання вузла буде являтися сумою потужностей розсіювання кожного з модулів. Тоді $P_p = 4 \cdot 377,36 = 1509,44$ Вт, $q = 0.037$ Вт/см².

За графіком, наведеним у [3], визначимо стаціонарне перевищення температури радіатора температури навколишнього середовища при природному охолодженні. Для $q = 0.04$ воно складає 60 °С.

Визначимо температуру радіатора.

Згідно ТЗ, максимальна температура навколишнього середовища становить 40 °С, тоді температура корпусу складе $40 + 60 = 100$ °С.

Згідно умов експлуатації активного елемента допустима максимальна робоча температура корпусу складає 85 °С, таким чином розрахункова температура перевищує допустиму, що призводить до перегріву транзистора та передчасного виходу його з ладу – таким чином робимо висновок, що необхідне примусове охолодження.

Визначимо максимальне перевищення температури:

$$\Delta t = t_{P.MAX} - t_{C.MAX} = 100 - 85 = 15 \text{ °С.}$$

Виходячи з графіку, наведеному в [3], наявне перевищення температури у 15 °С можна скомпенсувати, якщо застосувати примусове повітряне охолодження зі швидкістю потоку 3 м/с.

Визначимо необхідну продуктивність вентилятору: наприклад, візьмемо вентилятори PAPST серії 4656. Згідно каталогу продукції даного виробника, діаметр ротору такого вентилятору $d = 120$ мм. Тоді площа ротору:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} = 0.011 \text{ м}^2.$$

При швидкості потоку $v = 3$ м/с продуктивність у м³/год складе:

$$V = S \cdot v \cdot 3600 = 122 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

З [7] вибираємо вентилятор, здатний забезпечити таку продуктивність – ЕВМ - PAPST N 4656. Він має продуктивність 125 м³/год та напругу живлення 50 В, яка дорівнює напрузі живлення підсилювальних модулів, а отже не потрібно додаткових джерел живлення.

Для розрахунку кількості вентиляторів скористаємось графіками фірми "PAPST", наведеними у [7].

Для потужності розсіювання 1509,44 Вт та перевищення температури 15 °С визначаємо необхідну продуктивність вентиляторів $V_{\Sigma} = 360$ м³/год. Тоді кількість вентиляторів PAPST:

$$n_B = \frac{V_{\Sigma}}{V} = 2.88.$$

Отже, достатньо трьох вентиляторів.

Вентилятори рівномірно розмістимо на торці радіатора, та закріпимо їх на задній панелі підсилювача для його ефективного охолодження.

6.2. Розрахунок надійності за раптовими експлуатаційними відмовами.

До РЕВ відносяться відмови апаратури на робочій ділянці її експлуатації, коли період приробки вже завершений, а період зношення та природного старіння ще не наступив. Раптові експлуатаційні відмови зумовлені виключно випадковими чинниками, такими як: приховані внутрішні дефекти, які не можуть бути виявлені встановленою системою технічного контролю; малоймовірні, і тому не передбачені схемою і конструкцією, відхилення режимів роботи; поєднання параметрів,

концентрації зовнішніх та внутрішніх навантажень, помилки операторів в період експлуатації тощо.

Розрахунок ведеться згідно методики, наведеної в [2]. Початковими даними є схема електрична принципова з переліком елементів.

При визначенні надійності системи через відомі показники надійності її елементів вводять два припущення:

- відмови елементів системи статично не залежні;
- відмова будь-якого елемента приводить до відмови всієї системи, за аналогією з електричними ланками таку систему в теорії надійності називають послідовною.

Прийняті припущення дозволяють використовувати теорему множення ймовірностей, яка після групування рівнонадійних елементів виглядає таким чином:

Розбиваємо елементи на рівнонадійні групи.

Розрахунок значень надійності для всіх рівнонадійних груп, що входять до складу даного виробу наведений в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Розрахунок значень надійності рівнонадійних груп ЕРЕ

№ п/п	Тип елемента	λ_{oi} *10-6, 1/ч	Кн	ai	Кількість, N	$\lambda_{oi} * N * ai^*$ 10-6,1/ч
1	Резистор SMD	0.05	0.4	0,67	126	4.221
2	Терморезистор	0.2	0.4	0.67	1	0.134
3	Конденсатор електроліт.	0.1	0.5	2.1	16	3.36
4	Конденсатор керамічний	0.05	0.5	0.75	9	0.3375

Продовження таблиці 6.1

5	Конденсатор SMD	0.05	0.5	0.75	85	3.1875
6	Транзистор	0.5	0.7	0.4	16	3.2
7	Навантаження	0.1	0.5	0.82	2	0.164
8	Мікросхема	0.3	0.5	0.5	18	2.7
9	Світлодіод	0.05	0.5	1.16	4	0.232
10	Котушка	0.1	0.7	2.5	12	0.5
11	Резистор	0.2	0.5	0.82	12	1.968
12	Запобіжник	0.4	0.5	1	2	0.8
13	Стабілітрон	0.3	0.6	1.22	1	0.366
14	Кнопка	0.1	0.5	1	8	0.2
15	Дисплей	0.4	-	-	1	0.4
16	Роз'єм	0.15	0.4	1	17	2.55
17	Діод	0.15	0.6	1.22	10	0.366
18	Вимикач	0.5	-	-	1	0.5
19	Вентилятор	8	-	-	3	24
20	Роз'єм	0.2	-	-	31	6.2
21	Блок живлення	10	-	-	5	50
22	Плата друк.	0.1	-	-	11	1.1
23	Пайка з'єднув.	0.001	-	-	5000	5
24	Пров. з'єдн.	0.01	-	-	20	0.01
25	Електродвигун	9	-	-	3	18
	Всього підсилювач					126,1625

В табл. 6.1. використані наступні позначення:

λ_{0i} - інтенсивність відмов елементів i - ої рівнонадійної групи в номінальному режимі роботи;

K_n – коефіцієнт навантаження, взяті рекомендовані для розрахунку згідно [2];

α_i – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив температури навколишнього середовища та електричного навантаження елемента згідно [2] при температурі $t = 40^\circ\text{C}$.

Інтенсивність потоку відмов всього блоку визначається по формулі :

$$\lambda_0 = K_\lambda \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot \lambda_i$$

де K_λ - поправочний коефіцієнт, що враховує умови експлуатації:

$$K_\lambda = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$$

де α_1 - коефіцієнт, що враховує вплив механічних факторів (вібрації, ударні навантаження), для стаціонарних умов експлуатації згідно [2] $\alpha_1=1,07$;

α_2 - коефіцієнт, що враховує вплив кліматичних факторів (температура, вологість), для даного мікроклімату згідно [2] $\alpha_2=1$;

α_3 - коефіцієнт, що враховує умови роботи при пониженому атмосферному тиску, згідно [2] $\alpha_3=1$;

$$K_\lambda = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = 1,07$$

Інтенсивність потоку відмов всього блоку складе:

$$\lambda_0 = K_\lambda \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot \lambda_i = 1.07 \cdot 126.1625 \cdot 10^{-6} = 134,994 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$$

Тоді, середнє напрацювання на відмову визначаємо за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{132,29 \cdot 10^{-6}} = 7559 \text{ год}$$

Отже, середнє напрацювання на відмову задовольняє умови ТЗ: напрацювання на відмову не менше 3000 годин.

Отримані результати задовольняють вимогам технічного завдання, висунутим по надійності виробу.

7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ

Підсилювач з вихідною потужністю 1 кВт призначений для підсилення сигналів у складі радіомовних передавачів, що здійснюють монофонічне та стереофонічне радіомовлення у діапазоні FM (87 – 108 МГц) в РТПЦ, або використовується як попередній підсилювач в складі підсилювачів більшої потужності.

На сьогоднішній день ринок передавальної апаратури України в основному представлений українськими, російськими, італійськими та інш фірмами. Через застосування дорогих покупних модулів передавачі італійського виробництва мають найвищу вартість на ринку. Підсилювачі українського виробництва можуть мати меншу вартість при застосуванні вітчизняної елементної бази, імпульсних джерел живлення, що покращує їхню експлуатаційну надійність і ККД. Тому підсилювач, що розробляється з використанням сучасних схемо-конструкторських рішень може бути використаний для заміни парку старих лампових підсилювачів або ж в складі більшої потужності, для створення регіонального радіомовлення мовлення в районних центрах України, а також для продажу країн СНД.

Розробка підсилювача в даному дипломному проекті, ґрунтується на основі вже існуючих розробок.

Серед аналогів можна виділити: VL1-1000 - «СТЕ Digital Broadcast» та Mirage 1000s - «AT Communication». Дані підсилювачі призначені для підсилення радіомовних сигналів в FM діапазоні. Характеристики та параметри яких наведені в таб.7.1.

Витрати на придбання основних матеріалів визначаються виходячи з технічних норм витрат і відпускної ціни на одиницю матеріалу з урахуванням транспортно-заготівельних витрат. Ціни, зазначені в таблиці – договірні. Розрахунок вартості матеріалів занесені до таблиці 7.6.

Таблиця 7.1 - Ціни матеріалів

№ п/п	Найменування матеріалу	Стандарт чи марка	Одиниця вимір.	Норма витрати	Ціна за Одиницю Грн.	Сума Грн.
1.	Склотекстоліт	СФ-1-50-1.5 ГОСТ15831-79	Дм ²	20	0,17	3,4
2.	Лист FR-4-0.05	DIN EN60249-2	м2	1	232.4	232.4
3.	Провід	МГШВ - 1.5	м	7	1,4	9.8
4.	Провід	МГШВ - 1	м		0,9	9
5.	Провід	МГШВ - 0,35	м		0,3	1.8
6.	Кабель	RG393	м		18	9
7.	Кабель	RG316	м		15.5	23.25
8.	Кабель	RG58	м		3.85	1.15
9.	Кабель стрічковий	RC 10x0,2	м		2.5	5
10.	Кабель стрічковий	RC 16x0,2	м		4.2	21
11.	Трубка термоусад.	3,0	м		1.27	1.27
12.	Трубка термоусад.	6,0	м		2.23	2.23
13.	Трубка термоусад.	4,0	м		1.7	1.7
14.	Припой	ПОС-61 ГОСТ 21931-76	кг		6	2.4
15.	Флюс	ФС-1	л		15	1.5

Продовження таблиці 7.1

16.	Розчин етилового спирту		л		6	1.2
17.	Залізо цинкове	Ст3-1,5	кг		5	26
18.	Алюміній	АМГ-3	кг		8	3.2
Разом:						359.23
Невраховані матеріали (10%)						35.92 грн.
Транспортно-заготівельні витрати (5%)						17.96 грн.
Всього:						413.11 грн.

Таблиця 7.2 - Куповані вироби і напівфабрикати

Найменування	Марка	Кількість	Ціна .гр	Сума .гр.
1	2	3	4	5
Резистори				
3.3 кОм +/-5% SMD	1206	4	0.01	0.04
6.8 кОм +/-5% SMD	1206	4	0.01	0.04
0.5 Вт 10 Ом +/-5%	MF-50	4	0,3	1.2
33 кОм +/-5% SMD	1206	4	0.25	1
PVG5A 100кОм +/- 10%	Murata	4	16.92	67.68

Продовження таблиці 7.2

100 кОм +/-5% SMD	1206	4	0,25	1
SR5 5L000F 0.005 Ом	VISHAY	1	1	1
1 кОм 1/10W +/-1% SMD	0805	2	0.75	1.5
10 кОм 1/10W +/-1% SMD	1206	2	0.80	1.6
330 Ом 1/10W +/-5% SMD	0805	2	0,25	0.5
10 кОм 1/10W +/-5% SMD	0805	4	0.30	1.2
100 кОм 1/10W +/-5% SMD	0805	3	0.30	0.9
75 Ом +/-5% SMD	1206	4	0,02	0.08
120 Ом +/-5% SMD	2010	2	2	4
Найменування	Марка	Кількість	Ціна .гр	Сума .гр.
100 кОм +/-5% терморезистор	VISHAY	4	4	16
Навантаження 50 Ом250 Вт	RF Florida	1	0.5	0.5
Конденсатори				
	Прохідні 1000 пФ	7	0,5	3.5
620 пФ +/-5%	ATC	12	0.5	6

Продовження таблиці 7.2

33 пФ +/-5%	ATC	4	0.3	1.2
68 пФ +/-5%	ATC	4	0.3	1.2
100 пФ +/-5%	ATC	4	0.3	1.2
100нФ +/-10%	Murata	8	0.45	3.6
0.1мкФ +/-10%	Murata	4	0.45	1.8
47 мкФ 1000В	Hitano	4	0.5	2
10 мкФ	ELV-A	1	0.9	0.9
220 мкФ	EXR	3	0.7	2.1
1 мкФ +/-10% X7R 16В SMD	0805	1	0.08	0.08
Мікросхеми				
	CD4051BCM	2	7	14
SOIS Current Monitor	AD8205	1	6.5	6.5
	TL082CM	1	2.5	2.5
DS18S20	TO-92	1	4	4
Індикатор				
	DMC16230	1	5.5	5.5
Транзистори				
SD2942	STM	4	1462.32	5849.28
BC817	SOT-23	1	2.5	2.5
BC846	SOT-23	1	3	3
Діоди				
	LL4148	5	0.2	1
	HSMS-2850	2	0.5	1
Реле				

Продовження таблиці 7.2

Сиг.реле 12 В	FTR-K1SK012B	1	30	30
З'єднувачі				
	N (фланець) під кабель RG58	1	2.5	2.5
	7/16 DIN	1	5.5	5.5
	R114183000	6	2.5	15
	SMB(f) під кабель RG174	5	2,5	12.5
	SMA(f), панельний	1	1.5	1.5
	N(f) під кабель RG316	1	4.5	4.5
	N(f) під кабель RG58	1	3.5	2.5
	IDC-10	3	6	18
	IDC-16	2	8	16
	DI-9F	3	4	12
	N(f) під кабель RG213	1	2.5	2.5
Комплектуючі				
Дисплейний модуль		1	60	60
Модуль живлення	NET- 50A MeanWell	1	45	45
Джерело живлення	IPS-50V/13A FS	4	350	1400
Запобіжник	H520-10A-250B	2	5	10

Продовження таблиці 7.2

Вентилятор, включаючи захисну сітку	ЕВМ-РАРST4656 N 50Гц 220В	3	160	480
Гвинти ГОСТ 17473-80				
	2М3-6g*5.36.096	4	0.1	0.4
	2М3-6g*8.36.096	72	0.1	0.72
	2М3-6g*10.36.096	77	0.15	11.55
	2М3-6g*12.36.096	14	0.1	0.14
	2М3-6g*25.36.096	1	0.2	0.2
	2М3-6g*6.36.096	4	0.1	0.4
	2М3-6g*16.36.096	122	0.15	18.3
Шайби ГОСТ 6402-70				
	2,5.65Г.093	2	0.05	0.1
	3.65Г.096	44	0.1	4.4
Шайби ГОСТ 11371-678				
	A3.04.096	24	0.05	1.2
	A4.04.096	8	0.1	0.8
Разом				8166.21 грн
Технологічні затрати 5%				408.31 грн
Транспортно-заготівельні роботи 5%				408.31 грн
Всього				8982.83 грн

Припустимо, що витрати на виробництво однієї одиниці продукції складатимуть приблизно 3000 грн. и що договірна ціна складатиме 20000 грн. Таким чином, зважаючи на приведені вище розрахунки як з технічних вимог так і з економічної сторони, можна говорити про те, що виготовлення даного приладу доцільне. На ринку ціни на схожі за характеристиками підсилювачі починаються від 27000 грн. При цьому можливе отримання високого рівня прибутків на протязі визначеного терміну, при умові дотримання достатніх обсягів виробництва та ціни виробу. Покращення технічних показників, призведе до підвищення конкурентоздатності.

ВИСНОВОК

В даному дипломному проекті проведено розробку підсилювача потужністю 1 кВт метрового діапазону. Блок може використовуватись як у вигляді окремого вихідного підсилювача, так і у складі передавачів більшої потужності.

В процесі розробки конструкторської документації було вибрано оптимальний варіант конструктивного виконання. Також був проведений аналіз та вибір елементної бази та матеріалів, що входять до складу виробу. Проведенні розрахунки, що підтверджують працездатність приладу при заданих умовах експлуатації.

При проведенні економічного розрахунку була визначена собівартість розробленого приладу, а також була проведена оцінка конкурентоспроможності. На основі даних, одержаних в процесі виконання даного дипломного проекту, можна зробити висновки, що конструкція підсилювача потужності, повністю задовольняє вимоги технічного завдання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Уткин, Г.М. Проектирование радиопередающих устройств / Г. М. Уткин. М.: "Советское радио" 1979-320 с.
2. Белинский, В.Т. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА / В.Т. Белинский, В.П. Гондюл, А.Б. Грозин, К.Б. Круковский-Синевиц, Ю.Л. Мазор.-К.: "Вища школа", 1992.-493 с.
3. Скрипников, Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов / Ю.Ф. Скрипников - М., "Энергия" 1973.-48 с.
4. Каганов, В.И. Радиопередающие устройства / В.И. Каганов. – М.: "Академия", 2002. -288с.
5. Варламова, Р.Г. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. - М.: "Сов.радио",1980.-480с.
6. Белинский, В.Т. Справочное пособие по ВЧ схемотехнике / В.Т. Белинский, Э.Ред.-К.: "Мир", 1990.-254 с.
7. Каталог вентиляторів фірми PAPST.
8. Уткин, Г.М. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ / Г. М. Уткин. .- М.: "Советское радио" 1979.-180 с.
9. Матей, Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д. Л. Матей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс, М.: "Связь" 1972. т. 1
10. ГОСТ 12.2.007.0-75 - Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.
11. ГОСТ 12.1.006-84 - Электромагнитные поля радиочастотные. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
12. ГОСТ 15150-69 - Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.