

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих  
засобів і технологій

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **«Розробка і дослідження підсилювача низьких частот  
з примусовим охолодженням»**

ХАІ.502.560м.23О.172.1605013 ПЗ

(№ залікової книжки)

(шифр)

Виконав: студент 2 курсу групи 560м  
Галузь знань 17 «Електроніка та  
телекомунікації»

Спеціальності 172 «Телекомунікації та  
радіоелектроніка»

Освітньої програми: «Радіоелектронні  
комп'ютеризовані засоби»

Склярів І. Ю.

Керівник: Олійник В. М.  
(Прізвище й ініціали)

Рецензент: Невлюдов І. Ш.  
(Прізвище й ініціали)

Харків – 2023

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського**  
**«Харківський авіаційний інститут»**

Факультет Радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій  
(повне найменування)

Кафедра Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій

(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіоелектроніка»

(код та найменування)

Освітня програма «Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**  
**Олена ВИСОЦЬКА**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

« 10 » жовтня 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Склярів Ілля Юрійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Розробка і дослідження підсилювача низьких частот з примусовим охолодженням»

та керівник кваліфікаційної роботи доцент, к.т.н. Олійник В. М.

затверджені наказом Університету № 1873-уч від « 10 » жовтня 2023 року.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: діапазон робочої частоти – 20 Гц – 20 кГц; рівень гармонік – менше 0,1%; потужність: 600 - 1600 Вт; мінімальний рівень опору навантаження - 2 Ом; діапазон робочих температур від +10 °С до +35 °С; система охолодження природна та примусова повітряна; дослідження теплових режимів за допомогою програмних засобів фірми Siemens

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати):

1. Аналітичний огляд та аналіз засобів побудови підсилювачів низьких частот з примусовим охолодженням.

2. Концепція побудови підсилювача. Вибір та розробка моделей.

3. Дослідження теплових режимів пнч та оптимізація компоновальних рішень.

4 Розробка стартап-проекту впровадження дослідження підсилювача низької частоти великої потужності .

5. Перелік графічного матеріалу із значенням креслеників, схем, плакатів:

5.1. Схема електрична принципова підсилювача низьких частот на 1000 Вт (плакат, А4).

5.2. Компонувачне рішення модуля потужності підсилювача низьких частот (плакат, А4).

5.3. Плата модуля потужності підсилювача низьких частот (плакат, А4).

5.4. Компоненти системи охолодження – радіатор та кулер (плакат, А4).

5.5. Температурні профілі підсилювача потужності (плакат, А4).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 - 4	доц. Олійник В.М.	10.10.23	25.12.23

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Олійник В. М. « 10 » 01 2024 р.  
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання « 10 » жовтня 2023 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналітичний огляд та аналіз засобів побудови підсилювачів низьких частот з примусовим с	10.10.23 - 31.10.23	
2	Концепція побудови підсилювача. Вибір та розробка моделей	01.11.23 - 19.11.23	
3	Дослідження теплових режимів пнч та оптимізація компонувальних рішень	20.11.23 - 01.12.23	
4	Розробка стартап-проекту впровадження дослідження підсилювача низької частоти великої потужності	02.12.23 - 13.12.23	
5	Оформлення записки та графічних матеріалів	14.12.23 - 24.12.23	
6	Подання матеріалів роботи на перевірку та усунення зауважень	25.12.23 - 26.12.23	
7	Передзахист роботи	24.01.24	
8	Захист роботи	26.01.24	

Здобувач вищої освіти



Скляров І. Ю.

( підпис )

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Олійник В. М.

( підпис )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра : 125 с., 61 рис., 27 табл., 3 додатки, 35 джерел.

ВЕНТИЛЯТОР, КОМПОЗОВАНЕ РІШЕННЯ, ЛАМІНАРНИЙ РЕЖИМ, ПІДСИЛЮВАЧ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ, ПРИМУСОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ, РАДІАТОР, ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ, ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ.

Об'єкт дослідження - тепловий режим потужного підсилювача низьких частот.

Метою роботи є дослідження теплового стану потужного підсилювача низьких частот та пропозиція його найкращого конструювального рішення за критеріями надійності.

Методи дослідження - аналітичний метод, метод комп'ютерного моделювання теплового стану.

В ході дослідження виявлені проблеми, що виникають на ранніх етапах розробки пристрою. Проведено огляд існуючих сучасних пристроїв, їх характеристик та особливостей побудови. Розглянуті найкращі схемотехнічні рішення. Оцінені переваги та недоліки розробок. Запропоновані два конкуруючих конструювальних рішення для забезпечення найкращого теплового режиму підсилювача. На підставі типових умов експлуатації подібної апаратури та технічного завдання на дослідження був здійснений аналіз та моделювання теплових полів і повітряних потоків при застосуванні примусового охолодження потужного підсилювача за допомогою прогресивних програмних засобів фірми Siemens Simcenter Flotherm XT, таким чином мінімізуючи зусилля, необхідні для проектування і фізичного створення прототипу.

Дослідницька робота може бути корисною для фахівців, що спеціалізуються у галузі проектування електронних систем помірної та великої потужності зі значним тепловиділенням.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work of the Master: 125 pages, 61 figures, 27 tables, 3 appendices, 35 sources.

COMPONENT SOLUTION, FAN, FORCED COOLING, HEAT CONDUCTIVITY, LAMINAR MODE, LOW FREQUENCY AMPLIFIER, RADIATOR, TEMPERATURE MODE, THERMAL MODEL.

The object of research is the thermal mode of a powerful low-frequency amplifier.

The aim of the work is to study the thermal state of a powerful low-frequency amplifier and propose its best layout solution based on reliability criteria.

Research methods - analytical method, computer modeling method of the thermal state.

In the course of the research, the problems arising at the early stages of device development were identified. An overview of existing modern devices, their characteristics and construction features was conducted. The best circuit solutions are considered. Advantages and disadvantages of developments are evaluated. Two competing composition layout solutions are proposed to ensure the best thermal regime of the amplifier.

On the basis of the typical conditions of such equipment operation and the technical task for the research, the analysis and modeling of thermal fields and air flows during the application of forced cooling of a powerful amplifier were carried out with the help of advanced software tools of Siemens Simcenter Flotherm XT, thus minimizing the efforts required for design and physical creation prototype.

Research work can be useful for specialists specializing in the field of designing electronic systems of moderate and high power with significant heat generation.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ З ПРИМУСОВИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.1 Загальні властивості ПНЧ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2 Класифікація ПНЧ за принципом побудови підсилювальних каскадів .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2.1 Підсилювачі класу А .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2.2 Підсилювачі класу АВ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2.3 Підсилювачі класу Н .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2.4 Підсилювачі класу D .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.2.5 Підсилювачі класу Т .....	23
1.3 Класифікація підсилювачів звуку за сферою використання .....	25
1.4 Класифікація ПНЧ в залежності від підсилювальних елементів .....	31
1.5 Класифікація підсилювачів звуку за кількістю каналів .....	32
1.6 Класифікація підсилювачів залежно від типу охолодження .....	34
1.7 Висновок за розділом .....	39
2 КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧА. ВИБІР ТА РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ .....	40
2.1 Аналіз принципів побудови ПНЧ великої потужності .....	40
2.2 Підсилювач потужності звукової частоти Хамелеон .....	43
2.3 Підсилювач потужності звукової частоти проєкта IRAUDAMP9 .....	50
2.4 Температурна залежність параметрів транзисторів .....	56
2.5 Методи і засоби збільшення надійності ПНЧ .....	62
2.6 Програмне моделювання теплових процесів .....	67
2.6.1 Програмний пакет корпорації SOLIDWORKS .....	68
2.6.2 Програмний пакет фірми Siemens .....	69
2.6.3 Програмний пакет фірми Tera Analysis .....	70
2.6.4 Програмний пакет корпорації ANSYS .....	70
2.6.5 Програмний пакет фірми PTC .....	71
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПНЧ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ .....	72
3.1 Теплофізична модель силових транзисторів вихідного каскада ПНЧ .....	72
3.2 Дослідження температурного стану ПНЧ великої потужності за ознаками різних компонувальних рішень .....	75

3.2.1 Дослідження термопрофілю компонувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 1 .....	78
3.2.2 Дослідження термопрофілю компонувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 2 .....	82
3.2.3 Дослідження термопрофілю компонувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 1 з використанням радіатора профілю АВ2310 .....	86
3.2.4 Дослідження термопрофілю компонувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 1 з використанням радіатора профілю АВ2310 при зміні потужностей транзисторів та вентилятора .....	89
3.3 Висновки та рекомендації щодо результатів програмної симуляції .....	100
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ .....	102
4.1 Опис ідеї стартап-проекту .....	102
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	104
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	105
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	111
4.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту .....	113
4.6 Висновки до четвертого розділу .....	115
ВИСНОВКИ .....	117
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	119
Додаток А (Габарити корпусу стандарта Rack розміром в два юніти) .....	123
Додаток Б (Профіль АВ2310) .....	124
Додаток В (Габарити корпусу ТО-263) .....	125

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

НЧ – низька частота

ПНЧ – підсилювач низької частоти

ПЗЧ – підсилювач звукової частоти

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ОБР – область безпечної роботи транзисторів

LPF – фільтр нижніх частот

КЕ – кінцевий елемент



## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Підсилювач електричних сигналів – пристрій, за допомогою якого здійснюється збільшення напруги, струму або потужності електричних коливань.

Підсилювачі низької частоти (ПНЧ) найбільш широко застосовуються для посилення сигналів, що несуть звукову інформацію, в цих випадках вони називаються також підсилювачами звукової частоти (ПЗЧ).

Крім цього ПНЧ використовуються для посилення інформаційного сигналу в багатьох сферах: вимірювальної техніки і дефектоскопії; автоматики, телемеханіки та аналогової обчислювальної техніки, у інших галузях електроніки. Теплові процеси та система охолодження в підсилювачах мають вирішальне значення для забезпечення їх довгострокового високонадійного використання за відповідним призначенням.

Тому тема роботи, яка спрямована на розробку нового метода дослідження компонувальних рішень ПНЧ великої потужності з примусовим охолодженням, є актуальною науково-технічною задачею.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій.

*Мета і завдання дослідження.* Метою даної роботи є розробка метода дослідження компонувальних рішень підсилювачів низької частоти на підставі комп'ютерної симуляції їх теплових режимів за критерієм максимальної надійності.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішення наступних завдань:

- проведення аналізу схемотехнічних рішень та топології основних елементів тепловивідної системи існуючих ПНЧ великої потужності;

- побудова кількох конкуруючих власних моделей з різною топологією елементів та тепловивідної системи виходячи з сучасних технічних стандартів;
- визначення граничних умов та надійності як критерію успішності власної моделі;
- проведення комп'ютерної симуляції теплових процесів власних моделей програмними засобами;
- детальний розрахунок кращих варіантів власної моделі за критерієм надійності та подальші рекомендації щодо використання підсумків дослідження.

*Об'єктом дослідження* є теплові процеси вихідних каскадів ПНЧ великої потужності.

*Предметом дослідження* є методи та засоби визначення розподілів температури і повітряних потоків тепловивідної системи з примусовим охолодженням.

*Методи дослідження* – аналітичний метод, 3D моделювання, симуляція теплових процесів програмними засобами на основі метода кінцевих елементів.

*Наукова новизна.* Вперше розроблено метод дослідження конкуруючих компонувальних рішень тепловивідних систем з примусовим охолодженням для підсилювачів низької частоти великої потужності на основі програмної симуляції теплових процесів методом кінцевих елементів.

*Практична цінність отриманих результатів* полягає в тому, що впровадження результатів роботи на основі запропонованого універсального метода дослідження, дозволить забезпечити прийняття рішення розробником під час визначення варіантів компонування ПНЧ великої потужності без необхідності практичного макетування, що дозволяє суттєво скоротити матеріальні витрати та час від етапа проектування до виробництва пристрою.

## **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ З ПРИМУСОВИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ**

Залежно від електричної схеми ПНЧ поділяються на підсилювачі напруги (попередні каскади) та потужності (кінцеві каскади). Призначення попередніх каскадів – збільшення амплітуди напруги сигналу до рівня, необхідного для нормальної роботи кінцевого каскаду, часто включає регулятори гучності, тембру або еквайзер, іноді може бути конструктивно виконаний як окремий пристрій. Кінцеві каскади працюють у режимі, у якому створюються потужні коливання звукової частоти, передані в навантаження. Навантаженням можуть бути випромінювачі звуку: акустичні системи (колонки), навушники (головні телефони), радіотрансляційна мережа, модулятор радіопередавача або навіть віброгенератор. Підсилювач низьких частот є невід’ємною частиною всієї звуковідтворювальної, звукозаписувальної та радіотрансляційної апаратури.

Як підсилювальні елементи в низькочастотній апаратурі застосовуються електровакуумні (радіолампи) або напівпровідникові прилади (транзистори).

Основною вимогою, що висувається до ПНЧ, є отримання рівномірного неспотвореного посилення сигналів зі смугою частот, що лежать у межах звукових коливань. Органи слуху людини реагують на звукові коливання частотами від 16 Гц (низький тон) до 15000 – 20 000 Гц (високий тон). Коливання нижче 16 Гц називаються інфразвуковими, а вище 20 000 Гц ультразвуковими. Для більш природного відтворення звуку бажано використовувати весь звуковий діапазон, але це ускладнює пристрій радіоприладів та підвищує їхню вартість.

Властивості підсилювача низьких частот визначаються: вихідною номінальною потужністю, частотною характеристикою, смугою пропускання (діапазоном частот, що підсилюються, в якому коефіцієнт посилення змінюється в заданих межах), чутливістю входів, величиною внесених під час посилення спотворень, рядом динамічних та інших експлуатаційних характеристик.

## 1.1 Загальні властивості ПНЧ

Одним з основних параметрів ПНЧ є номінальна потужність, при якій вхідний сигнал не спотворюється, а точніше – не перевищує заданих норм.

Кожен електронний прилад (мікрофон, підсилювач тощо) у процесі перетворення, посилення і відтворення сигналу вносить свої спотворення. До основних видів спотворень, що виникають при посиленні, належать нелінійні, частотні та фазові.

Нелінійні спотворення – наслідок нелінійності характеристики радіоламп (транзисторів), в результаті якої на виході підсилювача, крім корисного сигналу (основної частоти, підведеної до входу підсилювача), з'являється ряд додаткових частот-гармонік.

Надмірні нелінійні спотворення проявляються при звуковідтворенні у вигляді хрипів та деренчання. В сучасних підсилювачах коефіцієнт нелінійних спотворень не повинен перевищувати кількох відсотків, інакше якість відтворення помітно погіршується.

Інший вид спотворень – частотні, що зумовлені нерівномірністю посилення на різних частотах. Ступінь цих спотворень визначається побудовою частотної характеристики, зі зняттям якої на вхід підсилювача подають напругу однієї певної величини, але різної частоти. Якщо посилення рівномірно всіх частотах, то частотна характеристика на графіці має вигляд прямої горизонтальної лінії.

Нерівномірність частотної характеристики показує, що не всі частоти (звукові коливання) посилюються однаково і підсилювач вносить свої спотворення. Сприймаються частотні спотворення на слух як зміни тембру звучання голосів і музичних інструментів. Якщо частотна характеристика обмежена в області високих частот, то підкреслюються басові ноти, якщо в області низьких – то високі. Іншими словами, різні звуки містять суму складних коливань різної частоти, і якщо вони посилюються нерівномірно, то і прослуховуються неоднаково: одні слабші, інші сильніші, що змінює

забарвлення звуку. Щоб підсилювач не вносив таких спотворень, він має однаково посилювати всі частоти, але здійснити цю вимогу дуже важко.

Однак, з огляду на те, що лінійність частотної характеристики залежить від характеристик окремих елементів схеми, домагаються зменшення частотних спотворень ретельним підбором резисторів, конденсаторів та інших деталей та режимами їх роботи.

Оскільки підсилювач містить деталі, що мають індуктивність (трансформатори, дроселі) і ємність (конденсатори), сигнал на виході підсилювача відрізняється за формою від підведеного до входу. Сигнали різної частоти у процесі посилення піддаються фазовим зсувам. Органами слуху людини фазові спотворення сприймаються як деякі затримки у часі, що призводить до зміни стану звукової картини – розподілу джерел звуків у просторі.

Смугою пропускання називають діапазон частот, у якому посилення змінюється у заданих межах в нормах допусків.

Для боротьби зі спотвореннями різного роду в ПНЧ застосовуються ланцюги зворотного зв'язку, коли деяка частина напруги подається з виходу або проміжного каскаду підсилювача на його вхід. Зворотний зв'язок може бути позитивним, якщо напруга, що підводиться з виходу, збігається по фазі з вхідною або негативним, коли напруга підводиться на вхід у протифазі вхідної напруги. Застосування негативного зворотного зв'язку покращує якісні показники підсилювача – зменшуються нелінійні та частотні спотворення. Однак при цьому з'являється суттєва вада – зменшується коефіцієнт посилення.

## 1.2 Класифікація ПНЧ за принципом побудови підсилювальних каскадів

За способом роботи з вхідним сигналом та принципом побудови підсилювальних каскадів підсилювачі потужності звукової частоти прийнято поділяти на класи:

- аналогові, клас А;
- аналогові, клас В;
- аналогові, клас АВ;
- аналогові, клас G і H;
- імпульсні та цифрові, клас D;
- цифрові, клас T.

Слід зазначити, що є ще безліч класів підсилювачів, як-от С, А+, SuperA, DLD та інших. Деякі з них, такі як С (кут відсічки менше 90 градусів) в ПЗЧ не застосовуються. Інші ж виявилися надто складними та дорогими, тому «зійшли зі сцени» або були витіснені більш перспективними.

Аналогові підсилювачі, власне, відрізняються лише кутом відсічки вхідного сигналу, тобто вибором так званої «робочої точки».

### 1.2.1 Підсилювачі класу А

Підсилювачі класу А працюють без відсічення сигналу на найбільш лінійній ділянці вольтамперної характеристики підсилювальних елементів. Це забезпечує мінімум нелінійних спотворень, причому як на номінальній потужності, так і на малих потужностях. За цей мінімум доводиться розплачуватись значними споживаною потужністю, розмірами та масою. У середньому коефіцієнт корисної дії (ККД) підсилювача класу А становить 15-30%, а споживана потужність майже не залежить від величини вихідної потужності. Потужність розсіювання максимальна навіть за малих сигналів на виході.

Типовим представником підсилювачів класу А є транзисторний підсилювач Perreaux Silhouette SX25 [1]. Зовнішній вигляд показано на рис. 1.1, а основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.1.

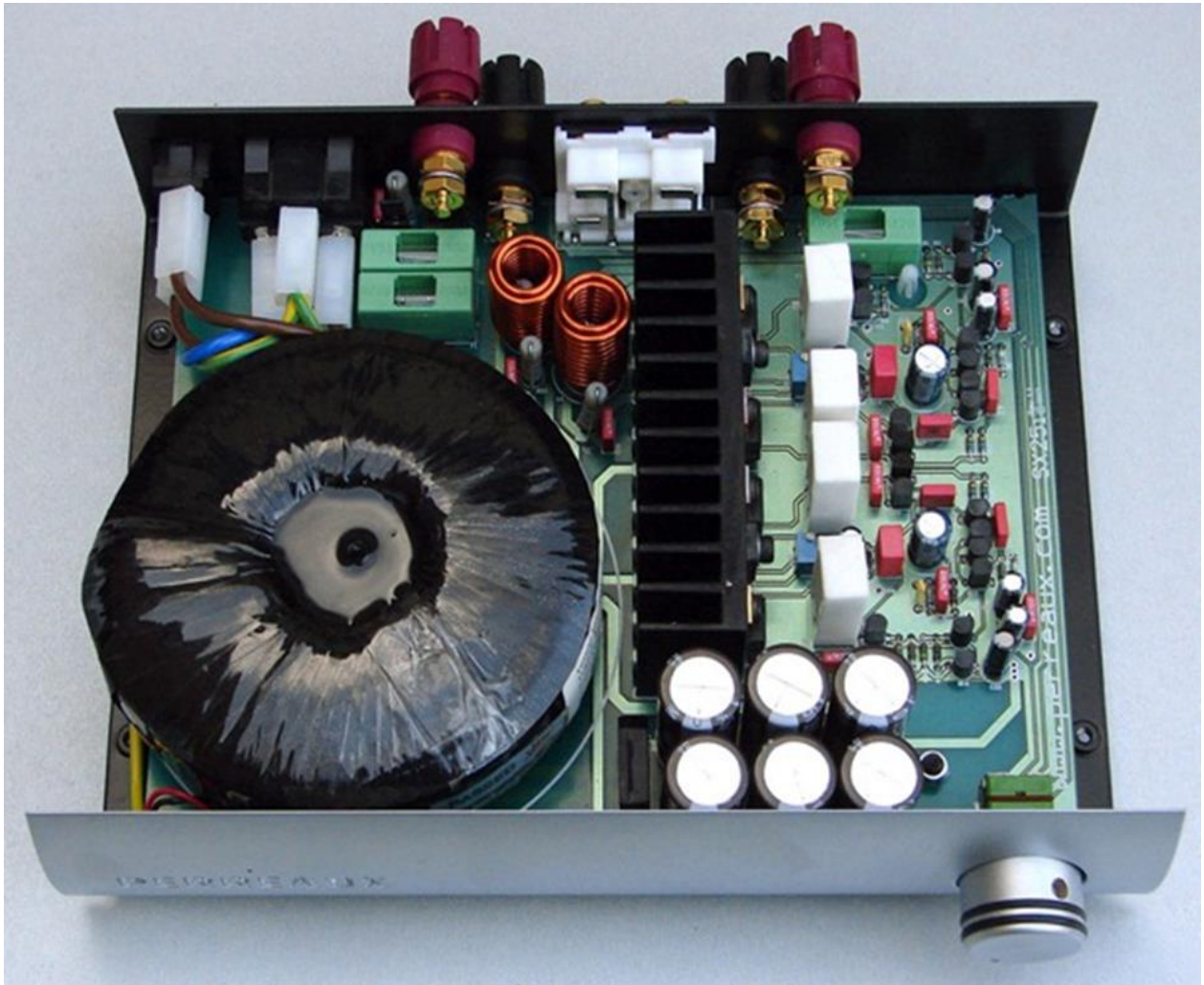


Рисунок 1.1 – Транзисторний підсилювач Perreaux Silhouette SX25

З рисунка 1.1 видно, що основу конструкції займає крупноргабаритний силовий трансформатор тороїдального типу з великою масою. Він зазвичай виділяє значну теплову потужність, яку потрібно відводити. Це особливість підсилювачів такого класу. Увесь монтаж підсилювача виконаний на єдиній друкованій платі.

## 1.2.2 Підсилювачі класу АВ

Як випливає з назви, підсилювачі класу АВ – це спроба поєднати переваги підсилювачів класу А і ефективність роботи підсилювача класу В. Цим намагаються досягнути високого ККД та прийняттого рівня нелінійних спотворень. Щоб позбутися ступінчастого переходу при перемиканні підсилювальних елементів використовується кут відсічки більше 90 градусів, тобто робоча точка вибирається на початку лінійної ділянки вольтамперної характеристики. За рахунок цього при відсутності сигналу на вході підсилювальні силові елементи не вимикаються повністю, і через них протікає деякий струм спокою, іноді значний. Через це зменшується коефіцієнт корисної дії та виникає незначна проблема стабілізації струму спокою, зате суттєво зменшуються нелінійні спотворення. Серед аналогових підсилювачів цей режим роботи зустрічається найчастіше.

Одним з найкращих представників підсилювачів класу АВ є транзисторний апарат Yamaha R-N2000A [2]. Зовнішній вигляд показано на рис. 1.2, а основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.1.

Вихідні каскади підсилювача Yamaha R-N2000A працюють у гібридному режимі А/АВ. Таке технічне рішення забезпечило номінальну потужність 190 Вт на канал при навантаженні 4 Ом, коефіцієнт гармонічних спотворень менше 0,005%, діапазон частот, що відтворюються від 5 до 100000 Гц при нерівномірності АЧХ +/-3 дБ. Природно, досягнення таких характеристик обернулося збільшенням маси до 22 кг та висоти корпусу до 157 мм.

Центральну частину конструкції займає блок живлення з потужним трансформатором та блоком електролітичних ємностей фільтра. По обидва боки симетрично розташовані плати прикінцевих підсилювачів потужності з ребристими радіаторами великої площі й маси, що служать для відводу тепла від вихідних транзисторів. Задню частину констпукції займає процесорний блок обробки звуку.





Рисунок 1.2 – Транзисторний підсилювач Yamaha R-N2000A

### 1.2.3 Підсилювачі класу Н

Цей клас підсилювачів був розроблений спеціально для автомобілів, в яких є обмеження напруги, що живить вихідні каскади. Стимулом до створення підсилювачів класу Н послужило те, що реальний звуковий сигнал має характер близький до імпульсного і його середня потужність набагато нижча від пікової.

В основі схеми лежить звичайний підсилювач класу АВ, включений за мостовою схемою. Родзинка підсилювача це застосування спеціальної схеми подвоєння напруги живлення. Основний елемент схеми подвоєння – накопичувальний конденсатор великої ємності, який постійно заряджається від основного джерела живлення.

На піках потужності цей конденсатор підключається схемою керування послідовно з основним джерелом живлення. Напряга живлення вихідного каскаду підсилювача на частки секунд подвоюється, дозволяючи йому впоратися з передачею піків сигналу. Однак накопичувальний конденсатор повинен бути достатньої ємності, інакше заявлена вихідна потужність забезпечуватиметься лише на середніх та високих частотах.

Підсилювачі, побудовані за подібною схемотехнікою, поєднують у собі дискретні методи посилення з аналоговими і, відповідно, займають проміжне положення між аналоговими та імпульсними підсилювачами за ККД і тепловиділенням.

#### 1.2.4 Підсилювачі класу D

В ПНЧ даного класу вхідний оцифрований сигнал надходить на аудіо процесор, який у свою чергу за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) керує силовими напівпровідниковими ключами. Можна додати, що ШІМ-сигнал можна отримати без аналого-цифрового перетворення за допомогою компаратора і генератора, наприклад, пилоподібного сигналу.

Такий метод у підсилювачах класу D також широко застосовується, але завдяки розвитку цифрової техніки поступово відходить у минуле. Аналого-цифрове перетворення забезпечує додаткові можливості обробки звуку: від регулювання рівня гучності і тембру до реалізації цифрових ефектів, таких як реверберація, шумозаглушення, придушення акустичного зворотного зв'язку та ін.

На відміну від аналогових підсилювачів, вихідний сигнал підсилювачів класу D є імпульсами прямокутної форми. Їхня амплітуда постійна, а тривалість («ширина») змінюється в залежності від амплітуди аналогового сигналу, що надходить на вхід підсилювача. Частота імпульсів (частота дискретизації) постійна і залежно від вимог, що висуваються до підсилювача, становить від кількох десятків до сотень кілогерц.

Після формування імпульси посилюються кінцевими транзисторами, що працюють у ключовому режимі. Перетворення імпульсного сигналу на аналоговий відбувається у фільтрі низьких частот на виході підсилювача або безпосередньо в навантаженні.

В цілому, принцип роботи підсилювача класу D дуже нагадує принцип роботи імпульсного блоку живлення, але на відміну від нього, на виході, за рахунок широтно-імпульсної модуляції, формується не постійна напруга, а змінна, за формою, що відповідає вхідному сигналу.

Теоретично, ККД подібних підсилювачів повинен досягати 100%, але, на жаль, опір каналу транзистора хоч і маленький, але все ж таки ненульовий. Проте, залежно від опору навантаження, ККД підсилювачів цього типу може досягати 90-95%.

Зрозуміло, за такої ефективності нагрівання вихідних транзисторів практично відсутнє, що дозволяє створювати дуже маленькі та економічні підсилювачі. Коефіцієнт гармонійних спотворень при грамотній побудові вихідного фільтра можна довести до 0,01%, що є чудовим результатом.

Найчастіше зараз підсилювачі класу D, як і класу AB, випускаються в інтегральному виконанні.

У класі D, наприклад, працюють видатні підсилювачі Legacy i·V4 Ultra [3]. Зовнішній вигляд підсилювача та його компоновка показані на рис. 1.3, а основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.1.

Підсилювальні модулі ICEdge, встановлені в підсилювачах Legacy i·V4 Ultra, мають спеціальну схемотехніку, що забезпечує характер звучання, близький до аналогового. У той самий час потужність кожного модуля, за його порівняно компактних розмірах, становить до 1000 Вт на навантаженні 4 Ом – величина, практично недосяжна для підсилювачів, побудованих за традиційними лінійними схемами.



Рисунок 1.3 – Підсилювач Legacy i·V4 Ultra

Для того, щоб забезпечити підсилювачі Legacy i·V4 Ultra достатньою кількістю енергії за такої вихідної потужності, вони оснащені ефективними імпульсними блоками живлення.

В результаті ККД біля 90% модель Legacy i·V4 Ultra навіть у 8-канальній конфігурації має порівняно компактні розміри і практично не нагрівається під



час роботи, що спрощує її розміщення в кімнаті. В підсилювачах використовується швидкодіюча система захисту, що є зовсім не зайвим за такої вихідної потужності, яка спрацьовує при короткому замиканні в навантаженні та у разі інших нештатних ситуацій.

Ще один підсилювач класу D – Yamaha T4n [4]. Зовнішній вигляд підсилювача та його компоновка показані на рис. 1.4, а основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.1.



с

Рисунок 1.4 – Підсилювач Yamaha T4n (професійне використання)

Таблиця 1.1 – Параметри підсилювачів низької частоти

N	Параметри	1 група (малої потужності) До 100 Вт	2 група (середньої потужності) До 300 Вт	3 група (великої потужності) До 1000 Вт	4 група (надвеликої потужності) понад 1000 Вт
	Кращі моделі групи	Perreaux Silhouette SX25	Yamaha R-N2000A	Legacy i-V4 Ultra	Yamaha T4n
1	Вихідна потужність	2 x 25 Вт (8 Ом) 2 x 35 Вт (4 Ом)	2 x 120 Вт (8 Ом) 2 x 190 Вт (4 Ом)	4 x 610 Вт (8 Ом) 4 x 1000 Вт (4 Ом)	2 x 1150 Вт (8 Ом) 2 x 2050 Вт (4 Ом) 2 x 2200 Вт (2 Ом)
2	Частотний діапазон	20-20000 Гц (-0,25дБ) 5-60000 Гц (-1 дБ)	5 Гц — 100 кГц (±3 дБ)		20—20000 Гц (половинна потужність)
3	Коефіцієнт гармонійних спотворень	0.002 %	0,005% (лінійний вхід)	Не більше 1% 1.2кВТх4 Ом /1kHz	Не більше 0.1%
4	Відношення сигнал/шум	100 дБ	110 дБ (лінійний вхід)	127 дБ	106 дБ
5	Демпінг-фактор (або коефіцієнт демпфування)		понад 250	понад 750	понад 800
6	Тип охолодження	пасивний радіаторний	пасивний радіаторний	пасивний безрадіаторний	Активне, 2 вентилятори з плавним регулюванням швидкості
7	Підтримка керування	відсутнє	USB (сервісний), 1x RJ45, застосунок MusicCast CONTROLLER для iOS i Android	відсутнє	2x RJ45
8	Габарити (ШxВxГ) мм	216x58x178	435x157x463	445x147x396	480x88x477
9	Вага кг	2.4	22	17.2	14
10	Клас	A	A/AB	Запатентована схема ICEdge класу D	Запатентована схема EEEngine класу D
11	Використання	побутове	побутове	побутове	професійне
12	Ціна, \$	1197	4000	8700	3512

ККД підсилювача Yamaha T4n перевищує 90%, а коефіцієнт гармонічних спотворень для такого класу мінімальний – 0,1%.

Yamaha T4n – це високоякісний підсилювач потужності, виконаний за технологією EEEngine, який відноситься до флагманської серії Tn. Особливість даної моделі полягає в тому, що при дуже скромних габаритах з малою вагою, підсилювач має неймовірно велику потужність при мінімальному енергоспоживанні. Він чудово підходить як для традиційних акустичних систем, так і для лінійних масивів. Більше того, у ньому передбачено декілька ступенів захисту, що робить його практично не вразливим навіть у екстремальних умовах експлуатації з великими навантаженнями. Також, в ньому передбачена активна система охолодження, основою якої є два вентилятори зі змінною швидкістю.

Модель T4n виконана в міцному металевому корпусі і може встановлюватися в рейкову стійку, де займає всього 2 юніти. Передня панель підсилювача має класичний дизайн із двома регуляторами рівня сигналу, світлодіодними індикаторами та транспортувальними ручками для перенесення. На задній панелі розташовані всі необхідні органи комутації. Плюс до всього є два цифрові порти RJ45, за допомогою яких здійснюється віддалене керування та моніторинг робочого стану підсилювача.

### **1.2.5 Підсилювачі класу T**

Цей клас підсилювачів потужності народжений у лабораторіях компанії Tripath Technology [5] і відрізняється притаманною імпульсним підсилювачам високою економічністю у поєднанні з високою якістю звучання.

Зовнішній вигляд силового модуля підсилювача класу T та його компоновка показані на (рис. 1.5). За своїми показниками вони не поступаються кращим зразкам аналогових підсилювачів, рівень спотворень мінімальний, а у спектрі вихідного сигналу практично відсутні вищі гармоніки.

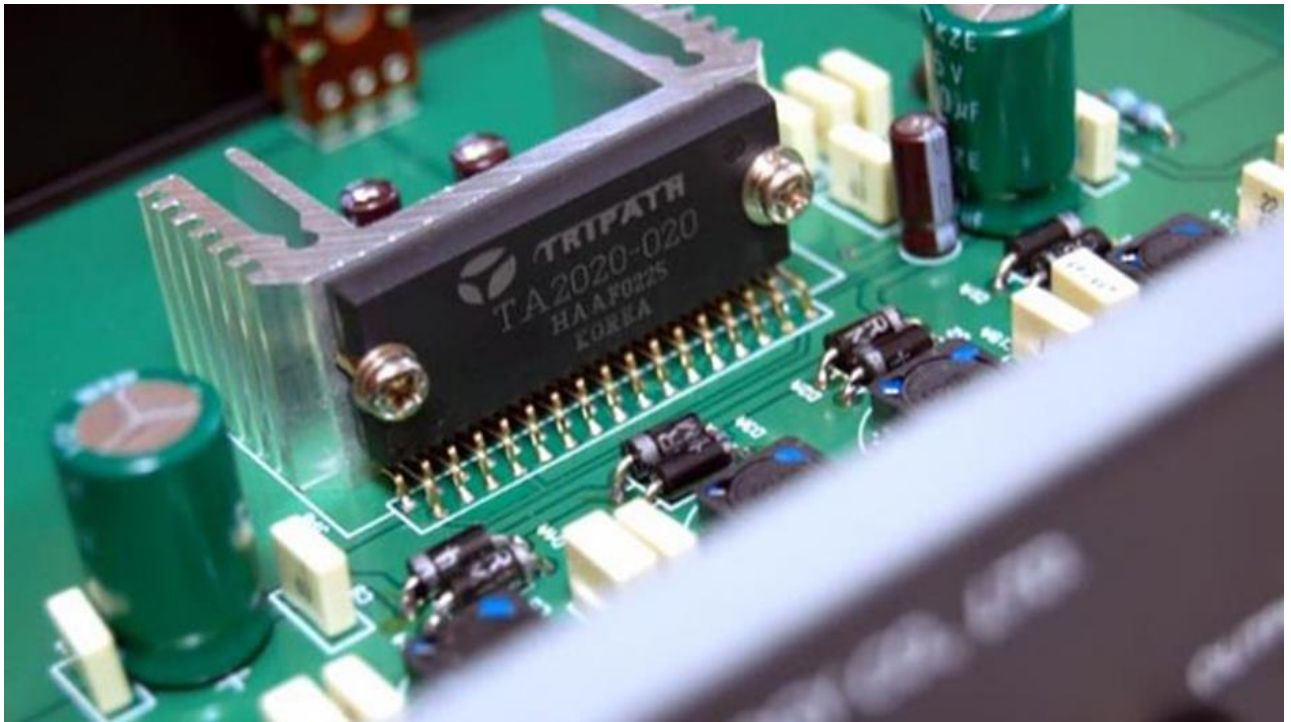


Рисунок 1.5 – Підсилювач класу Т з лабораторії компанії Tripath Technology

Істотна перевага підсилювачів класу Т як перед аналоговими, так і перед традиційними цифровими полягає в низькому рівні інтермодуляційних спотворень, які менші за гармонійні. Для підсилювачів класу АВ, наприклад, коефіцієнт інтермодуляційних спотворень значно перевищує коефіцієнт гармонік, а для підсилювачів класу А ці величини одного порядку.

Усі переваги підсилювачів цього класу є результатом застосування патентованої технології Digital Power Processing™ [6]. По суті все зводиться до двох взаємопов'язаних процесів – «передбачення» (Predictive processing) та «адаптивного перетворення» (Adaptive Signal Conditioning Processing).

Передбачення полягає у відстеженні швидкості зміни сигналу (похідної) та розрахунку цього значення на підставі амплітуди сигналу в наступний момент часу. Частково завдяки цьому динамічний діапазон подібних підсилювачів перевищує 100 дБ.

Амплітуда сигналу та швидкість її зміни служать вихідними даними для реалізації алгоритму «адаптивного перетворення». У підсилювачах класу Т



немає фіксованої частоти дискретизації – вона безперервно змінюється у смузі до 1,5 МГц відповідно до цього алгоритму. Причому збільшення частоти дискретизації істотно покращує якість звучання і дозволяє спростити конструкцію вихідного фільтра.

Підсилювачі класу Т набули поширення у вигляді вбудованих модулів в елементи лінійних масивів акустичних систем. Таке рішення забезпечує дуже високу надійність роботи концертного обладнання, мала вага, простота та швидкість інсталяції.

## **2.4 Класифікація підсилювачів звуку за сферою використання**

За сферою використання підсилювачі поділяються на побутові, професійні, трансляційні і спеціальні (промислові).

До побутових підсилювачів здебільшого пред'являється лише одна вимога – низька ціна при помірних параметрах якості. Враховуючи, що їхня вихідна потужність невелика і виконані вони на основі інтегральних схем, то відмінності між побутовими підсилювачами варто шукати в їх конструкції, а не в схемотехніці вихідних каскадів.

Побутові підсилювачі відрізняються компактним розміром та акцентом на зниження спотворень звуку. В них майже завжди присутній темброблок (еквалайзер) – пристрій, який регулює амплітуду сигналу в певному діапазоні частот.

Більшість автомобільних підсилювачів можна віднести до категорії побутових. Однак, в силу природного обмеження розмірів, напруги живлення та споживаної потужності їх схемотехніка має суттєві відмінності. Типовий вигляд компоновки показаний на рис. 1.6. [7]

Концертні, студійні та інструментальні підсилювачі – основа професійних систем звуковідтворення. До них пред'являються підвищені вимоги до відтворення звукового сигналу (мінімум гармонійних та інтермодуляційних спотворень). До концертних підсилювачів додатково пред'являються завищені

експлуатаційні вимоги – велика потужність, вкрай висока надійність, всепогодне виконання та ін. Часто цифрові концертні підсилювачі поєднані в одному корпусі з акустичними системами, які є частиною лінійного масиву.



Рисунок 1.6 – Автомобільний підсилювач звуку ARC1000 потужністю 1000 Вт

Професійні підсилювачі спрямовані на збільшення потужності звуку зі збереженням високої якості та його передачі на значні відстані. Вони широко використовуються в концертних зали, стадіонах, студіях звукозапису та інших подібних місцях. Зазвичай ці підсилювачі представлені окремими пристроями стандартних розмірів Rack (так зване рекове виконання корпусу). Це дозволяє зручно переносити та кріпити їх на спеціальних телекомунікаційних стійках (рис 1.7). Наприклад, ширина корпусу зазвичай становить 17,75 дюймів (450,85 мм), а висота кратна 1,75 дюйма (44,45 мм). [8]

Студійні пристрої використовуються в студіях звукозапису і при підсиленні звуку надають перевагу якості, а не гучності. У порівнянні з побутовими підсилювачами, студійні пристрої не мають темброблока (для частотної корекції використовуються мікшерні пульти) та мають розширений діапазон відтворення частот.



Рисунок 1.7 – Рекове виконання корпусу підсилювачів

Концертні підсилювачі використовуються для підсилення звуку під час концертів, фестивалів та інших музичних подій, що зрозуміло з їх назви. Основні вимоги до цих пристроїв полягають у надійності та довготривалій роботі при максимальних навантаженнях. Тому в концертних підсилювачах особлива увага приділяється різноманітним видам захисту, таким як захист від перегріву, перенапруги, короткого замикання та впливу навколишнього середовища.

Кількість каналів, що підтримуються підсилювачами звуку, в середньому варіюється від одного до шістнадцяти. Більшість підсилювачів є двоканальними. Це означає, що до них можна підключити до двох динаміків у моно- або стереорежимі. Оптимальна конфігурація підключення: один канал – один динамік.

Інструментальні пристрої призначені для посилення електроінструментів (бас-гітар, синтезаторів, електроскрипок, драм-машин тощо). Іноді інструментальні підсилювачі звуку поставляються в блоковому виконанні (наприклад, разом з підсилювачем, регулятором тембру та динаміками). Вони використовуються не для точного посилення сигналу, а скоріше, для підкреслення певних частот або додавання потрібного тонального забарвлення музичного полотна.

Трансляційні підсилювачі використовуються для передачі потужності на великі відстані та розподілу її на безліч гучномовців. Щоб уникнути суттєвої втрати потужності на акустичному кабелі у таких підсилювачах спеціально, як правило, за допомогою трансформатора, підвищується вихідна напруга. Акустичні системи також оснащуються трансформаторами, але знижуючими. У результаті, у такій системі та ж потужність передається за меншого струму. При цьому потужність, що розсіюється на проводах, зменшується. Системи трансляції призначені для доведення до людей важливої службової чи аварійної інформації, і іноді для створення затишного музичного фону. У зв'язку з цим, особливих вимог до якості трансляційних підсилювачів не пред'являється. Цілком допустимим вважається коефіцієнт гармонічних спотворень до 1-2%.

Підсилювачі класу D використовуються у вібростендах (промислове використання). Використання підсилювачів для вібростендів є ефективним та вигідним рішенням. Високий ККД підсилювачів класу D та малі розміри модулів у даному випадку дозволяють покращити загальні показники системи.

Принцип роботи та влаштування вібростендів для діагностики залежить від їх типу. Але головне їхнє завдання загальне – створювати вібрації різних типів та напрямків, щоб перевірити зносостійкість, стан та надійність продукту.

Електродинамічні вібростенди (рис. 1.8), принцип роботи яких досить простий, є найбільш використовуваними, оскільки вони забезпечують кілька переваг: вони дозволяють виконувати вібрації на високих частотах, а також відтворювати різні типи рухів разом із вібрацією.

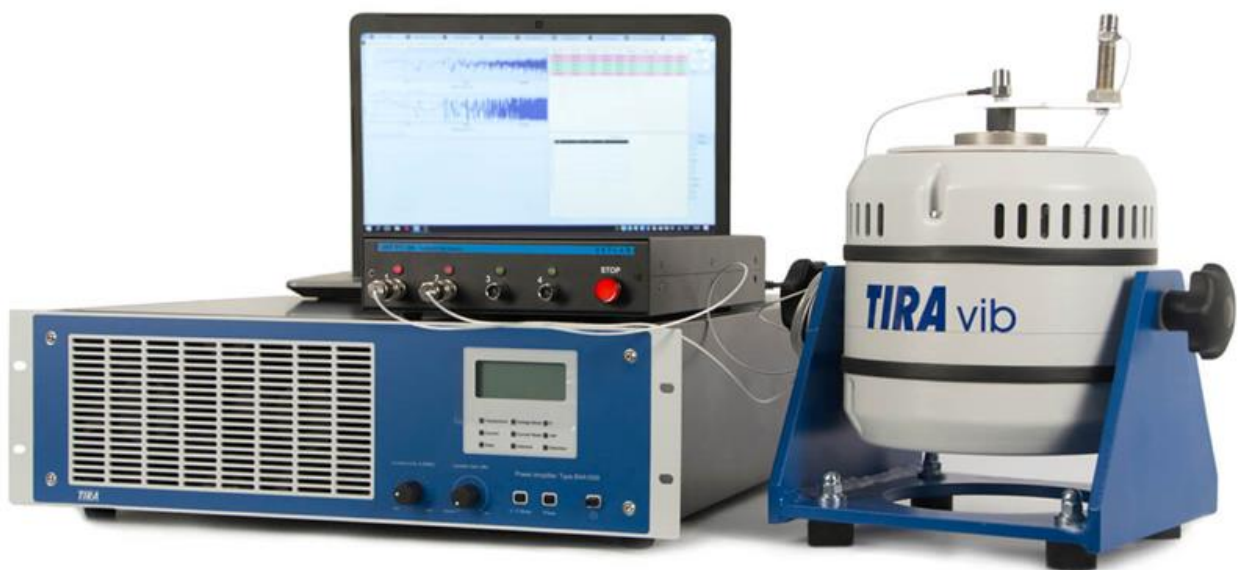


Рисунок 1.8 – Електродинамічна вібраційна система TIRA [9]

Електродинамічна вібраційна система перетворює електричну енергію від підсилювача струму на механічні коливання, використовуючи принципи електромагнетизму.

Віброгенератор складається з електромагніту, рухома частина якого підтримується оптимальними і надійними елементами підвісу.



Працюючи зі спеціальним лінійним та високоточним підсилювачем потужності, вібростенд забезпечує потрібні якісні характеристики.

До промислового використання ПНЧ можна також віднести систему для випробувань турбінних лопаток на втому (рис. 1.9). [10]



Рисунок 1.9 – Система для вібровипробувань турбінних лопаток

В основу роботи системи для випробувань турбінних лопаток на втому закладено принцип утримання резонансної частоти виробу та стеження за її зміною.

Користувач вибирає певну резонансну частоту системи та запускає випробування щодо утримання резонансу. Контроль розмаху переміщень лопатки проводиться лазером. У міру накопичення втомних ушкоджень відбуватиметься зсув резонансної частоти лопатки. Спеціалізоване програмне забезпечення відстежуватиме це зміщення та підлаштовуватиме параметри системи в автоматичному режимі.

## 2.4 Класифікація ПНЧ в залежності від підсилювальних елементів

Залежно від використовуваних активних підсилювальних елементів, підсилювачі потужності звукової частоти поділяються на:

- лампові;
- транзисторні;
- гібридні;
- інтегральні.

Приклад топової моделі лампового стерео підсилювача McIntosh MC240 на лампах 6L6 наведено на рис. 1.10. [11]



Рисунок 1.10 – Ламповий стерео підсилювач McIntosh MC240 на лампах 6L6

Вміст лампових та транзисторних підсилювачів цілком зрозумілий з назви. Щодо гібридних теж можна здогадатися – у підсилювальних каскадах використовується комбінація напівпровідникових елементів та ламп. Інтегральні підсилювачі (як правило, класи АВ, D та Т) виконуються на основі мікросхем.

## 1.5 Класифікація підсилювачів звуку за кількістю каналів

За кількістю незалежних каналів звукопідсилення можна виділити:

- монопідсилювачі (одноканальні);
- стереопідсилювачі (двоканальні);
- підсилювачі систем об'ємного звуку (багатоканальні);
- інтегральні.

Монопідсилювачі (рис 1.11) використовуються в трансляційних системах або, наприклад, багатоканальних системах для відтворення окремих сигналів.



Рисунок 1.11 – Монопідсилювач потужності MSB Technology M205 [12]

Багатоканальна звукова технологія робить доступною реалізацію власного домашнього кінотеатру, дає можливість побудувати на власний розсуд



систему об'ємного високоякісного звуку. Це дозволяє відчувати найтонші деталі звукової картини різних концертних залів під час прослуховування аудіозаписів, виконаних у багатоканальному форматі. Головними труднощами проектування таких систем є складність забезпечення однаково точної локалізації джерел звуку слухачів під час відтворення по відношенню до реального розташування цих джерел звуку при запису. Цей ефект проявляється тим сильніше, чим далі від центру зони прослуховування слухач віддаляється.

Багатоканальні системи використовуються не тільки для реалізації звукових ефектів та розширення стереобазис. Багато театрів та концертних комплексів будувалися без урахування сучасних вимог до архітектурної акустики та мають складну багатоярусну структуру, об'ємом понад 10 кубічних метрів на людину.

Реалізація стереосистеми в таких приміщеннях невігідно приведе до того, що відбиті від ярусних перекриттів, стелі і стін хвилі будуть діяти локально, з'являться ділянки з нерівномірним розподілом звукового поля. Додаткова неприємність полягає в тому, що на різних частотах ця нерівномірність проявляється по різному.

Вирішити подібне завдання здатна лише багатоканальна система. Сигнал за допомогою кросоверів, що входять до складу обладнання професійної системи, поділяється на кілька частотних діапазонів, що окремо посилюються та відтворюються. Домогтися рівного звукового поля в усьому діапазоні відтворюваних частот вдається тільки при використанні безлічі правильно підібраних та розташованих вузькосмугових акустичних систем. Спрямована дія акустичних систем призводить до істотного зменшення реверберації, збільшення звукового тиску та мінімізації фазових спотворень в ділянці приміщення, що озвучується.

Слід зазначити, що помилка в 1 градус при орієнтуванні акустичних систем лінійного масиву (внаслідок низької якості проекту та/або монтажу) може звести нанівець всі переваги багатоканальної системи. Як правило, кожен елемент кластерів, що встановлюються, живиться від власного цифрового підсилювача D

або Т класу, який налаштовується для отримання оптимальних характеристик звукового поля з урахуванням типу застосовуваних динаміків і твітерів, об'єму і матеріалу корпусу. Цифровий підсилювач може містити звуковий процесор, здатний вносити в сигнал частотні та часові попередження.

Багатоканальні системи також можуть використовуватися за необхідності розділити приміщення на кілька незалежних зон, у яких відтворюються різноманітні музичні програми. Цей прийом використовується, наприклад, у розважальних комплексах, що складаються з багатьох залів. Гідність такої системи полягає у можливості централізованого управління.

### **1.5 Класифікація підсилювачів залежно від типу охолодження**

Системи охолодження застосовуються, коли температура елементів перевершує допустимі норми і від елементів схеми потрібно відвести надлишкове тепло. Умовно можна поділити підсилювачі на такі, що використовують пасивне, активне або комбіноване охолодження в залежності наявності рухомих елементів.

До пасивних систем охолодження можна віднести повітряне, рідинне, випарне радіаторне та ін.

Активні системи (примусове охолодження) використовують вентилятори, кулери, компресори, турбіни, помпи та ін.

Повітряне природне охолодження в ПНЧ різного типу пояснюється його простотою та економічністю (див. рис. 1.1 та рис. 1.2). Для інтенсифікації теплообміну перфорується кожух апарату, застосовуються жалюзі, що дозволяє за рахунок природної вентиляції знизити температуру в апараті на 20-30% порівняно з герметичним кожухом.

Рідинні системи охолодження поділяються погружні (рис. 1.12), з примусовою циркуляцією теплоносія, та на термосифонні. Вони можуть бути непрямой та прямої дії, працювати по розімкнутому та замкнутому циклах. Термосифонні системи забезпечують циркуляцію рідини шляхом використання

її різних щільностей на вході та виході з апарату. У таких системах рідина охолоджується в спеціальному резервуарі шляхом випаровування та теплообміну його корпусу з навколишнім середовищем.



Рисунок 1.12 – Видатний авторський підсилувач Andrea Pivetta [13]

Усі компоненти цього нового проекту містяться в скляному циліндрі з муранського скла, зануреному в стабілізуючу/демпфуючу рідину, щоб обмежити електричні та теплові зміни кожного компонента, мінімізувати ефект теплового дрейфу та погасити мікровібрацію. Крім того, масивна водонепроникна алюмінієва рама зменшує найменші теплові та механічні коливання.

За потреби відводити велику щільність тепла, використовують випарні системи, в яких для відведення тепла використовується процес кипіння рідини. В цьому випадку температура джерел тепла повинна бути вищою за температуру кипіння рідини.

Раніше у якості рідини теплоносій використовувався фреон, проте через дорожнечу і небезпеку для довкілля від цієї ідеї відмовилися (рис. 1.13).

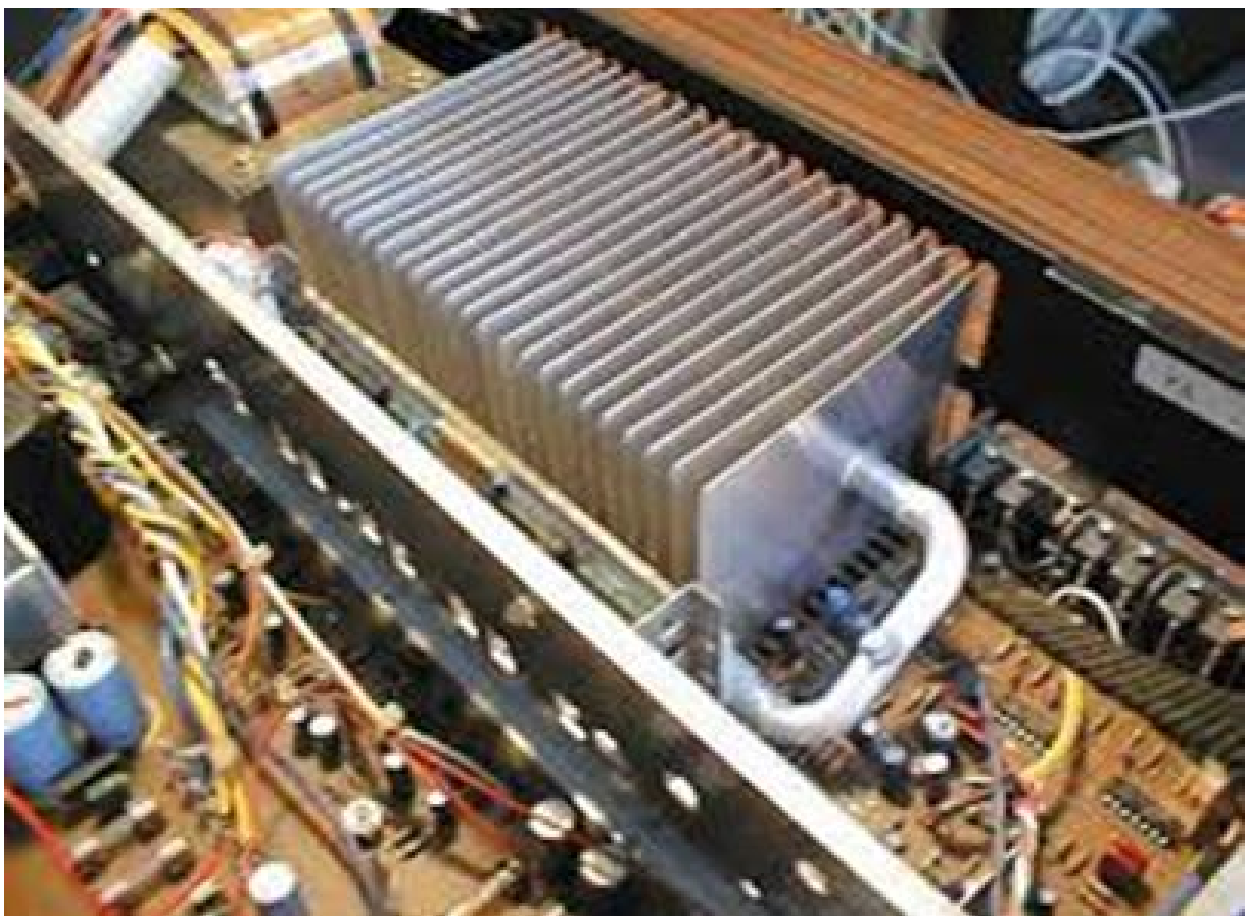


Рисунок 1.13 – Інтегральний підсилювач Telefunken RA 200 з тепловими трубками [14]

В даний час при пасивному випарному охолодженні широко використовуються теплові трубки. Як теплоносій зазвичай застосовується дистильована вода або різні типи спиртів (рис. 1.14).

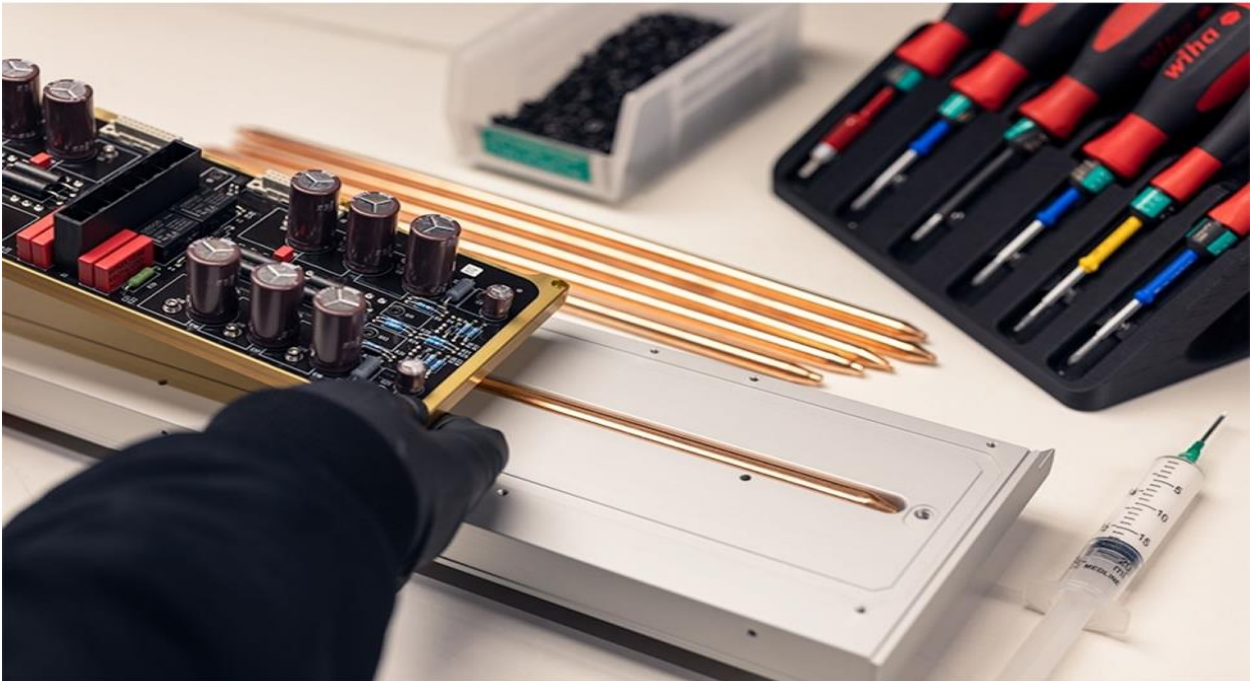


Рисунок 1.14 – Монопідсилювач потужності MSB Technology M205, наповнення теплових трубок – дистильована вода [12]

Радіаторне охолодження має в своїй основі радіатор – теплообмінник, який призначений для розсіювання тепла від об'єкта, що охолоджується. Механізм передачі тепла є теплопровідність, здатність речовини проводити тепло всередині свого об'єму. Все, що потрібно – створити фізичний контакт радіатора з об'єктом, що охолоджується. Після того, як радіатор приймає на себе частину тепла від об'єкта, що охолоджується, його завдання – розсіяти його в навколишнє повітря.

Приклади радіаторного охолодження представлені на (рис. 1.1) та (рис. 1.2).

З часом повітря навколо радіатора поступово нагрівається, через що процес теплообміну стає менш ефективним. Ефективність теплообміну можна збільшити, якщо постійно подавати холодне повітря до ребер радіатора. Простіше кажучи, для ефективного охолодження потрібна циркуляція холодного повітря, часто примусова.

На (рис. 1.15) зображений підсилювач фірми Gzbotolave [15]. В цьому підсилювачі використовується примусове охолодження, що складається з



алюмінієвого профілю – труби квадратного перерізу, і вентилятора малої продуктивності, що стоїть на вході труби. Потужні транзистори вихідного каскаду підсилювача безпосередньо впаяні в друковану плату та закріплені на тепловідводі (трубі) у нижній частині.



Рисунок 1.15 – Підсилювач фірми Gzbotolave КА – 7200



Рисунок 1.16 – Багатоканальний підсилювач Outlaw 7220 [16]

Примусове повітряне охолодження застосовується, коли потрібно відводити велику щільність теплових потоків. Примусові потоки повітря створюються спеціальними вентиляторами, компресорами. Охолодження може здійснюватися двома методами: обдуванням зовнішньої поверхні кожуха апарату або продуванням повітря через внутрішній об'єм, останнє використовується найчастіше (рис. 1.16).

## 1.6 Висновок за розділом

Якщо раніше від підсилювача була потрібна просто надійна робота та гарантована якість звуку, то сучасні моделі доповнюються рядом сервісних функцій, таких як комп'ютерне управління підсилювачем, програмування вбудованого лімітера, а також наявність цифрового входу. Із здешевленням цифрових інтерфейсів для передачі аудіосигналів очікується зростання ринку підсилювачів з дистанційно керованими параметрами та автоматичною діагностикою, що, безумовно, розширить можливості створення звукопідсилювальних комплексів. Враховуючи стрімкий розвиток цифрової техніки та елементної бази, складно навіть припустити, до яких вершин призведе нас подальше вдосконалення принципів побудови підсилювачів потужності.

Вибір тієї чи іншої моделі підсилювача природно залежить від багатьох факторів: від вимог до звуку, що відтворюється всією системою; від параметрів додаткового обладнання та, що найбільш важливо, акустичних систем, які використовуватимуться спільно з цим підсилювачем; від умов експлуатації, які визначають ступінь надійності, зручності у використанні та навіть дизайну виробу. Не в останню чергу свій вплив на вибір надає вартість апарату, а точніше горезвісне співвідношення ціна/якість для моделей підсилювачів одного класу.

Для суттєвого збільшення надійності підсилювача, треба використовувати різноманітні системи охолодження для дотримання завданої температури підсилюючих елементів та корпусу а також передбачити системи захисту від помилок користувача та навколишнього середовища.

## 2 КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧА. ВИБІР ТА РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ

### 2.1 Аналіз принципів побудови ПНЧ великої потужності

Передумовою створення підсилювачів класу G був факт нелінійності рівня музичного сигналу. Більшість часу музика звучить на малому і середньому рівні, коли від підсилювача не вимагається велика потужність. Але для того, щоб без втрат відпрацювати динамічні сплески, що вимагають великої віддачі енергії, підсилювач доводиться тримати в режимі високої потужності постійно. У той же час з міркувань економії було б непогано, якби блок живлення підсилювача працював на повну лише в ті моменти, коли це потрібно для відпрацювання гучних звуків, а решту часу споживав менше енергії від мережі.

Сигнальна частина підсилювачів класу G аналогічна підсилювачам класу АВ і на малій гучності працює в такому ж режимі. Відмінність криється в блоці живлення, який відстежує рівень сигналу. Як тільки рівень гучності піднімається, блок живлення підвищує напругу живлення, тим самим даючи можливість підсилювачу працювати з більшою амплітудою і знижує напругу, як тільки рівень сигналу на вході падає.

Відмінність класу G від класу H полягає у тому, як саме відбувається зміна рівня напруги живлення. У класі G блок живлення має кілька обмоток трансформатора, що формують шини живлення з різними рівнями напруги. При підвищенні рівня вхідного сигналу відбувається дискретне підвищення напруги живлення або шляхом переходу на більш високовольтну шину, або шляхом підсумовування напруг основний і додаткової шин живлення. Таких ступенів підвищення живлення може бути декілька.

Оскільки навіть у самій ритмічній та агресивній музиці великі енергетичні сплески непостійні, фактичне енергоспоживання підсилювача класу G виявляється ближчим до показників його мінімальної, а не максимальної потужності.



Підсилювачи класу Н фактично є версією класу G з плавно змінним рівнем напруги живлення. Схеми, що відстежують рівень вхідного сигналу, підвищують і знижують напругу живлення не східчасто, а плавно, відповідно до величини наростання та зниження рівня вхідного сигналу. У простих версіях підвищення напруги живлення забезпечується за рахунок конденсаторів вольтодобавки, у складніших – додаткова секція живлення, що по суті є ще одним підсилювачем потужності. Як і в класі G, на малих рівнях сигналу клас Н працює без зміни рівня напруги живлення аналогічно звичайному класу АВ.

Значною перевагою підсилювачів класів G та Н є найкраща енергоефективність. За інших рівних умов, вони споживають менше енергії, ніж підсилювачі класу АВ. Крім того, оскільки основну частину часу підсилювачі класів G і Н працюють зі зниженою напругою живлення, вони розсіюють менше тепла і вимагають менших радіаторів охолодження, ніж аналогічні підсилювачі класу АВ. На тлі підсилювачів класу D, ПНЧ класів G і Н мають одну помітну відмінність – збереження звичного характеру звучання, властивого класу АВ. Також, маючи солідний запас енергії, підсилювачі класів G і Н краще справляються зі складним навантаженням, наприклад з акустикою з низькою чутливістю або такими, що вимагають високої підведеною потужності.

Перехід від класу А до класу АВ дав значно суттєвіший приріст ККД підсилювача, ніж перехід від АВ до G або Н. При цьому клас D перевершує за енергоефективністю всі попередні класи значно суттєвіше і на його тлі різниця між класом АВ і класами G і Н починає здаватися незначною. Тому на перший план виходить питання технічно більш складної схемотехніки класів G і Н. Фактично, ця конструкція набагато складніша за звичайний клас АВ з усіма ризиками зниження надійності і стабільності роботи.

Підсилювачі класу D мають вищий ККД та менше енергоспоживання, ніж підсилювачі класу АВ, що призводить до меншого виділення тепла. Однак підсилювачі класу D мають недолік, який полягає в тому, що вимагають більшої кількості зовнішніх компонентів, оскільки на вихідному терміналі зазвичай вставляється LC-фільтр, щоб усунути несучу частоту ШІМ.

Порівняння енергоефективності підсилювачів звуку показано на (рис. 2.1) [17].

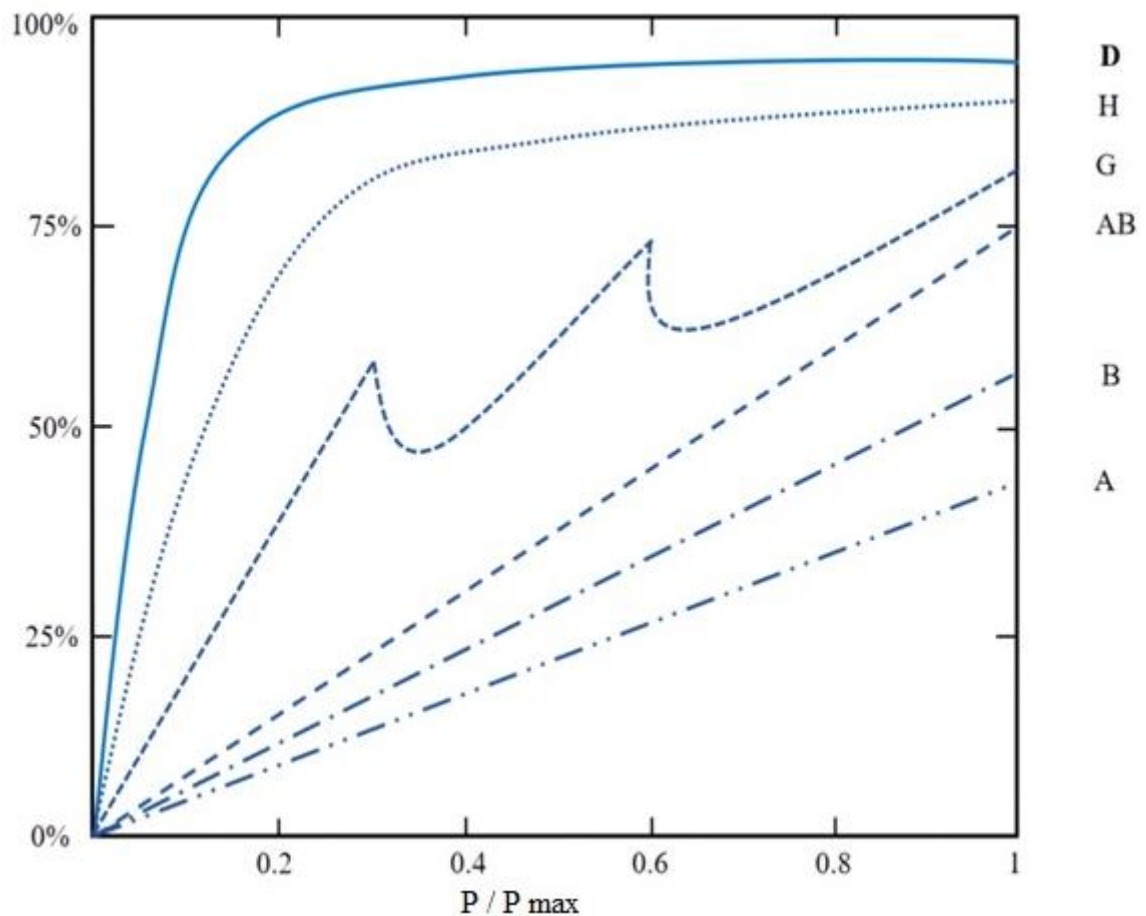


Рисунок 2.1 – Порівняння ефективності підсилювачів різних класів

Традиційні аналогові підсилювачі потужності (класи А, В, АВ) мають високу точність і можуть забезпечити чудову якість звуку, однак ефективність перетворення потужності лінійних і нелінійних підсилювачів, як ми бачимо, вкрай низька.

Підсилювачі класу D вирішили цю проблему, їх теоретична енергоефективність 100% , а при максимальному індексі модуляції на практиці вище 90%. З іншого боку, енергоефективність лінійних підсилювачів становить лише 70% або менше, тому підсилювач класу D в даний час є найкращим вибором для комерційних цілей.

## 2.2 Підсилювач потужності звукової частоти Хамелеон

Підсилювач виконаний за симетричною схемою, базою для якого послужив відомий УНЧ Ланзар [18]. Відмінною рисою підсилювача є плаваюче живлення, яке формується вихідним сигналом. Це дозволило збільшити ККД підсилювача і як наслідок знизити нагрівання кінцевих транзисторів на максимальних потужностях, оскільки напруга живлення підсилювача напруги може бути більшою за напругу живлення кінцевих каскадів без додаткових джерел живлення.

Плаваюче живлення (рис. 2.2) так само дозволило зменшити зміну струму, що протікає через передостанній каскад, що так само знизило рівень спотворень; для класу Н та вихідній потужності 1400 Вт - не більше 0,1 %, для класу G (1400 Вт) – не більше 0,05 %, до включення другого живлення – не більше 0,02 %.

У підсилювачі напруги так само передбачено регулювання струму спокою передостаннього каскаду, що дозволяє використовувати широкий діапазон напруги живлення практично без втрати якості звучання, що дає можливість на його базі будувати підсилювачі потужністю від 100 до 800 Вт (на 4 Ом) у класі АВ лише додаючи кількість кінцевих транзисторів.

Кінцевий каскад виконаний у вигляді повторювачів на польових транзисторах IRFP240 – IRFP9240, які добре зарекомендували себе в підсилювачах Холтона і дозволяють отримати гарний звук за прийнятну ціну.

Побудова підсилювача на потужності понад 600 Вт у класі АВ має проблеми через велике тепловиділення, навіть на потужності вище 300 Вт часто необхідний перехід на дворівневе живлення, яке дозволяє розвантажити вихідний каскад і на меншій кількості кінцевих транзисторів отримати більшу потужність. Зазвичай, підсилювачі класу АВ розробляють в діапазоні потужностей до 800 Вт, а виготовляють лише до 600 Вт.

Таким чином, на кінцевий каскад підсилювача потрібно подавати дві напруги живлення (рис. 2.2) та необхідна додаткова схема управління цим живленням. За принципом управління розрізняють два основних класи – G і H.

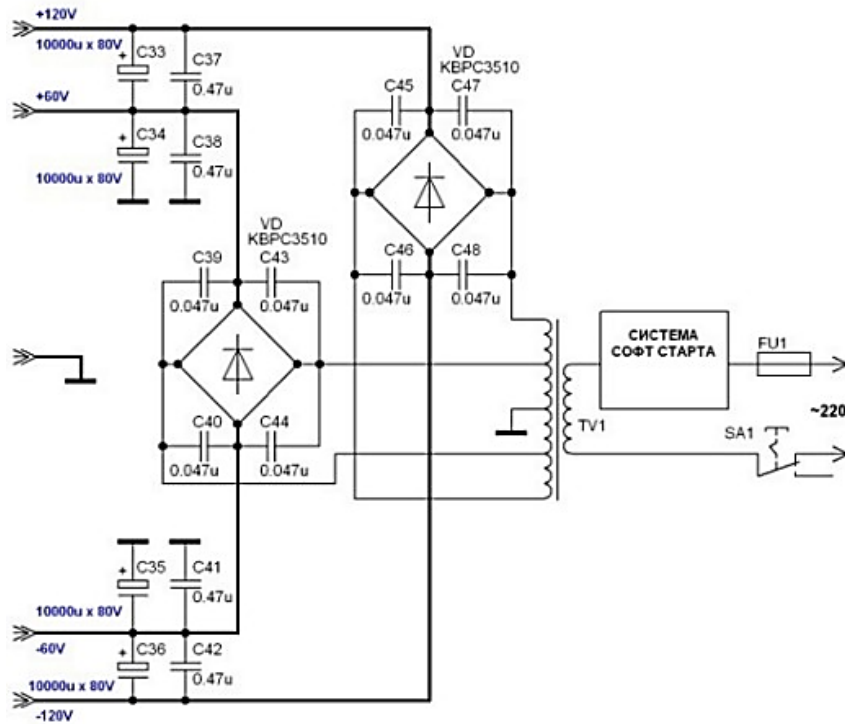


Рисунок 2.2 – Принципова схема двополярного джерела живлення

Відмінність в тому, що в класі G напруга живлення на кінцевому каскаді змінюється плавно, тобто силові транзистори системи управління живленням працюють у підсилювальному режимі, а в класі H силові ключі системи управління живленням подають ступінчасто, вони або повністю закриті, або повністю відкриті (рис. 2.3). Синя лінія – вихідний сигнал, червона та зелена – напруга живлення кінцевого каскаду підсилювача потужності.

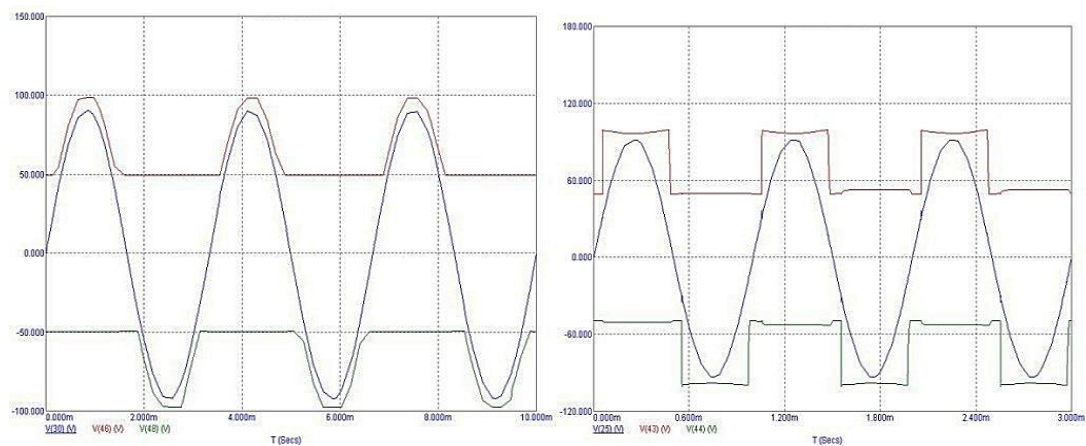


Рисунок 2.3 – Часові діаграми: зліва – клас G, справа – клас H

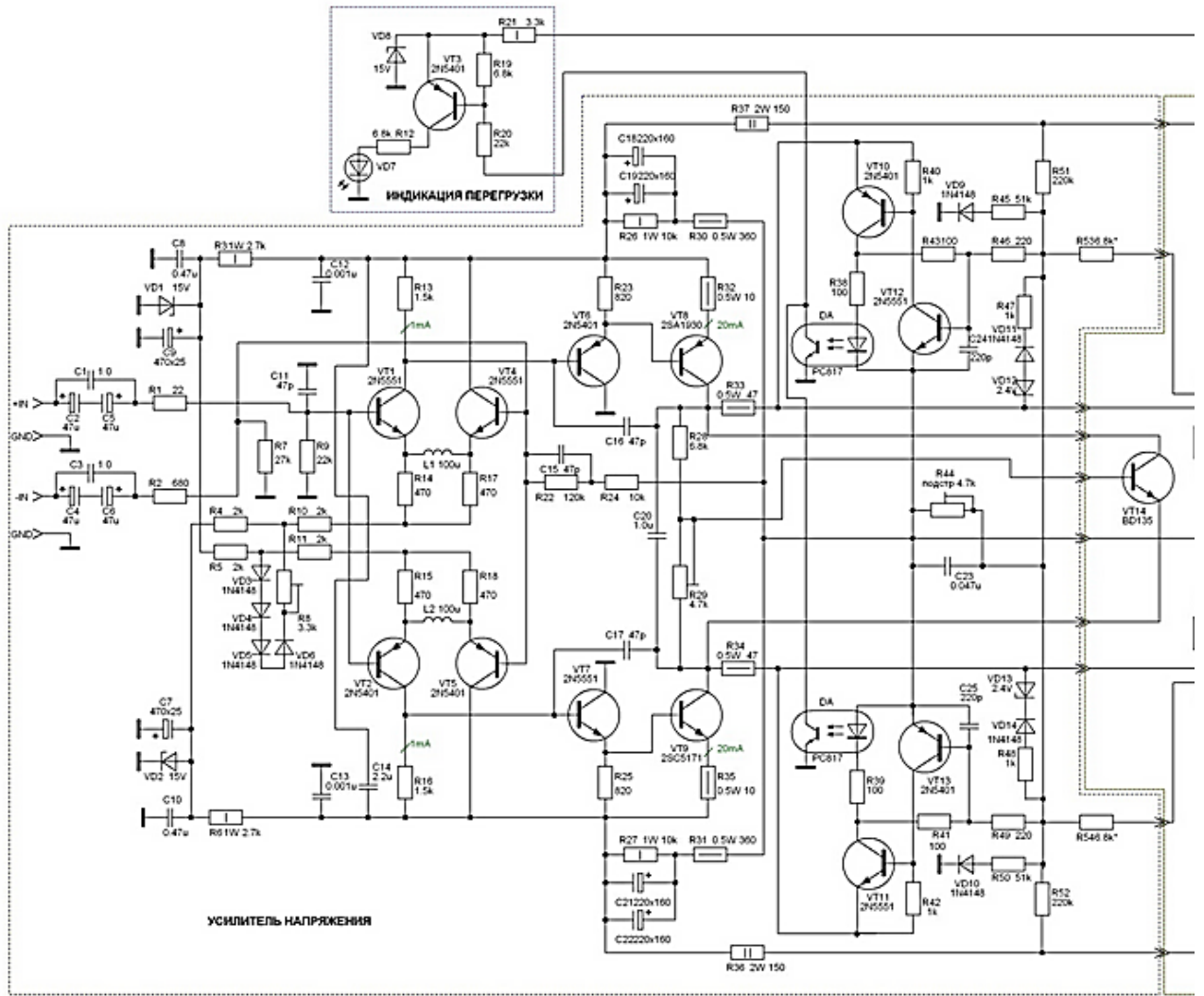


Рисунок 2.4 – Принципова схема входної частини підсилювача потужності, працюючого в класі Н

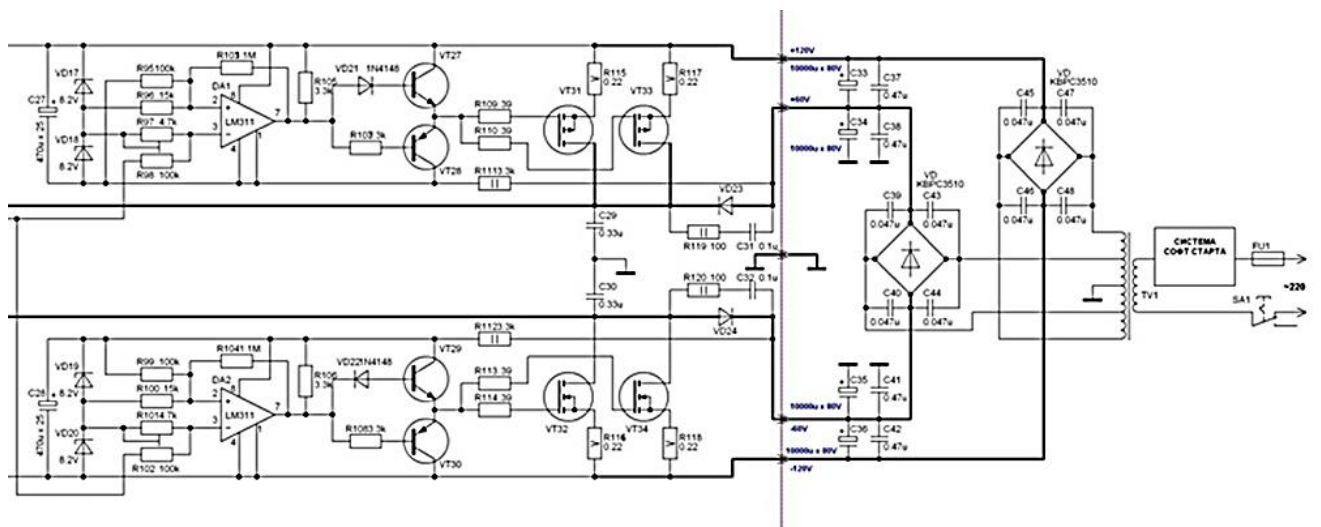


Рисунок 2.5 – Принципова схема блоку захисту підсилювача потужності, працюючого в класі Н

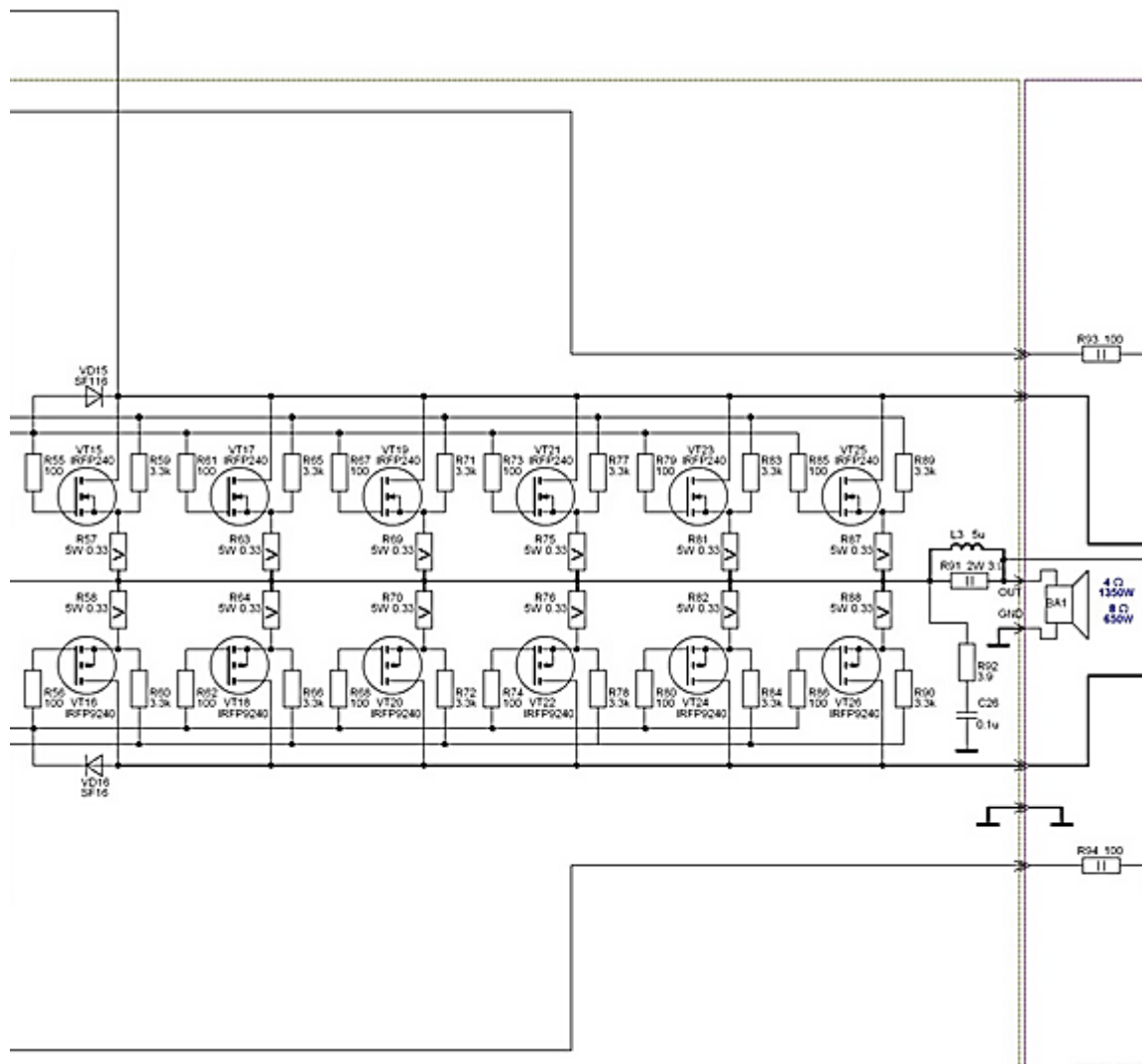


Рисунок 2.6 – Принципова схема підсилювача потужності, працюючого в класі Н (вихідний каскад)

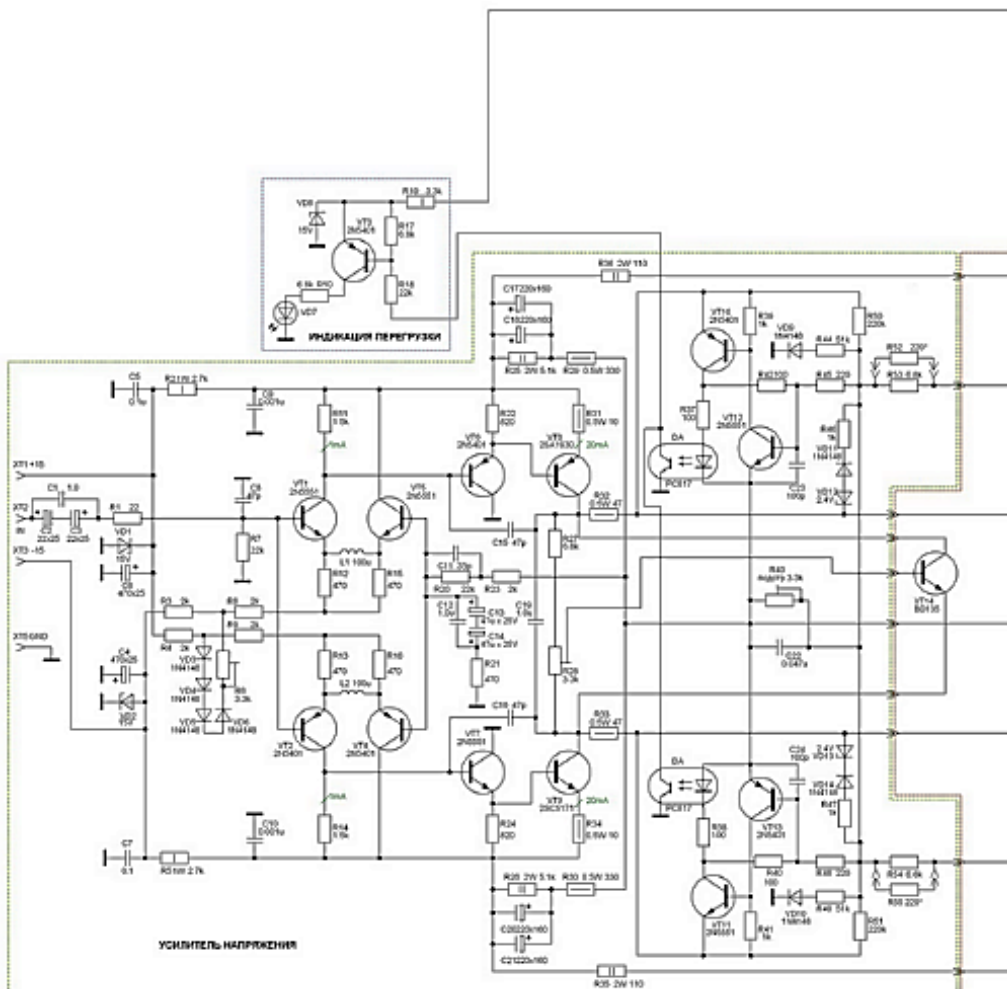
Основа схеми (рис 2.4) складається з типового класу АВ, проте живлення на підсилювач подається вже з більш високовольтної «гілки» живлення, причому вплив вихідного сигналу на напругу живлення підсилювача знижено (зменшено опір R36, R37; до 68 Ом на потужностях вище 1 кВт), оскільки при підключенні другого живлення на вихідному сигналі спостерігається невеликий сплеск, який досить серйозно впливає на стійкість схеми. Управління живленням, що подається на кінцеві каскади, здійснюється компараторами LM311, поріг спрацьовування яких регулюється підстроювальними резисторами R97 і R101.

Після компараторів стоять транзисторні драйвера, які працюють безпосередньо на затвори мосфітів різної структури. Оскільки силові мосфіти

управління живленням працюють в ключовому режимі, то тепло, що виділяється на них, досить низьке, для них набагато важливіше максимальний струм, що протікає по відкритому переході сток-витік. Для підсилювачів до 700 Вт використовуються транзистори IRFP240 – IRFP9240, їх же по два в паралель для потужностей до 1 кВт і IRF3710-IRF5210 для потужностей понад 1 кВт.

На (рис. 2.6) наведено принципову схему вихідного каскада підсилювача потужності на 1400 Вт класу Н. В кінцевому каскаді використовується 6 пар транзисторів (для підсилювача на 1000 Вт необхідно 4 пари), силові ключі управління живлення IRF3710 – IRF5210.

На (рис. 2.7) наведено принципову схему підсилювача Хамелеон на потужність до 1400 Вт класу G, в якій використовується 6 пар як кінцевих, так і керуючих транзисторів (для потужностей до 1000 Вт використовують по 4 пари).





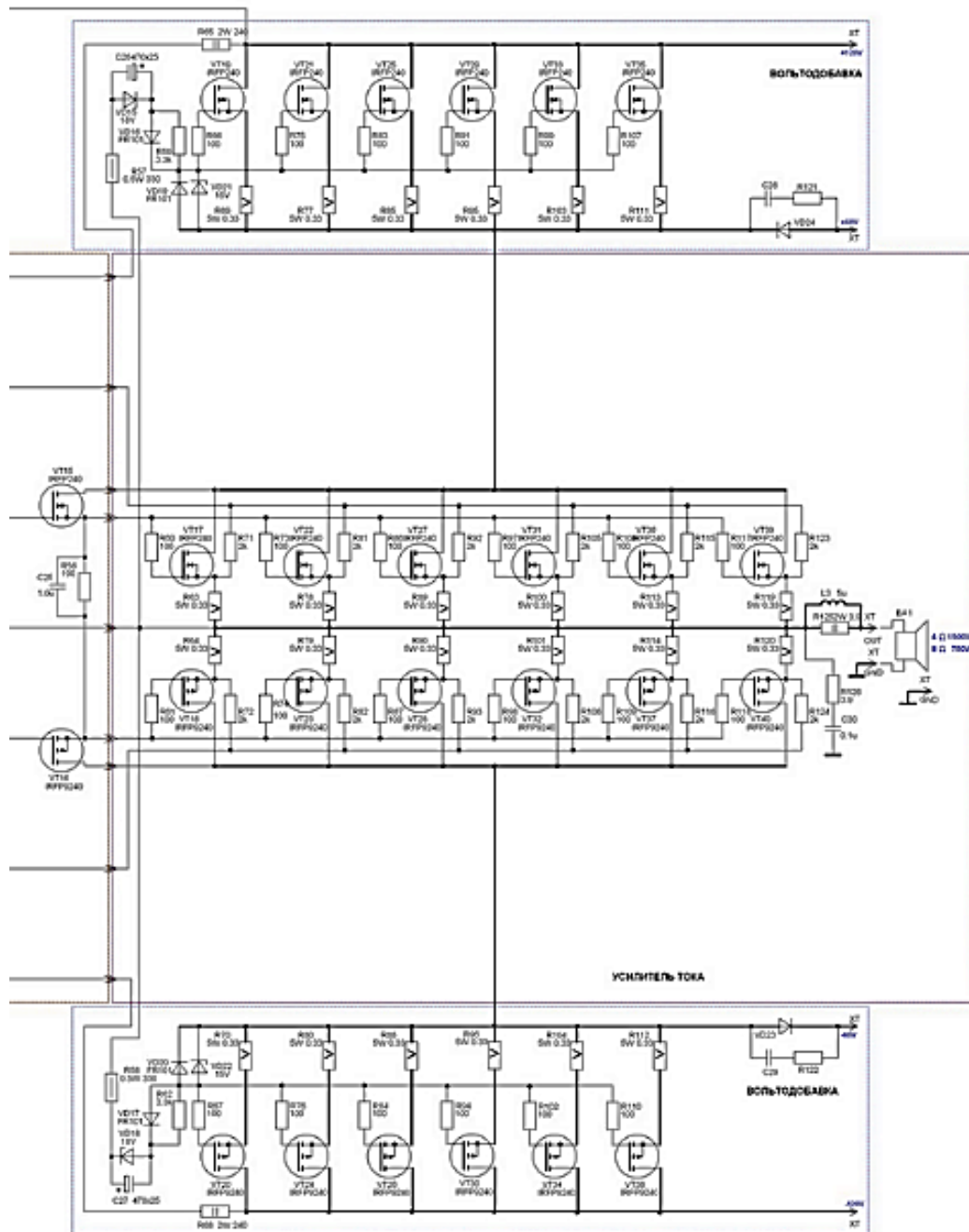


Рисунок 2.7 – Принципова схема підсилювача потужності, працюючого в класі G

Управління другим живленням здійснюється повторювачами напруги вихідного сигналу, тільки на них попередньо подається додаткова опорна напруга в 18 В і як тільки напруга на виході наближається до величини напруги першого більш ніж на 18 В повторювачі починають подавати другу напругу.



Великим плюсом даної схемотехніки є те, що відсутні комутаційні перешкоди, характерні для класу Н, але поліпшення якості звуку вимагає збільшення кількості транзисторів.

В управлінні напругою живлення кінцевого каскаду їх кількість має дорівнювати кількості самих кінцевих транзисторів і це буде практично на межі області безпечної роботи транзисторів (ОБР), тому за потрібне буде аналіз та розрахунок потрібної системи охолодження.

Зовнішній вигляд друкованих плат у зібранні з елементами зображений на (рис. 2.8).

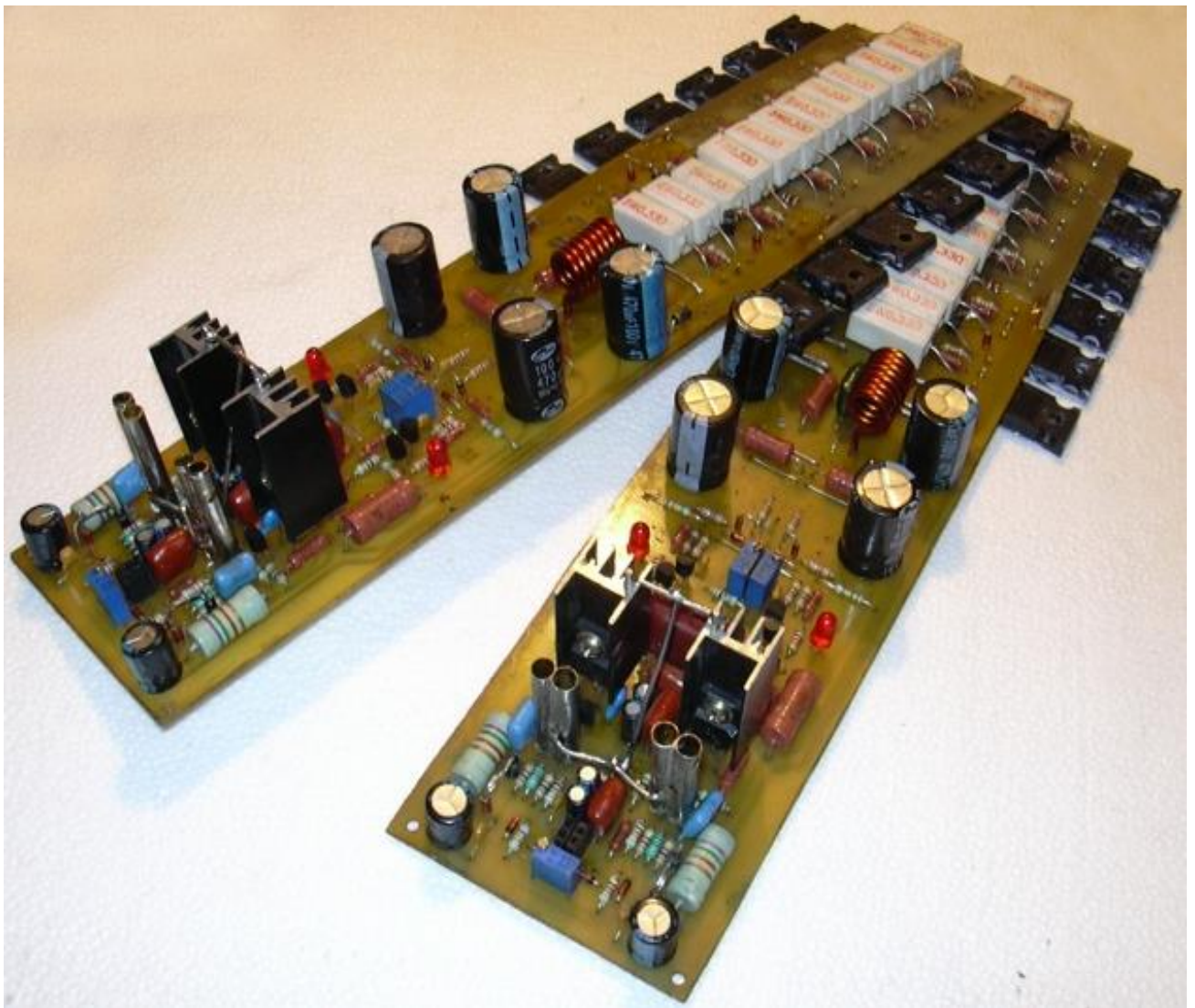


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд готових плат підсилювача Хамелеон

### 2.3 Підсилювач потужності звукової частоти проєкта IRAUDAMP9

IRAUDAMP9 – це одноканальний напівмостовий підсилювач класу D потужністю 1700 Вт (при 2 Омах навантаження) [19]. Він оснащений одноканальним автоколивальним ШІМ-модулятором. Результатом цієї топології є найменша кількість компонентів, висока продуктивність та міцна конструкція. Він являє собою аналог версії сигма-дельта модуляції другого порядку, що має перемикаючий каскад класу D всередині петлі. Переваги сигма-дельта модуляції порівняно з модуляцією на основі несучого сигналу полягає в тому, що вся похибка в чутному діапазоні частот зсувається в нечутний верхній діапазон частот через характер його роботи. Крім того, сигма-дельта модуляція дозволяє розробнику застосувати достатню кількість корекції помилок.

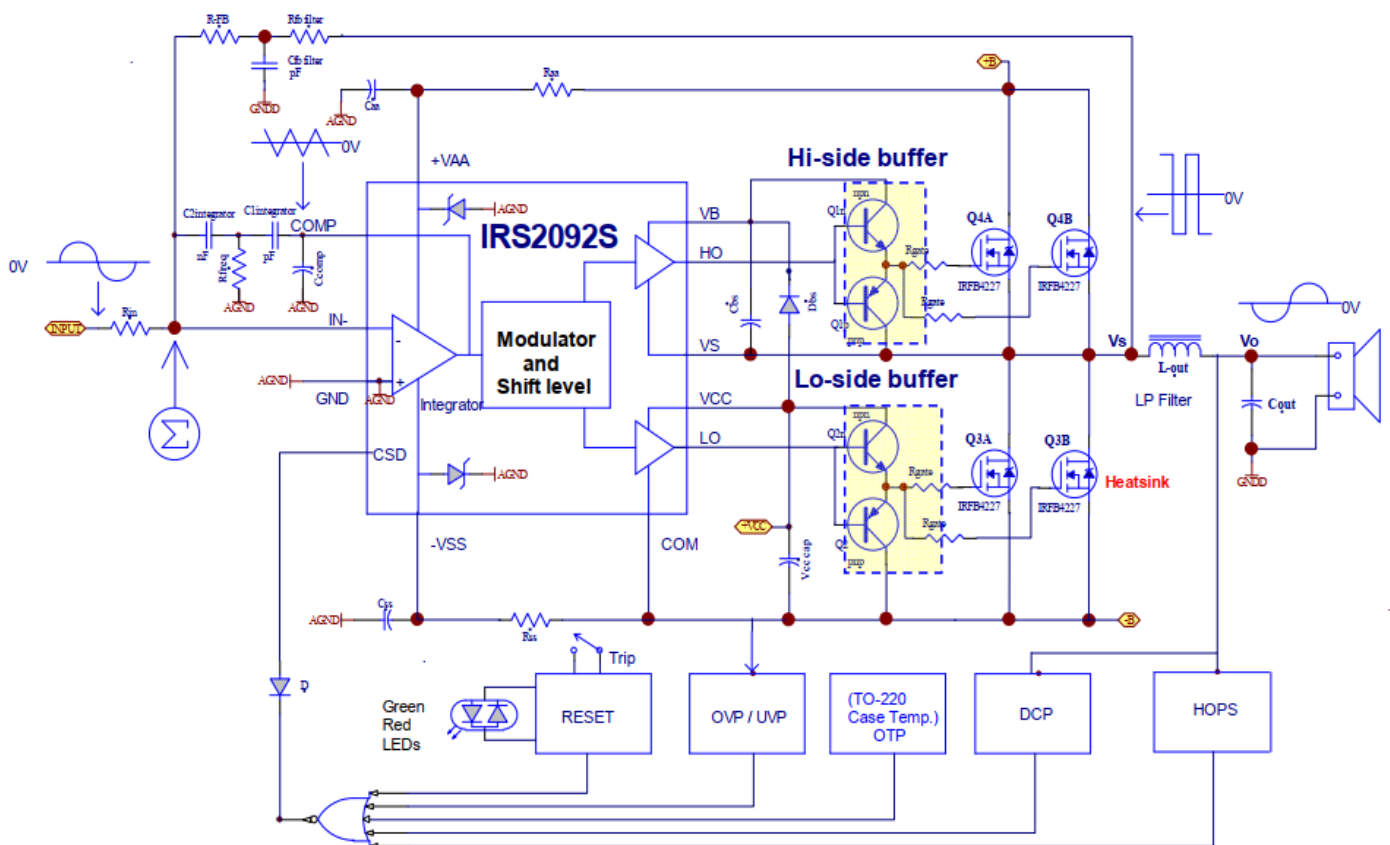


Рисунок 2.9 – Функціональна блок-схема підсилювача класу D проєкта IRAUDAMP9

IRAUDAMP9 включає наступні функціональні блоки (рис. 2.9):

- ШІМ модулятор і регулятори рівня;
- драйвер і буфер затвора;
- фронтальний інтегратор;
- силові МОП – транзистори;
- вихідний фільтр НЧ.

В його основі лежить аудіоконтролер IRS2092S класу D.

Інтегратор C2, інтегратор C1, R21 + потенціометр P1 утворюють передній інтегратор другого порядку (рис.2.12). Цей інтегратор отримує прямокутний сигнал зворотного зв'язку від перемикаючого каскаду класу D і виводить квадратичну коливальну форму як несучий сигнал. Щоб створити модульований сигнал ШІМ, вхідний сигнал зсуває середнє значення цієї квадратичної форми сигналу через співвідношення посилення між  $(R38+R39)/(R154+R40)$ , щоб навантаження змінювалося відповідно до миттєвого значення аналогового вхідного сигналу. Вхідний компаратор IRS2092S обробляє сигнал для створення необхідного ШІМ – сигналу. Цей сигнал внутрішньо зсувається за рівнем до негативної шини живлення, де він розділяється на два сигнали з протилежною полярністю та доданим мертвим часом для high-side та low-side сигналів затвора МОП-транзисторів відповідно. IRS2092S керує двома парами МОП-транзисторів IRFB4227 в каскаді живлення для забезпечення посиленої форми сигналу ШІМ. Посилений аналоговий вихідний сигнал створюється за допомогою демодуляції посиленого ШІМ. Це робиться за допомогою LC-фільтра нижніх частот (LPF), утвореного L4 і C34, який відфільтровує сигнал перемикання несучої.

Підсилювачи високої потужності, які використовують декілька МОП – транзисторів у паралельному з'єднанні, для обробки великої величини струму перемикання часто потрібно набагато більше ніж +/-1А струму приводу навіть в короткий момент через вимогу до затвора МОП-транзисторів (високий загальний заряд затвора,  $Q_g$ ). Щоб полегшити це, буферний каскад розроблений для створення та споживання цього високого заряду затвора. Він складається з

NPN-PNP BJT транзисторів та служить високошвидкісним буферним підсилювачем, який отримує вхідний сигнал від IRS2092S HO / LO для управління силовим каскадом МОП-транзисторів через  $R_g$  (1A,1B,2A,2B) для Low-side МОП-транзисторів Q4 (A,B) і для Q3 (A,B) МОП-транзисторів Hi-side (рис.2.10).

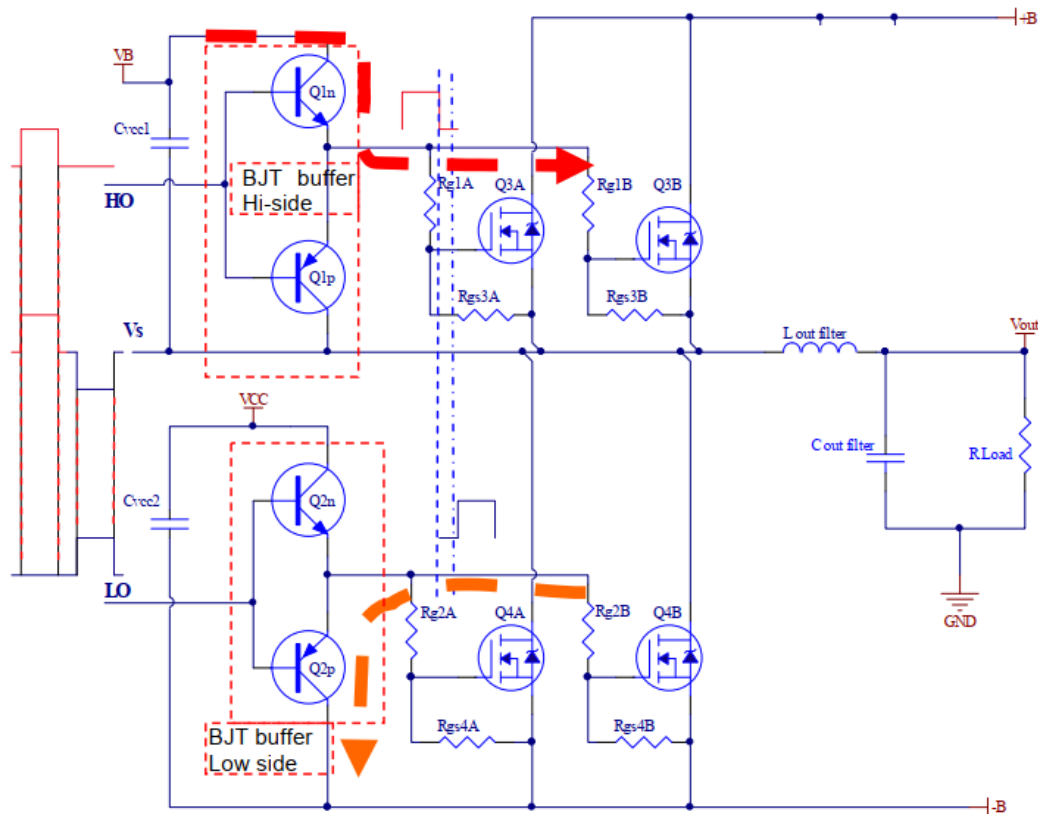


Рисунок 2.10 – Схема буферизації затвора на МОП – транзисторах IRFB4227

Через обмежений розмір радіатора, IRAUDAMP9 розрахований для забезпечення високої ефективності та забезпечення номінальної потужності 1000 Вт протягом однієї хвилини при кімнатній температурі на відкритому повітрі ( $T \sim 22-25$  град. С). Однак, щоб обробляти одну восьму безперервної номінальної потужності (рис. 2.11), яка зазвичай вважається нормальною робочою умовою для стандартів безпеки, підсилювач IRAUDAMP9 вимагає радіатора значно більших розмірів або встановлення примусового повітряного охолодження. Тільки за таких умов, підсилювач зможе витримувати постійну номінальну потужність.

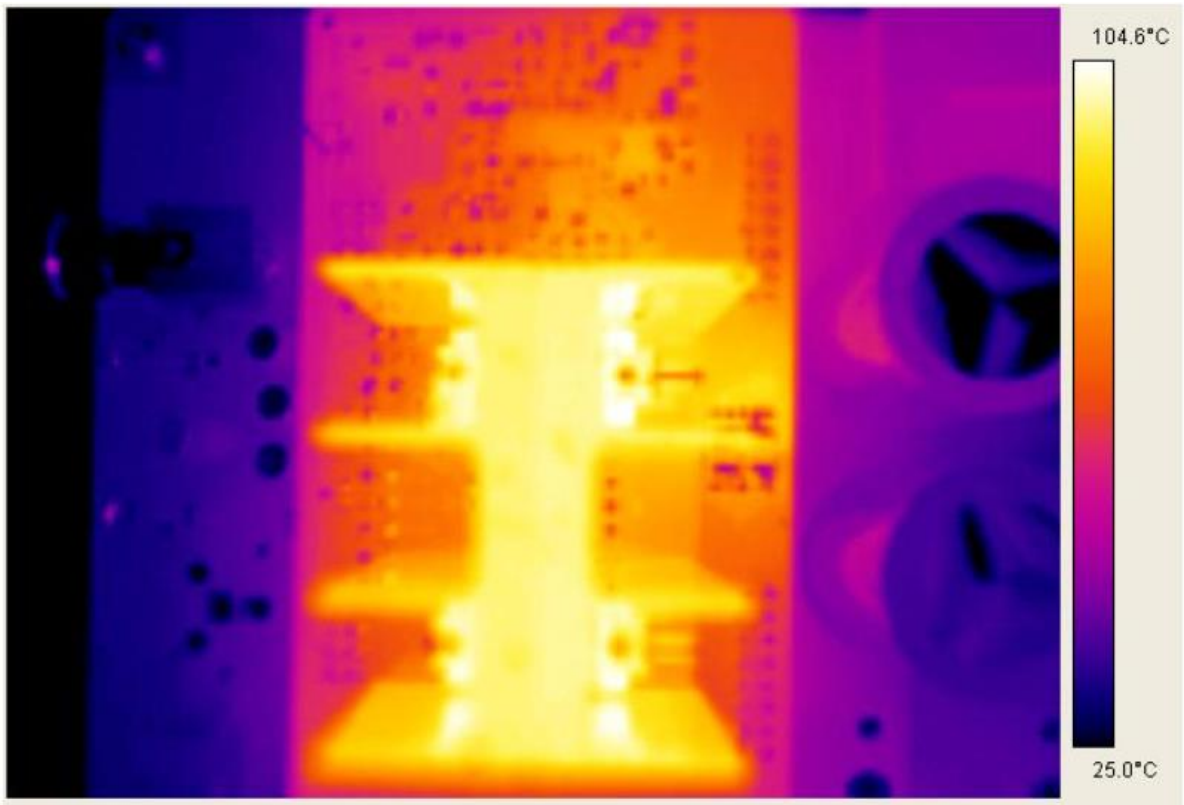


Рисунок 2.11 – Теплове зображення вузла радіатора під час випробування на 1/8 номінальної потужності

Далі наведена розширена принципова схема підсилювача класу D IRAUDAMP9.

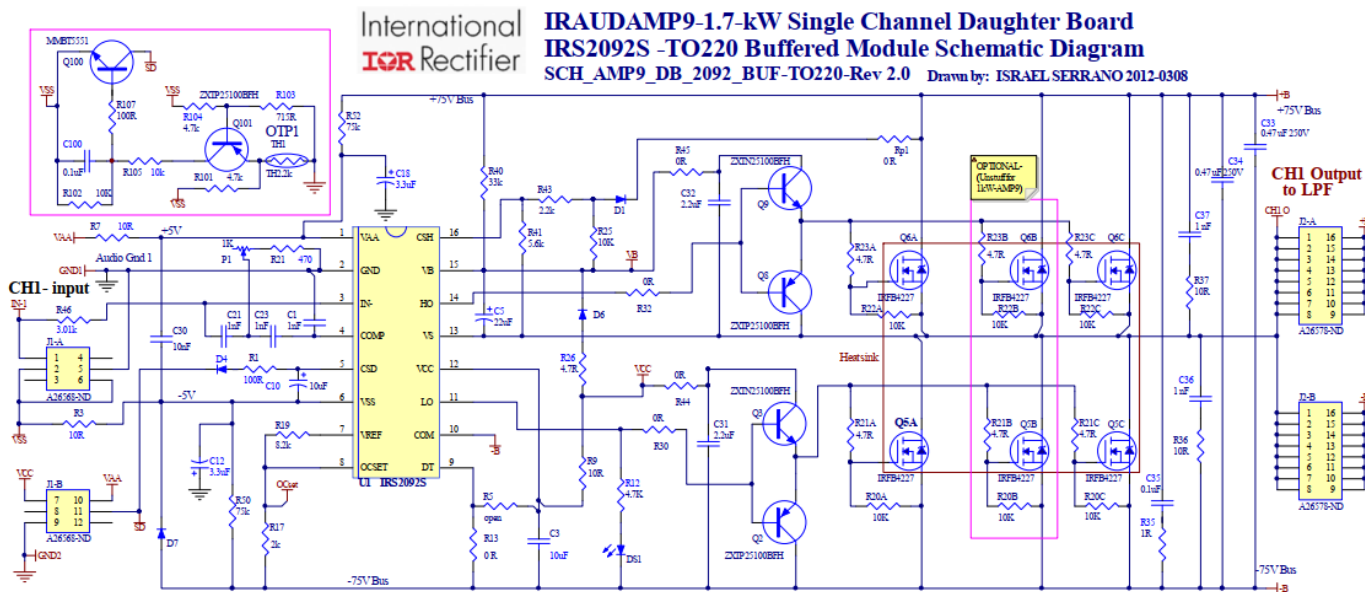


Рисунок 2.12 – Принципова схема IRAUDAMP9

Основою побудови підсилювача є аудіоконтролер IRS2092S та Gate-Driver IRFB4227 (x2 Пари) TO-220 MOSFET. Модулятор з використанням автоколивальної сигма-дельта-модуляції другого порядку. Підсилювач має аналоговий вхід.

Додаткові характеристики підсилювача проєкта IRAUDAMP9 наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики підсилювача IRAUDAMP9

Параметри	Кількісні значення	Примітки / Умови експлуатації
Діапазон живлення	$\pm 48V$ до $\pm 80V$	Біполярний блок живлення
Номінальний опір навантаження	2 $\Omega$	Неіндуктивне резистивне навантаження
Струм живлення холостого ходу	+67mA , -105mA	Немає вхідного сигналу
Загальне споживання енергії в режимі холостого ходу	13.2 W	Немає вхідного сигналу
Ефективність системи	97% 94% 74 %	+/- 75V 1.7 kW, 2 $\Omega$ +/- 75V 1.2 kW, 2 $\Omega$ +/- 75V 125 W (1/8 Po-rated), 2 $\Omega$
THD+N, 1W THD+N, 125W THD+N, 250W THD+N, 500W THD+N, 1250W THD+N, 1700W	0.024% 0.025% 0.025% 0.049% 1.0 % 10.0%	1kHz, +/-75V, 2-Ом навантаження
Динамічний діапазон	99.4 dB	A-зважений, AES-17 фільтр, Одноканальна робота
Залишковий шум, 22Hz – 20kHz AES17	290 $\mu$ V	Автоколивальні – 300kHz AP BW:<10Hz- 20kHz AES17 IHF-A зважений
Коефіцієнт демпфування	81.9	1kHz, відносний до 2-Ом навантаження
Частотний діапазон: 20Hz-20kHz	$\pm 1dB$	1W, 2-Ом навантаження



Зовнішній вигляд друкованої плати у зібранні з елементами зображених на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд готової плати підсилювача IRAUDAMP9

Існує тісний взаємозв'язок між електричними та конструктивними характеристиками, включаючи розрахунковий термін служби електронного компонента, з діапазоном робочих температур, оскільки більшість електронних компонентів під впливом електричного струму виділяють тепло.

Нагрів окремого електронного компонента відбувається під впливом наступних факторів:

- тепловий опір між напівпровідниковим кристалом та корпусом приладу;
- тепловий опір між корпусом приладу та охолоджувачем;
- тепловий опір між охолоджувачем та навколишнім середовищем.

Згідно дослідження [20], головна причина виходу з ладу підсилювача великої потужності пов'язана з одним або декількома вихідними (основними) транзисторами.



На рис. 2.14 показано розбивку даних про несправності підсилювача за основними категоріями. У 75% випадків відмови припадали на вихідні транзистори.

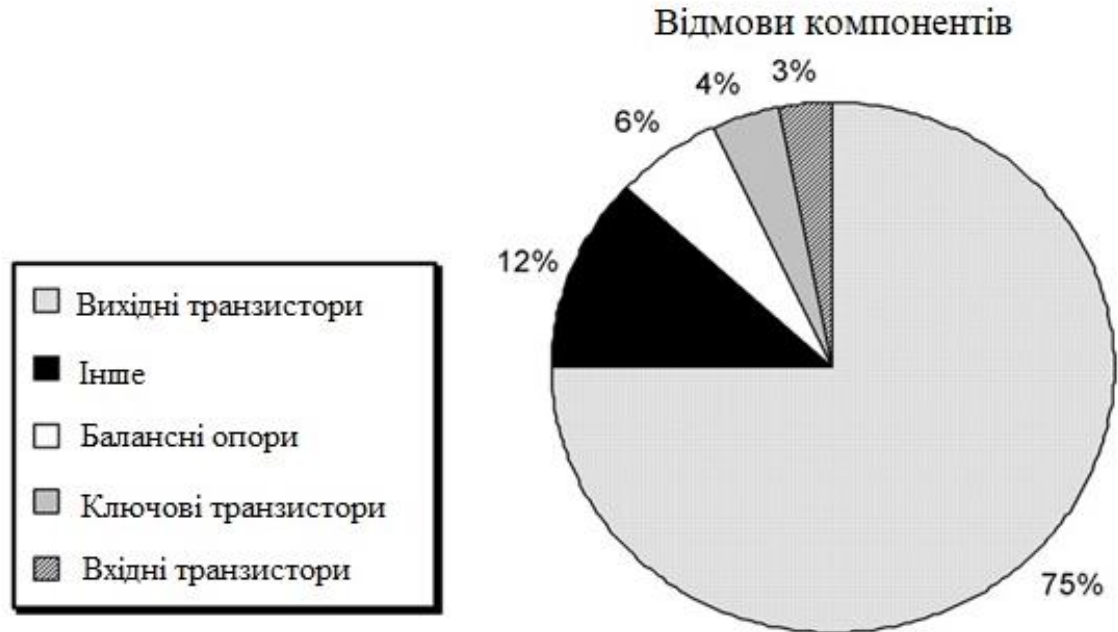


Рисунок 2.14 – Причини виходу з ладу підсилювачів великої потужності

Цей рівень відмов значно вищий, ніж у всіх інших компонентів, тому подальший аналіз буде зосереджений на можливих причинах несправностей вихідних транзисторів.

#### 2.4 Температурна залежність параметрів транзисторів

Гранично допустимі режими роботи транзисторів визначаються максимально допустимими напругами і струмами, максимальною потужністю, що розсіюється, і допустимою температурою корпусу приладу. Основними причинами, що викликають вихід транзистора з ладу або порушення нормальної роботи схеми в результаті зміни основних параметрів транзисторів, можуть бути занадто висока зворотна напруга на одному з переходів та перегрів приладу зі збільшенням струму через переходи.

У довідкових даних на транзистори зазвичай обумовлюються граничні експлуатаційні параметри, в тому числі гранична температура переходу або корпусу приладу. Всі перелічені параметри граничних режимів обумовлені розвитком одного з видів пробою:

- за напругою – лавинного;
- по струму - струмового або теплового;
- за потужністю - викликаного досягненням максимальної температури переходу.

Тепловий пробій транзистора виникає внаслідок лавиноподібного наростання температури переходу. Зі зростанням температури переходу, зростають струми витоку і напівпровідник переходить в провідний стан, а р-п-перехід зникає (перехід кристалів у стан своєї провідності).

В реальних умовах це явище не завжди обмежує зростання температури, тому що вже при більш низьких температурах може спостерігатися різка залежність від температури одного або декількох основних параметрів, наприклад, коефіцієнта передачі струму або граничної робочої напруги (рис. 2.15). [21]

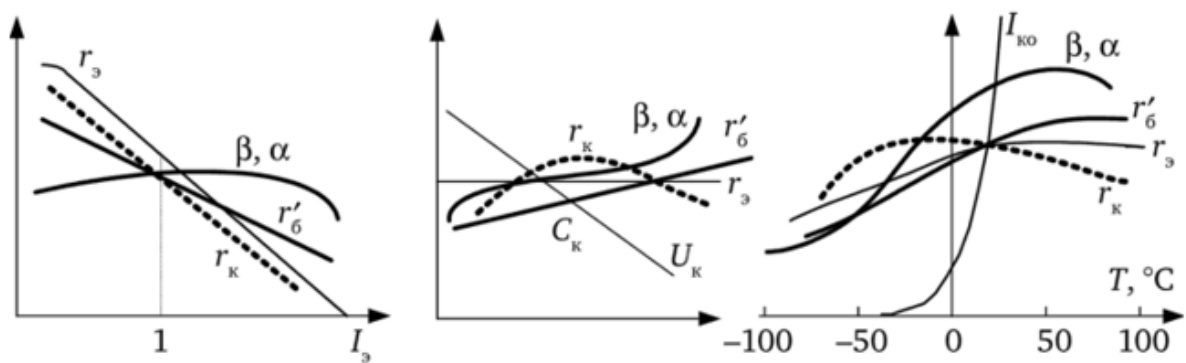


Рисунок 2.15 - Температурна залежність параметрів транзисторів

Розсіювання потужності транзистором має місце за будь-якого режиму роботи, проте воно максимально, коли транзистор перебуває у включеному стані чи вимикається. При високій частоті комутації втрати зростають пропорційно до частоти. Зі збільшенням споживаної потужності зростає і температура транзистора.

Для оцінки теплового режиму транзистора використовують поняття теплового опору, під яким розуміють опір елементів транзистора поширенню теплового потоку колекторного переходу до корпусу або в навколишнє середовище. Тепловий опір між переходом і корпусом  $R_{T_{п-к}}$  визначають як відношення різниці температур переходу  $T_{п}$  і корпусу  $T_{к}$  до потужності  $P_{п}$ , споживаної транзистором. Таким чином, тепловий опір визначається як перепад температури на одиницю потужності, що гріє:

$$R_{T_{п-к}} = \frac{T_{п} - T_{к}}{P_{п}}. \quad (2.1)$$

Аналогічно, тепловий опір перехід-середовище  $R_{T_{п-с}}$  визначається як відношення різниці температур переходу  $T_{п}$  та навколишнього середовища  $T_{с}$  до потужності втрат  $P_{п}$  у транзисторі:

$$R_{T_{п-с}} = \frac{T_{п} - T_{с}}{P_{п}}. \quad (2.2)$$

Якщо в транзисторі протікає імпульсний струм, то тепловий опір залежатиме від часу. У цьому випадку він називається перехідним і залежить від форми імпульсів струму та моменту часу, коли воно визначається.

У довідкових даних на транзистори зазвичай наводяться:

- тепловий опір перехід-корпус (або перехід-середовище)  $R_T$ ;
- гранично допустима температура переходу  $T_{п\max}$ ,  $T_{п\max}$  дорівнює 150 °С для кремнію і 125 °С - для германію;
- гранична середня (або імпульсна) потужність втрат у транзисторі  $P_{п}$ ;
- гранично допустима температура корпусу приладу  $T_{к\max}$ .

За формулою (2.2), при температурі середовища, рівної  $T_{п\max}$ , транзистор використовувати практично неможливо, оскільки допустима потужність втрат у ньому дорівнює нулю. Оскільки потужність, споживана транзистором, переважно витрачається на колекторному переході, то:  $P_{п\max} = U_{к} I_{к} = \text{const}$ , що визначає гіперболу максимальної споживаної потужності (рис. 2.16).

Оскільки при постійних значеннях  $T_{с}$  і  $R_T$  споживана транзистором потужність однозначно визначає температуру переходу, то гіпербола максимальної споживаної потужності є межею розвитку теплового пробою.

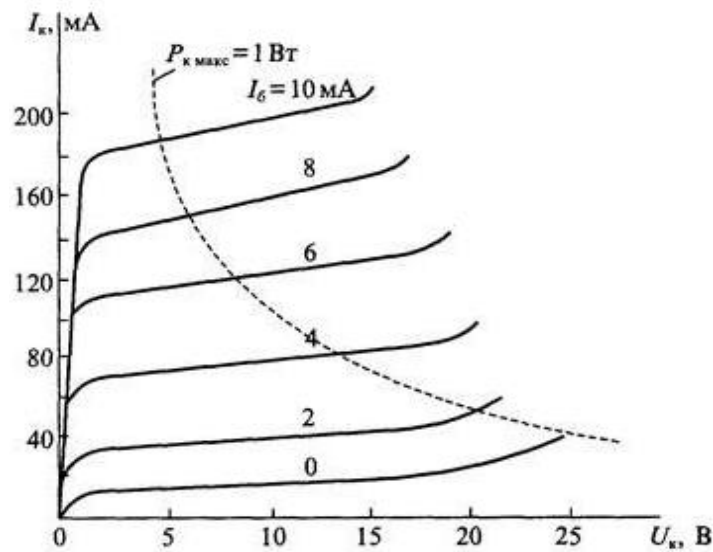


Рисунок 2.16 - Побудова гіперболи максимальної споживаної потужності

Вторинний пробій транзистора виникає або після розвитку одного з видів первинного пробою або безпосередньо, минаючи розвиток первинного пробою. Безпосередній розвиток вторинного пробою відбувається зазвичай в області порівняно високих напруг на колекторі і пов'язане з розвитком так званого струмового шнура. При цьому колекторний струм концентрується в дуже малій області колектора, що проплавляється і замикає колектор з базою. Вторинний пробій відбувається при значеннях струму та напруги, менших за гіперболи максимальної потужності (рис 2.16).

Якщо транзистор працює в підсилювальному режимі, то розвиток вторинного пробою і виникнення струмового шнура пов'язане з втратою термічної стійкості, при якій збільшення струму в якомусь місці структури призводить до підвищення її температури, а підвищення температури збільшує струм. Цей процес наростає лавиноподібно і призводить до проплавлення структури.

Вторинний пробій відсутній у польових транзисторах. Так, наприклад, для польових транзисторів з керуючим р-п-переходом зі збільшенням температури струм стоку зменшується (рис. 2.17). Таким чином, розігрів структури при

протіканні струму стоку призведе до його зниження, а не до збільшення, як у біполярному транзисторі. Останнє говорить про відсутність позитивного теплового зворотного зв'язку та неможливість саморозігріву польового транзистора.

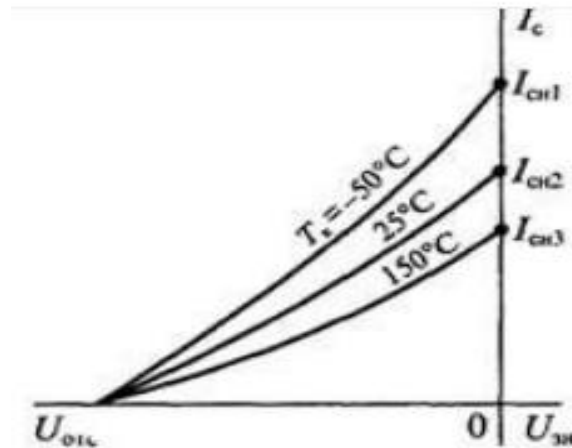


Рисунок 2.17 - Температурна залежність струму стоку польового транзистора з р-п-переходом

Область безпечної роботи (ОБР) транзистора визначає межі інтервалу надійної роботи транзистора без заходу в область одного з видів пробою. Розрізняють статичну та імпульсну ОБР. Статична ОБР (рис. 2.18) обмежується ділянками токового пробою (1), теплового пробою (2), вторинного пробою (3) та лавинного пробою (4). При побудові ОБР у логарифмічному масштабі її ділянки мають вигляд прямих ліній. Імпульсна ОБР визначається максимальним імпульсним струмом колектора і максимальною імпульсною напругою пробою.

При маленькій тривалості імпульсів на ній можуть бути відсутні ділянки, обумовлені тепловим пробоєм. При збільшенні тривалості імпульсу з'являються ділянки, що обмежують ОБР за рахунок розвитку вторинного пробою (3) і теплового пробою (2).

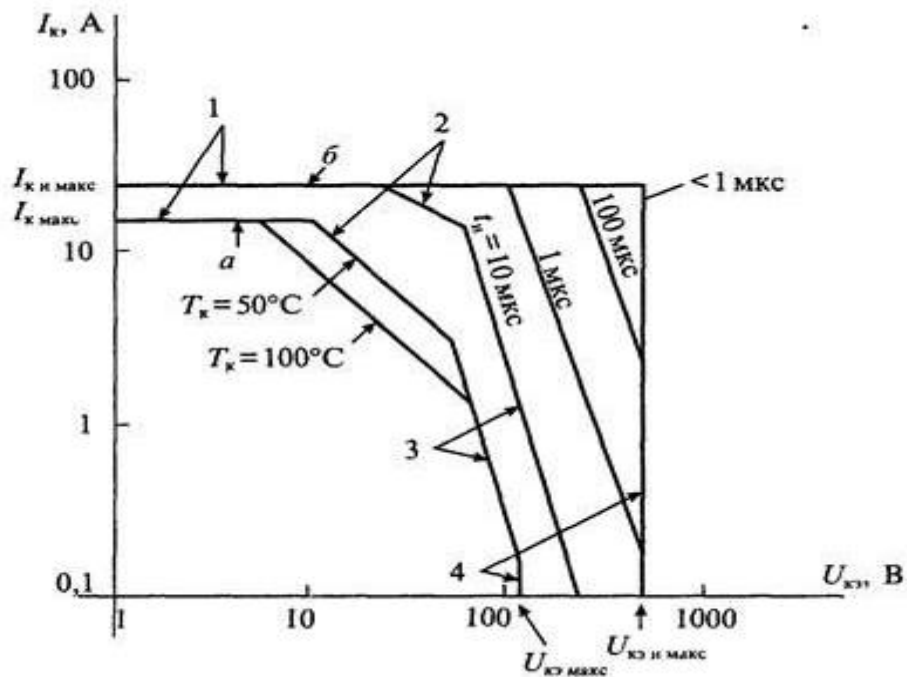


Рисунок 2.18 - Области безпечної роботи біполярного транзистора в статистичному режимі (а) та імпульсному режимі (б) за різних тривалостей імпульсів струму колектора

Кордони областей безпечної роботи транзистора залежать від температури його корпусу. Зі збільшенням температури корпусу транзистора, кордони ОБР, зумовлені тепловим пробоем, переміщуються вліво. Кордони ОБР, обумовлені лавинним чи вторинним пробоем, практично від температури не залежать.

Для захисту транзистора від перегріву та пов'язаного з цим теплового пробою застосовують охолоджувачі, до яких кріпиться корпус транзистора.

Висока температура є одним із шкідливих факторів, що впливають на всі типи компонентів електронної схеми. Для запобігання відмов компонентів через надмірне нагрівання, ретельно повинен бути виконаний тепловий аналіз проекту разом з аналізом електричних схем. Аналогічно електричним струмам у ланцюгах, у системі існують теплові потоки від переходів у навколишнє середовище. Чим нижче робоча температура переходу, тим вище надійність пристрою. Знизити температуру переходів під час функціонування апаратури можна за допомогою спеціальних тепловідводів, вентиляторів (кулерів) або

отворів в корпусі для природної конвекції повітря. Такі ж заходи застосовуються для охолодження інших елементів схем: конденсаторів, трансформаторів, котушок, резисторів, реле та ін. Додатковими джерелами тепла можуть бути електричні навантаження та ряд інших факторів, наприклад, близькість до елементів, що нагріваються. Ці особливості корелюють з кількістю компонентів у пристрої та є небажаними факторами ризику для надійності електронного обладнання.

## 2.5 Методи і засоби збільшення надійності ПНЧ

Надійність пристрою можна умовно визначити як ймовірність того, що пристрій коректно працюватиме протягом зазначеного проміжку часу. Головне завдання при розробці полягає у розрахунку терміну служби, оскільки він має бути вказаний у документації до того, як пристрій перейде у користування. Визначити термін служби експериментальним шляхом важко, інколи неможливо через великі часові витрати. Існує декілька поширених параметрів для оцінки надійності роботи електронних пристроїв:

- безвідмовність - властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу;
- довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту;
- ремонтпридатність – властивість об'єкта, що полягає у пристосованості до підтримки та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування та ремонту;
- збереженість – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують його здатність виконувати необхідні функції під час зберігання, а також під час транспортування та після неї.

У разі, якщо об'єкт не підлягає ремонту, використовується термін «напрацювання до відмови» – напрацювання від початку експлуатації до виникнення першої відмови (еквівалент у англійській літературі – MTTF (mean



time to failures). Найчастіше виробник вказує гарантійний термін (lifetime warranty), протягом якого параметри виробу відповідають тим, що в документації. Методики прогнозування надійності закріплені у стандарті MIL-HDBK-217.[22]

У результаті прогнозування надійності одержують коефіцієнт, що описує складну систему через ступінь інтенсивності відмов. Прогнозування доцільно використовувати для попередньої оцінки надійності та експлуатаційних витрат. При оцінці надійності за стандартом MIL-HDBK-217 передбачається, що інтенсивність відмов постійна. В реальності вона залежить від великої кількості факторів, зокрема від умов експлуатації і терміну служби компонентів.

При оцінці головних показників надійності пристроїв необхідно мати довідкові дані про показники відмов елементів. Основною характеристикою безвідмовності елементів є інтенсивність відмов  $\lambda_0$ . Значення  $\lambda_0$  приймається постійним протягом певного напрацювання, що також вказується в технічній документації, і відповідає номінальному електричному режиму та нормальним умовам експлуатації.

Розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмов  $\lambda_{\Sigma}$  окремих груп напівпровідникових приладів виконується за такими математичними моделями:

- для біполярних низькочастотних транзисторів (частота менше 200 МГц)

$$\lambda_e = \lambda_B \cdot K_T \cdot K_{\Phi} \cdot K_D \cdot K_S \cdot K_Q \cdot K_E, \quad (2.3)$$

- для польових низькочастотних транзисторів (р- та n-канальні кремнієві, частота менше 400 МГц)

$$\lambda_e = \lambda_B \cdot K_T \cdot K_{\Phi} \cdot K_Q \cdot K_E, \quad (2.4)$$

де  $\lambda_B$  – базова інтенсивність відмов (табличні дані [22],  $\lambda_B \times 10^{-6}$  1/г):

- транзистори низькочастотні біполярні - 0,00074;
- транзистори польові низькочастотні: МОП (MOSFET) - 0,012;
- транзистори польові з р-n-переходом (JFET) - 0,0045.

Розрахунок коефіцієнта режиму  $K_T$  залежно від температури переходу здійснюється за формулою (2.5):

$$K_T = e^{-B_a \left( \frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{298} \right)}, \quad (2.5)$$

де  $T_{\Pi}$  – температура переходу за Цельсієм;

$B_a$  – коефіцієнт, для транзисторів низькочастотних біполярних – 2114, для польових – 1925.

Розрахунок коефіцієнта  $K_D$  залежно від максимально допустимої потужності (струму) приладу для біполярних транзисторів:

- при потужності (Вт)  $\leq 0,1$ ,  $K_D = 0,43$ ;
- при потужності (Вт)  $> 0,1$ ,  $K_D = (P_{\max})^{0,37}$ ,

де  $P_{\max}$  максимально допустима потужність, що розсіюється, Вт.

Значення коефіцієнта  $K_{\Phi}$  залежно від функціонального призначення приладу зведено до (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 - Значення коефіцієнта  $K_{\Phi}$  залежно від режиму роботи приладу

Тип транзисторів	Режим роботи	$K_{\Phi}$
Біполярні низькочастотні транзистори	Лінійне підсилення	1,5
	Перемикання	0,7
Польові низькочастотні транзистори	Перемикання слабкого сигналу	0,7
	Лінійне підсилення ( $P < 2$ Вт)	1,5
	Підсилення ( $P \geq 2$ Вт):	
	$2 \leq P < 5$ Вт	2
	$5 \leq P < 50$ Вт	4
	$50 \leq P < 250$ Вт	8
	$P \geq 250$ Вт	10

Розрахунок коефіцієнта  $K_S$  залежно від електричного навантаження

$$K_S = 0,045 \cdot e^{3,1 \cdot S}. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт навантаження за напругою  $S$  визначається як  $S = \frac{U_{KE \text{ роб}}}{U_{KE \text{ ном}}}$ ,

де  $U_{KE \text{ роб}}$  - напруга колектор-емітер у робочому режимі;

$U_{KE \text{ ном}}$  - гранично допустима (номінальна) напруга колектор-емітер.

Значення коефіцієнта рівня якості  $K_Q$  вибирають з таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Значення коефіцієнта рівня якості  $K_Q$ 

Рівень якості за MIL-S-19500	$K_Q$
JANTXV	0,7
JANTX	1,0
JAN	2,4
Нижчий рівень якості	5,5
Пластикові	8
Рівень якості невідомий	10

Коефіцієнт впливу жорсткості умов експлуатації  $K_E$  за звичайних умов діяльності приймаємо рівним 1.1 згідно даних стандартів США [22] та Китаю [23].

Тепловий аналіз проекту електронної схеми чи системи є невід'ємним етапом проектування. Усі теплові проблеми мають бути розглянуті на початковому етапі, доки вартість їх вирішення мінімальна. Якщо відмова, пов'язана з тепловим навантаженням компонента, ідентифікується на заключних етапах роботи над проектом, витрати на виправлення виявлених помилок можуть бути дуже значними. Напівпровідникові пристрої надійніші за знижених температур переходів, тому рекомендується вибирати їх робочі точки таким чином, щоб вони не працювали поблизу граничних значень параметрів. Навіть при використанні обладнання в найжорсткіших робочих умовах температури переходів не повинні перевищувати певних меж. Для зниження температури елементів необхідно використовувати тепловідведення та вентиляцію. У деяких випадках у потужному обладнанні може знадобитися безперервна примусова вентиляція. Рекомендовані температури переходів – не вище 125°C. Це підвищує надійність пристрою.

Однак надмірні вимоги щодо охолодження системи можуть призвести до різкого збільшення її вартості без істотного зниження температури. Аналогічно збільшення швидкості повітряного потоку при примусовій вентиляції після певного значення не призводить до охолодження компонентів. Тому задля досягнення мети збільшення надійності ПНЧ великої потужності, необхідне

проведення якісного теплового аналізу та пошук оптимального співвідношення між ступенем охолодження та вартістю обладнання.

Згідно стандарту MIL-HDBK-202 [24] (Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts), рекомендації щодо усунення проблем, пов'язаних з перегріванням, віглядають наступним чином:

- чутливі до нагрівання елементи, наприклад електролітичні конденсатори і напівпровідникові пристрої, необхідно розміщувати окремо від інтенсивних джерел тепла, таких як дротяні резистори, потужні діоди, транзистори і регулятори напруги, встановлені на тепловідводах;
- навколо тепловідведення повинні бути створені хороші умови для циркуляції повітря;
- інтенсивність охолодження тепловідведення тим вища, чим більша площа його поверхні;
- при необхідності в корпусі пристрою повинні бути виконані вентиляційні отвори;
- оцініть кількість тепла, що розсіюється компонентами в найжорсткіших умовах експлуатації, та відкорегуйте ваш тепловий проект;
- вибір тепловідводів і вентиляторів необхідно провести на початковому етапі проектування, оскільки доробки, пов'язані з їхньою присутністю, скорочують корисний простір обладнання та погіршують циркуляцію повітря;
- вимоги до охолодження повинні визначатися призначенням обладнання та ступенем його надійності. Достатнім коефіцієнтом зниження температури переходів і розсіюваної потужності вважається 80%;
- для оцінки температури переходів критичних напівпровідникових пристроїв та внутрішніх температур інших компонентів рекомендується провести моделювання теплових процесів у системі;
- найбільш якісне моделювання теплових процесів у системі проводиться за допомогою спеціальних пакетів програм.

## 2.6 Програмне моделювання теплових процесів

В основі більшості сучасних потужних пакетів програм лежить метод кінцевих елементів (КЕ) – один із найпоширеніших сучасних чисельних методів.

Суть методу полягає в розбитті деякої області, в якій потрібний параметр змінюється за складним законом, на безліч підобластей, пов'язаних між собою в точках дотику. Закон зміни невідомого параметра у цих підобластях передбачається відомим, наприклад лінійним. Сукупність КЕ, на які розбита конструкція, називається елементною сіткою (рис 2.19).

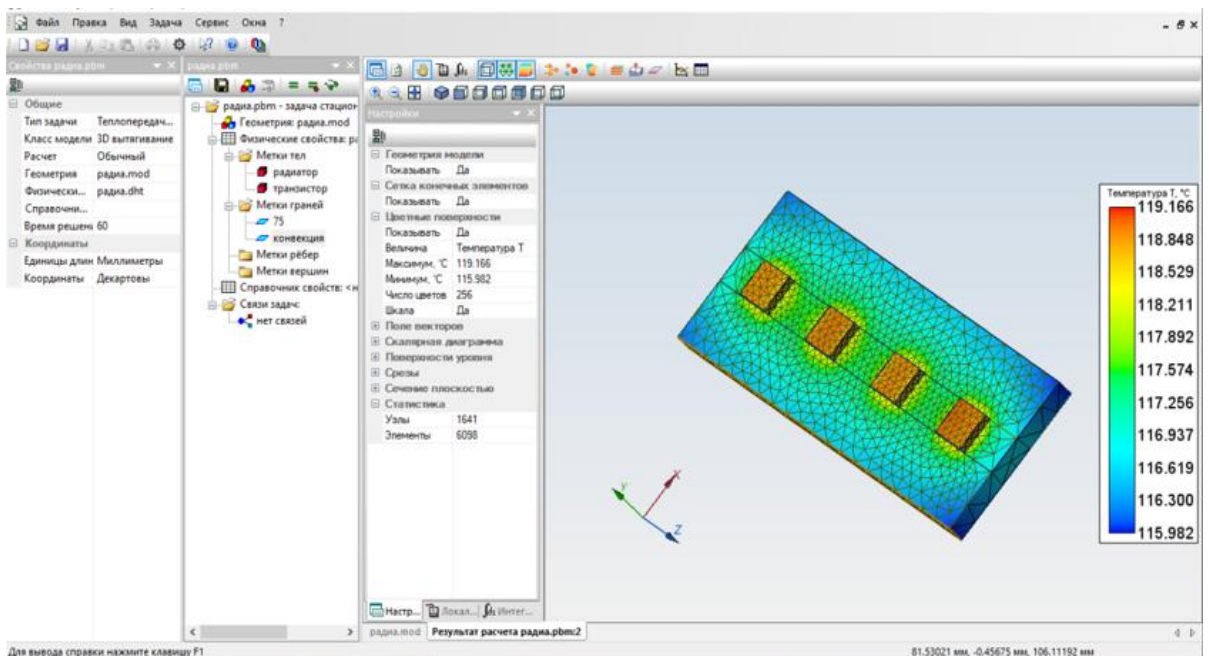


Рисунок 2.19 - Елементна сітка методу кінцевих елементів, побудована програмою QuickField.

Зазвичай в програмах для моделювання теплових процесів елементна сітка (Mesh) складається з трикутних пірамід – КЕ, з'єднаних між собою у вершинах (вузлах сітки (Node)). Для обчислення розподілу температури в тілах, температура використовується як невідомий параметр, а результатом є значення температури в кожному вузлі сітки.

## 2.6.1 Програмний пакет корпорації SOLIDWORKS

SOLIDWORKS Flow Simulation [25] — це загальна параметрична програма моделювання потоку, яка використовує метод кінцевого об'єму. Вона дозволяє розрахувати характеристики пристрою за сценаріями «що-якщо» і використовувати отримані результати для оптимізації.

За допомогою SOLIDWORKS Flow Simulation можливо аналізувати потоки та теплопередачу в пристроях перед їх виготовленням (рис.2.20), таким чином мінімізувати зусилля, необхідні для фізичного тестування та створення прототипів. Програмний пакет дозволяє:

- обчислювати стаціонарні та перехідні, внутрішні або зовнішні потоки в 2D і 3D
- можливість використовувати різні рідини, гази, неньютонівські рідини та суміші
- враховувати теплопередачу та гравітаційні ефекти
- визначати власні матеріали та граничні умови в технічній базі даних

Модуль SOLIDWORKS Electronics Cooling дозволяє проводити точний термічний аналіз електронних друкованих плат і конструкцій корпусів.

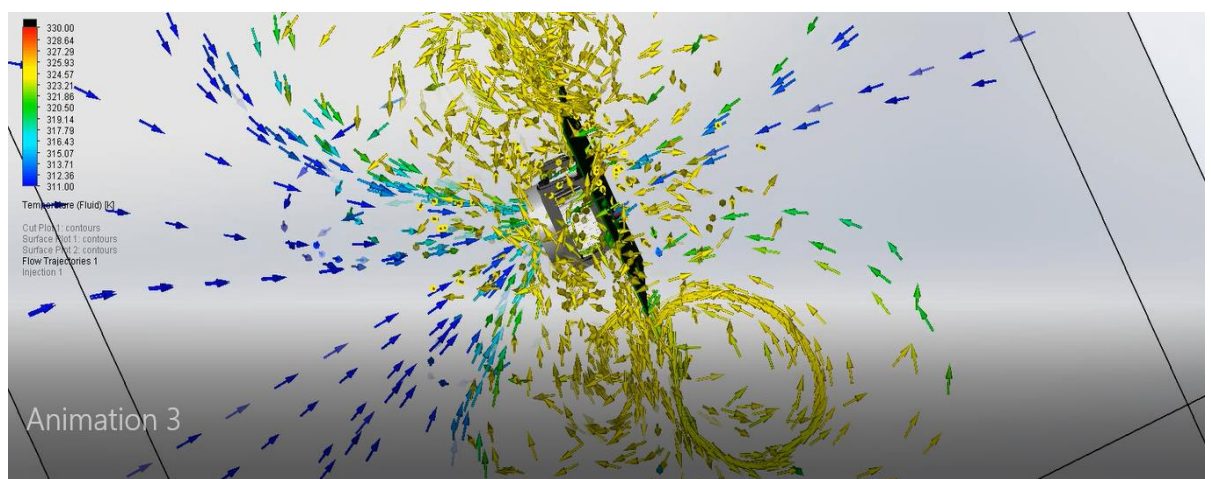


Рисунок 2.20 - Аналіз потоків та теплопередачі в пристрої з примусовим охолодженням за допомогою програми SOLIDWORKS Flow Simulation

## 2.6.2 Програмний пакет фірми Siemens

Simcenter Flotherm XT є провідним програмним рішенням для моделювання охолодження електроніки від фірми Siemens [26]. Це скорочує час розробки на рівні мікросхем, друкованих плат і корпусів, а також великих систем. Simcenter Flotherm XT підтримує управління температурним режимом і прийняття рішень на основі моделювання, починаючи з ранніх етапів розробки архітектури і закінчуючи остаточною перевіркою термічного аналізу. Це допомагає усунути ризики надійності, гарантійних витрат або будь-яких пізніх перерахунків. Функції, які допомагають інженерам скоротити процес термічного аналізу, включають: інноваційну технологію SmartPart, великі бібліотеки (рис. 2.21), обробку даних, адаптовану та стабільну технологію розв'язувачів, найсучасніші компактні методи теплового моделювання, автоматичне калібрування моделі, параметричний аналіз та оптимізацію. Термічний аналіз використовує миттєву декартову сітку, яка підходить для великих, складних моделей електроніки з 1000 компонентами, матеріалами та потужностями. Елементна сітка та розв'язувач Simcenter Flotherm розроблені для роботи з різними масштабами довжини, від субмікронів до метрів.

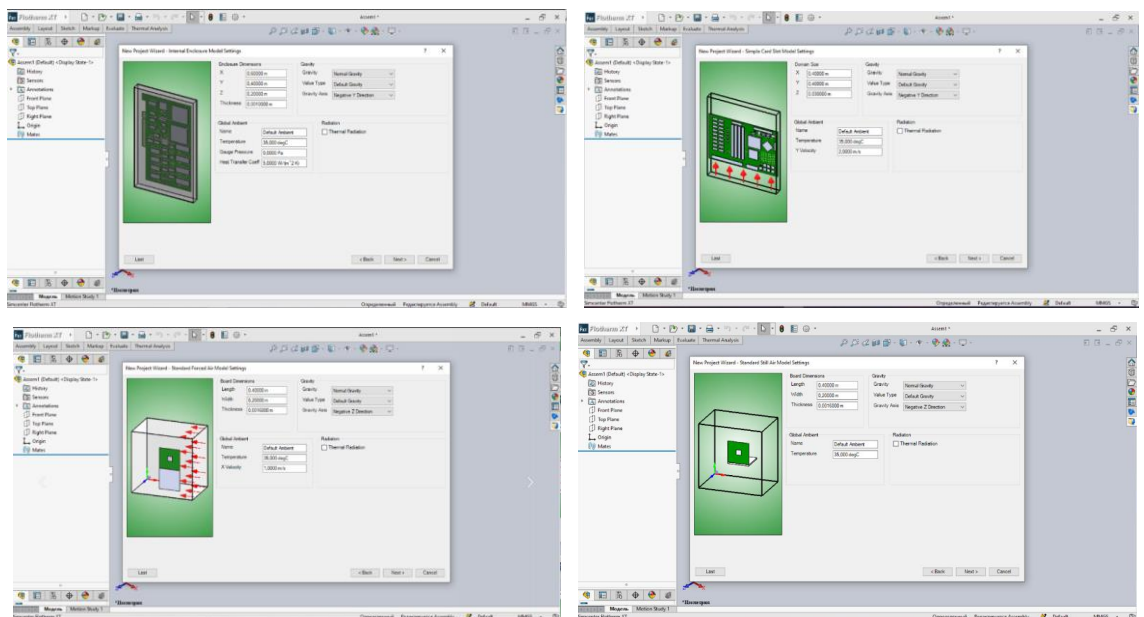


Рисунок 2.21 – База теплових конфігурацій Simcenter Flotherm XT



### 2.6.3 Програмний пакет фірми Tera Analysis

QuickField є головним продуктом Tera Analysis [27]. Цей інтерактивний програмний пакет для багатопрофільного інженерного аналізу та проектування дозволяє оптимізувати електричні, теплові та механічні характеристики пристроїв в одному пакеті. Крім того, результати різних аналізів можуть бути пов'язані між собою, що робить його здатним для моделювання ефектів багатопольового зв'язку.

QuickField може вирішувати завдання теплопередачі (рис. 2.19) (стаціонарні та нестаціонарні) у лінійній та нелінійній постановках, дозволяє задавати джерела тепла в блоках, ребрах або окремих вершинах моделі. Джерело, задане у конкретній точці площини  $xy$  описує нагрівач у вигляді струни, слідом якою служить дана точка площини, і задається потужністю тепловиділення на одиницю довжини. В осесиметричному випадку точкове джерело поля представляється нагрівачем у вигляді кола навколо осі симетрії або як точкове джерело, розташоване на осі.

### 2.6.4 Програмний пакет корпорації ANSYS

Програмне забезпечення для моделювання Ansys пропонує технологічно провідні рішення практично для будь-яких завдань моделювання [28]. Функціонал охоплює всі етапи моделювання на базі технологічної платформи Ansys, що дозволяє користувачам розв'язувати завдання для будівельної механіки, механіки рідини, електромагнетики, мультифізики та моделювання систем, а також мультифізичних симуляцій теплопередачі та оптики.

Програмний модуль ANSYS FLUENT має широкий спектр можливостей для моделювання потоків рідини та газу для промислового застосування з урахуванням турбулентності, теплообміну та хімічних реакцій. FLUENT моделює такі завдання, як горіння в печах, потік всередині бульбашкової колони, зовнішній потік навколо нафтових платформ, потік в кровоносній системі,

конвективне охолодження напівпровідникової збірки, вентиляція в приміщеннях і моделювання промислових стоків. Спеціалізовані моделі обертових та стаціонарних обчислювальних областей і багатофазних потоків значно розширюють сфери застосування програмного продукту.

ANSYS FLUENT пропонує повний набір інструментів для моделювання конвекції, теплопровідності та теплового випромінювання. Доступні моделі для аналізу випромінювання в оптично товстому середовищі, а також модель «поверхня-поверхня» (заснована на випромінювальній здатності) для прозорого (не бере участь) середовища. Дискретна ординатна модель підходить для будь-якого середовища, в тому числі і для скла. Модель теплового навантаження від сонячного випромінювання дозволяє враховувати цей фактор для відповідних розрахунків.

### **2.6.5 Програмний пакет фірми PTC**

Програмний пакет Creo Simulation від розробника PTC Products [29] дозволяє проводити стаціонарний термічний аналіз за такими напрямками:

- імітація впливу температури на пристрій
- аналіз кондукційного і конвекційного теплообміна
- розподіли з можливістю налаштування, що дозволяє застосувати навантаження до геометрії
- перенесення результатів термічного аналізу в структурний аналіз для аналізу відповідного впливу
- теплове навантаження.

Також можливий перехідний та нелінійний термічний аналіз за напрямками:

- температурно залежні конвекції
- радіаційний теплообмін
- властивості матеріалу, залежні від температури
- залежні від часу граничні умови.

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ПНЧ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ**

Тепловий розрахунок вихідних силових каскадів підсилювача є одним з найважливіших етапів процесу досліджень, що дозволяє підтвердити правильність вибору та застосування електронних компонентів, запропонованих компонувальних рішень та багато в чому визначає надійність роботи пристрою, що є головним критерієм і метою наявного дослідження.

*Метод дослідження складається из наступних послідовних дій:*

- проведення аналізу існуючих ПНЧ великої потужності на предмет топології основних елементів та тепловивідної системи;
- проведення аналізу сучасних схемотехнічних рішень та визначення критеріїв потужності, виходячи зі сфери застосування підсилювача;
- визначення граничних умов побудови власної моделі, виходячи з сучасних технічних стандартів;
- побудова кількох конкуруючих власних моделей з різною топологією елементів та тепловивідної системи;
- визначення критерію успішності власної моделі, наприклад, критерій надійності;
- проведення комп'ютерної симуляції власних моделей програмними засобами на основі методу кінцевих елементів;
- вибір кращих результатів, виходячи з обраних критеріїв;
- детальний розрахунок кращих варіантів власної моделі та подальші рекомендації щодо макетування.

#### **3.1 Теплофізична модель силових транзисторів вихідного каскада ПНЧ**

Граничні дані струму і напруги силового транзистора зазвичай виносять в заголовки технічних характеристик, що не дає достатньо даних для розрахунку,

а лише дозволяють у першому наближенні порівняти один елемент з іншим. Складність вибору компонента полягає і в тому, що бажано максимально використовувати його потужні характеристики, щоб не платити зайвих грошей за невиправданий запас потужності. Великі значення допустимих імпульсних струмів (у 5-10 разів можуть перевищувати значення середнього струму) створюють у розробника ілюзію, що транзистори можуть працювати в режимі перевантаження, що насправді абсолютно неприпустиме.

Для оцінки правильності вибору елемента існує лише один критерій – температура кристала у найбільш напруженому режимі роботи.

Основні витрати в силових транзисторах та модулях створюються безпосередньо в кристалі. Тепло, що виділяється напівпровідниковим кристалом, відводиться через корпус елемента на тепловідведення і далі в довкілля. Градієнт температур між кристалом і навколишнім повітрям є функцією потужності, що розсіюється, і теплових опорів матеріалів, з яких складається корпус елемента, і матеріалів тепловідведення.

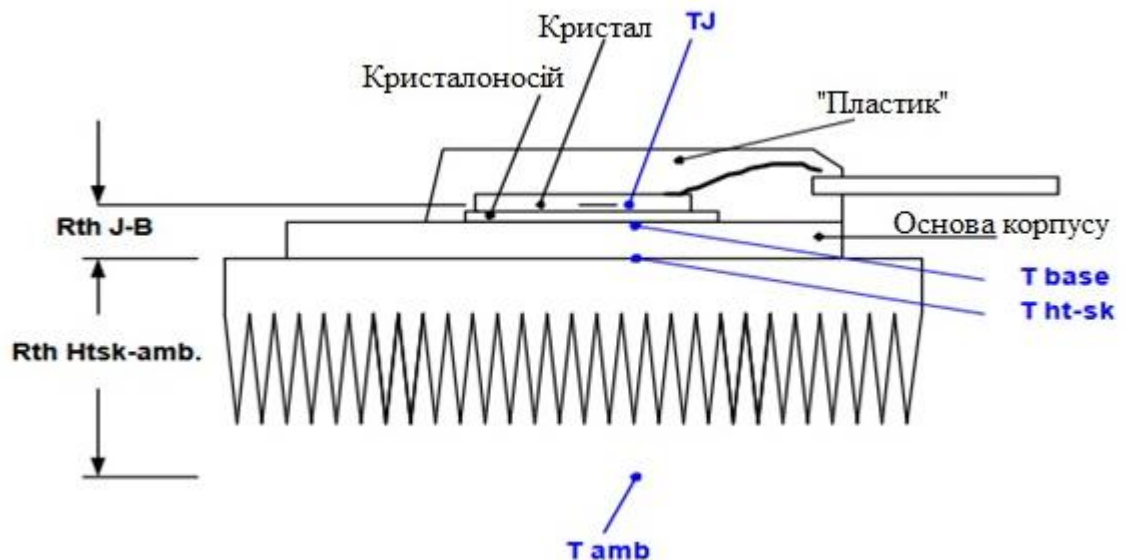


Рисунок 3.1 – Теплова структура транзистор – радіатор

На (рис. 3.1) [30] показані основні елементи конструкції, що беруть участь в процесі теплопередачі. Корпус транзистора в даному випадку - пластмасовий, має металеву основу, з'єднану з колектором (ТО-220, ТО-247, ТО-263).

Між корпусом транзистора та теплостоком (радіатором) зазвичай встановлюється ізолююча підкладка, яка також впливає на теплові режими.

На (рис. 3.1) позначені наступні елементи теплової структури:

- $R_{thjs}$  - тепловий опір кристал - тепловідведення;
- $R_{thsa}$  - тепловий опір тепловідведення - навколишнє середовище;
- $T_j$  – температура кристала;
- $T_b$  - температура корпусу в районі контакту з кристалом;
- $T_s$  - температура теплостоку в районі контакту з корпусом транзистора;
- $T_{amb}$  – температура навколишнього середовища.

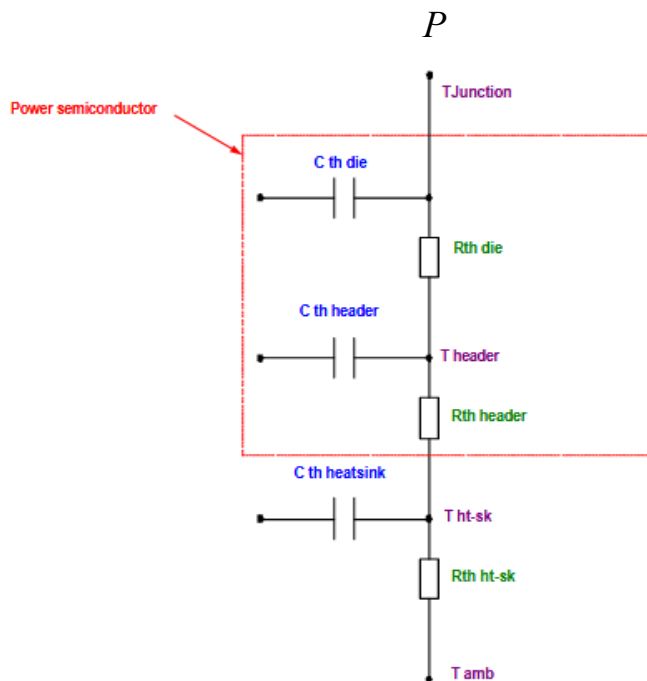


Рисунок 3.2 – Еквівалентна теплова схема за електротепловою аналогією

На (рис. 3.2) показано еквівалентну теплову схему конструкції, наведеної на (рис. 3.1). На схемі розглянуті 2 компоненти, що надають основний вплив на теплові режими роботи силового транзистора - кристал і тепловідвідна основа корпусу, де:

- $C_{thd}$ ,  $R_{thd}$  - теплоємність та тепловий опір кристала;
- $C_{thh}$ ,  $R_{thh}$  - теплоємність та тепловий опір корпусу транзистора;
- $C_{ths}$ ,  $R_{ths}$  - теплоємність та тепловий опір теплостоку;
- $P$  - середній тепловий потік (Вт).

Тепло, що виділяється в місці з'єднання, протікає через кристал кремнію, корпус, прокладку, а потім до радіатора. Температура переходу підвищується вище температури навколишнього середовища пропорційно цьому тепловому потоку та тепловому опору між контактами та навколишнім середовищем. Тепловий опір визначає температурний градієнт у стані, що встановився, а теплова ємність дозволяє моделювати перехідні теплові процеси (в нашому випадку не є предметом розгляду через швидкість звукових сигналів відносно теплової інерції системи транзистор-радіатор).

У більшості конкретних застосувань транзистор встановлюється на теплосток (радіатор), і теплова поведінка всієї конструкції залежить від параметрів теплостоку та способу охолодження. Для розрахунків параметрів надійності, нас насамперед цікавить градієнт температури між кристалом та навколишнім середовищем.

### **3.2 Дослідження температурного стану ПНЧ великої потужності за ознаками різних компоувальних рішень**

На підставі проведеного детального аналізу компоувань ПНЧ великої потужності оберемо два типи моделей, які можуть бути використані як найкращі прототипи для здійснення нашого дослідження.

В якості першого прототипу компоувального рішення розглянемо підсилювач фірми GZbotolave КА - 7200, описаний у першому розділі (рис.1.15).

Система охолодження при цьому поодинокі і розташована посередині корпусу ПНЧ. Приплив холодного повітря забезпечується за рахунок перфорації верхньої та нижньої корпусних панелей, а вихід нагрітого повітря через його задню стінку.

На підставі сказаного вище, створимо в 3D редакторі програми Simcenter Flotherm XT першу спрощену модель ПНЧ великої потужності із схожою топологією системи примусового охолодження, і позначимо її як МОДЕЛЬ 1.

Потужні вихідні транзистори кріпляться кожній з бічних стінок повітроводу системи примусового охолодження, силові трансформатори і великогабаритні ємності блоку живлення винесені вперед, щоб зменшити тепловий вплив нагрітого повітря та зробити більш рівномірним розподіл маси за площею основи.

У якості другого прототипа компоувального рішення для дослідження розглянемо підсилювач Yamaha T4n [4], детально описаний у першому розділі. Зовнішній вигляд підсилювача та його компоування показані на (рис. 1.4).

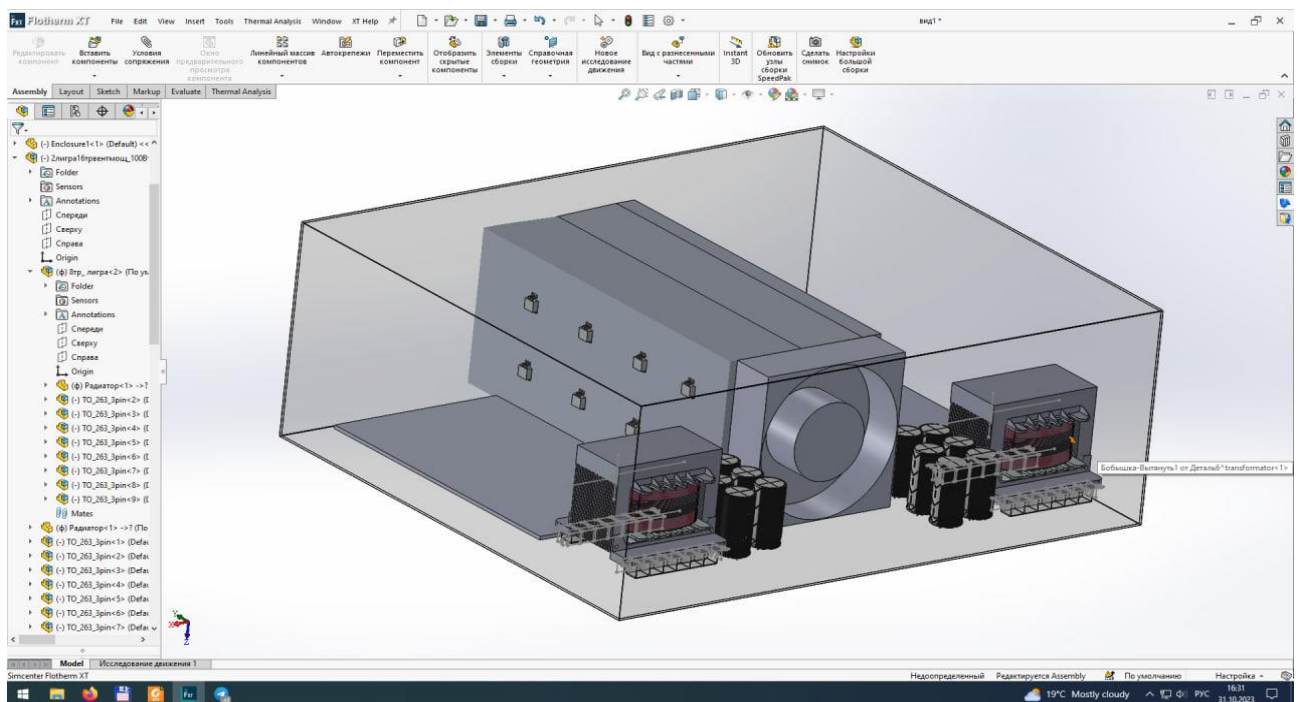


Рисунок 3.3 – Побудова компоувального рішення МОДЕЛЬ 1

Система охолодження цього підсилювача являє собою два алюмінієві профілі, симетрично розташовані біля його бічних стінок. При цьому плати підсилювача кріпляться до бокових стінок профілю, а вихідні транзистори до його верхньої частини. Так як корпус даного ПНЧ виконаний у форматі Rack, то приплив холодного повітря здійснюється через два повітроводи на передній панелі корпусу, а вихід нагрітого повітря здійснюється через перфоровані отвори на задній стінці. Особливістю підсилювача є те, що примусове охолодження



(кожного з двох каналів) здійснюється не тільки вихідних транзисторів, що дають максимальний внесок у тепловиділення, а й несучої друкованої плати.

У пропонованій другій моделі (МОДЕЛЬ 2), створеній в 3D редакторі програми Simcenter Flotherm XT (рис. 3.4), потужні вихідні транзистори кріпляться на бічних стінках повітроводу системи примусового охолодження ближче до центра корпусу, силові трансформатори і великогабаритні ємності блоку живлення винесені вперед, щоб зменшити тепловий вплив нагрітого повітря та зробити більш рівномірним розподіл маси за площею основи – передбачається, що дві системи охолодження будуть приблизно врівноважені за масою трансформаторами та електролітичними ємностями.

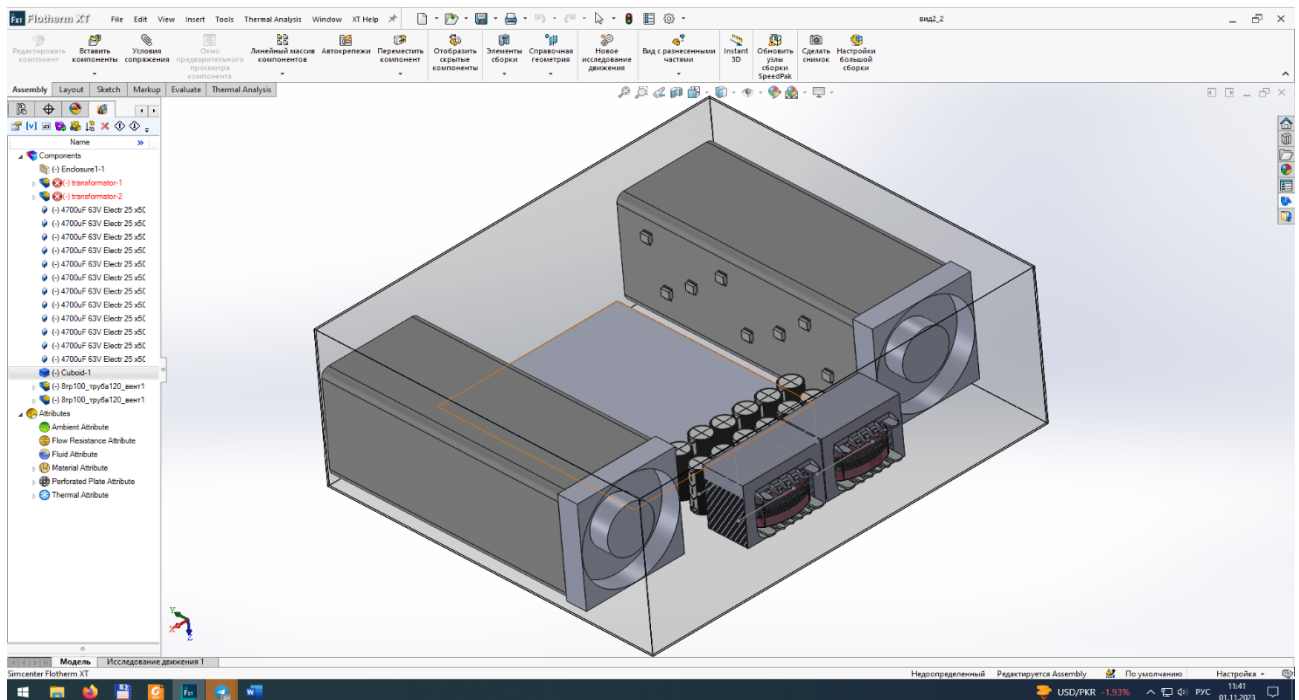


Рисунок 3.4 – Побудова компоувального рішення МОДЕЛЬ 2

Для проведення дослідження встановимо граничні умови для двох запропонованих конкуруючих типів компоновок ПНЧ великої потужності.

Як перша гранична умова, прийнята на підставі аналізу ПНЧ у першому розділі, приймемо обмеження, що накладаються на внутрішню топологію при використанні корпусу стандарту Rack розміром у два юніти (Додаток А).

Як друга гранична умова, прийнята на підставі аналізу схемотехнічних рішень ПНЧ у другому розділі, приймемо обмеження, що накладаються на вихідну потужність підсилювача – не менше 1600 Вт. Це означає, що при гіршій ефективності (підсилювачі класу АВ, G) і мінімальному ККД в 50%, теплова потужність вихідних каскадів, що розсіюється, повинна бути не менше 800 Вт.

Оскільки основним критерієм успішності запропонованого дослідження є отримання компонуального рішення підсилювача максимальної надійності, то в якості нього приймається  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або заданого напрацювання відмова пристрою не виникне, що є часовою функцією експлуатаційної інтенсивності відмов  $\lambda_e$ . При використанні методу заморожених коефіцієнтів,  $\lambda_e$  за формулою (2.3) прямо пропорційна коефіцієнту режиму  $K_T$ , залежність від температури переходу якого здійснюється за формулою (2.5).

Таким чином, найкращим із запропонованих компонувальних рішень буде таке, що при дотриманні граничних умов, забезпечить мінімальну температуру переходу  $T_{\pi}$  вихідних транзисторів.

### **3.2.1 Дослідження термопрофілю компонуального рішення ПНЧ за МОДЕЛЮ 1**

В якості основи системи розсіювання теплової енергії нашого першого дослідження візьмемо стандартний профіль 120 x 120 мм завтовшки 5 мм з екструдованого алюмінію, для чого внесемо його з міжнародної бази даних програми SOLIDWORKS [25].

Потім за допомогою програмної «витяжки», перетворимо плоский профіль на повноцінну 3D модель системи охолодження. Довжину профілю встановимо 300 мм, вважаючи її достатньою для фізичного розміщення потужних вихідних транзисторів (рис. 3.5).

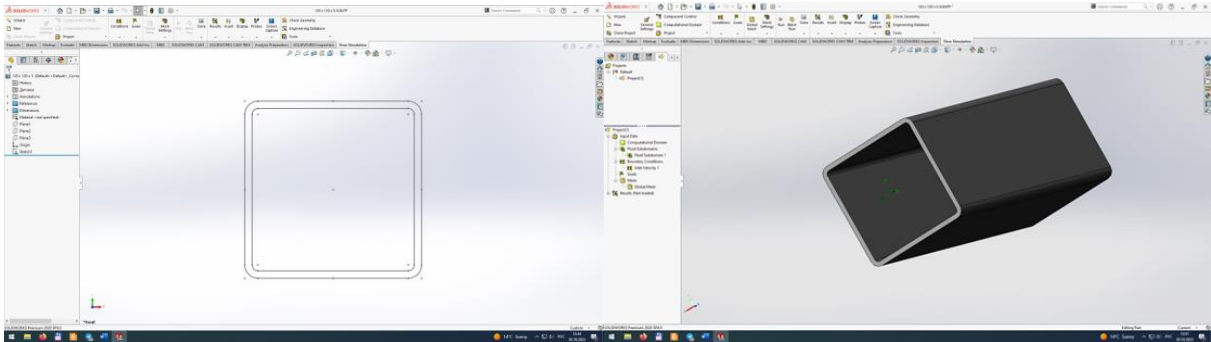


Рисунок 3.5 – 3D модель повітропроводу з алюмінієвого профілю

Вибір даних розмірів системи охолодження обумовлений граничними умовами наших досліджень, пов'язаними з необхідністю розміщення досліджуваного підсилювача великої потужності в стандартний корпус Rack, повністю закритий для повітряобміну з усіх боків, окрім передньої та задньої стінок.

Розмір повітропроводу при використанні примусового охолодження 120 x 120 мм дозволяє застосувати в системі вентилятори великого діаметра з низьким і дуже низьким рівнем власних шумів під час роботи. Це може бути важливим фактором при відтворенні музичного матеріалу з наявністю пауз після повного спектру (інерційність відпрацювання системи охолодження, коли в паузі після гучної музики вентилятори продовжують свою роботу).

Програмний продукт SOLIDWORKS Flow Simulation дозволяє відмінно розрахувати та симулювати ламінарні та вихрові потоки для цілей нашого дослідження, проте він не дозволяє зробити це одночасно з аналізом теплових процесів та розподілу теплових полів у твердих тілах (застосовуваний нами алюмінієвий повітропровід – «труба»). Також є суттєві проблеми при використанні різних версій цього програмного продукту – нові версії файлів, частин (parts) та збірок (assem) не сприймаються попередніми версіями програми.

Тому було прийнято рішення використовувати для аналізу та дослідження теплових потоків та розподілу температурних полів програмний продукт фірми

Сіменс Simcenter Flotherm XT 2023 року релізу, який у повному обсязі дозволить виконати поставлені завдання.

У першому дослідженні розмістимо систему охолодження типу «труба» по центру корпусу стандарта Rack. Використовуємо нижнє розміщення вихідних транзисторів по два на протилежних бокових сторонах "труби", припускаючи, що вони безпосередньо впаяні в друковану плату. Теплову потужність, що розсіюється кожним з транзисторів, приймаємо рівною та постійною 100 Вт, яка не залежить від часу та інших факторів (перехідних процесів в нашому дослідженні не торкаємося).

Використовуючи стандартний вентилятор діаметром 120 мм малої потужності, отримуємо розподіл температурного поля по поверхнях «труби» та температурні характеристики потоку повітря, що охолоджує (рис. 3.6). Результати дослідження вносимо до таблиці 3.1 за номером 1.

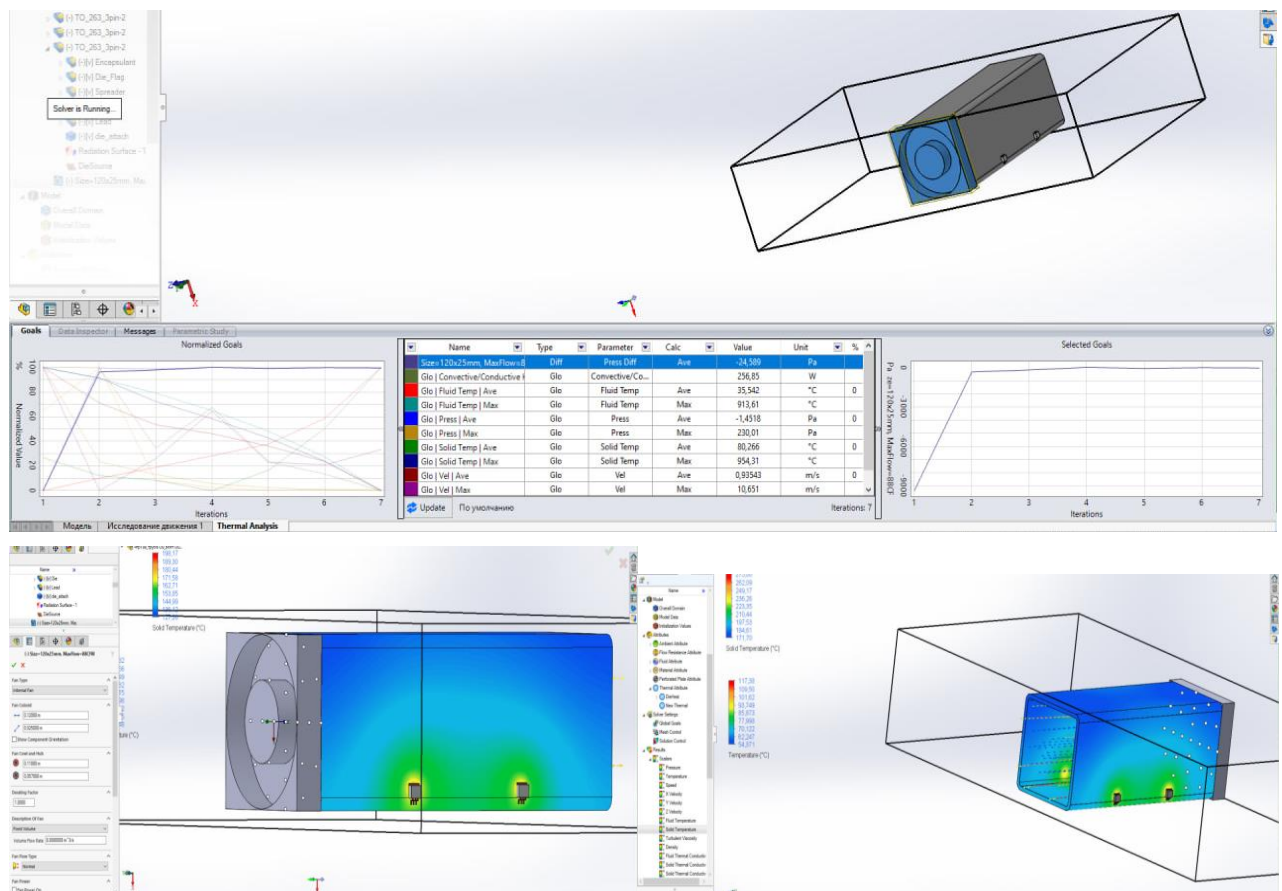


Рисунок 3.6 – Моделювання температурного поля по поверхнях «труби» з нижнім розташуванням джерел тепловиділення та температурних характеристик потоку охолоджуючого повітря програмним пакетом Simcenter Flotherm XT

Проведемо наступне дослідження, для чого змінимо розташування вихідних транзисторів на центральне, припустивши, що тепер вони впаяні в друковану плату через подовжувачі. Тепловою потужність, що розсіюється кожним з транзисторів, приймаємо також рівною та постійною 100 Вт. Використовуємо стандартний вентилятор діаметром 120 мм малої потужності. Результати програмної симуляції наведено на рис. 3.7. Результати дослідження вносимо до таблиці 3.1 за номером 2.

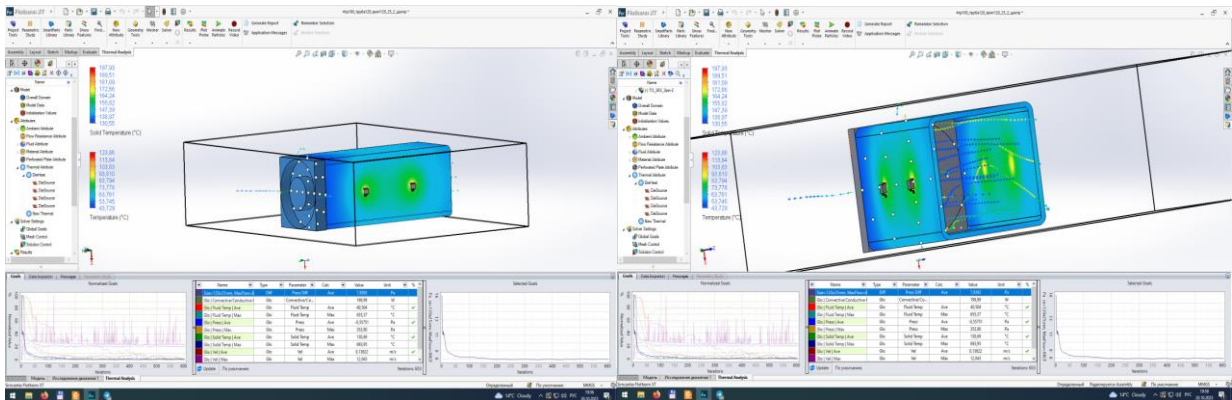


Рисунок 3.7 – Моделювання температурного поля по поверхнях «труби» з центральним розташуванням джерел тепловиділення

Проведемо наступне дослідження, для чого змінимо вентилятор на більш потужний. Результати програмної симуляції наведено на рис. 3.8. Отримали набагато кращий тепловий режим вихідних транзисторів. Результати дослідження вносимо до таблиці 3.1 за номером 3.

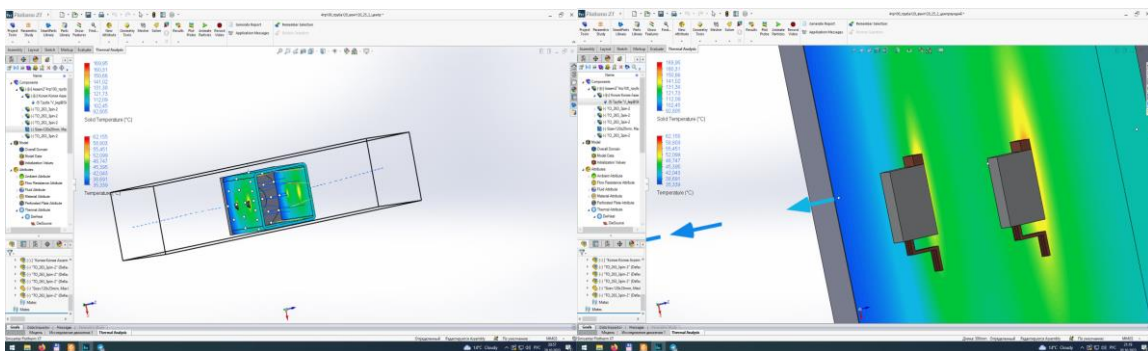


Рисунок 3.8 – Моделювання температурного поля силових транзисторів за підсиленням потоку охолоджуючого повітря



У розглянутих моделях вентилятор розміщений на вході системи охолодження, так як формування потоку щільного холодного повітря є кращим.

### 3.2.2 Дослідження термопрофілю компоувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЮ 2

Розглянемо альтернативну конкуруючу топологію розміщення системи охолодження (МОДЕЛЬ 2), коли використовуються дві однакові «труби» охолодження, кожна зі своїм вентилятором, які розміщені симетрично по краях корпусу.

Використовуємо для дослідження центральне розміщення транзисторів з нерівномірним кроком установки, їх кількість збільшуємо до 6, а потужність кожного приймаємо рівною 50 Вт. Ефективність вентилятора при цьому збільшуємо приблизно в 3 рази. Результат наявний на (рис. 3.9) та внесений до таблиці 3.1 за номером 4.

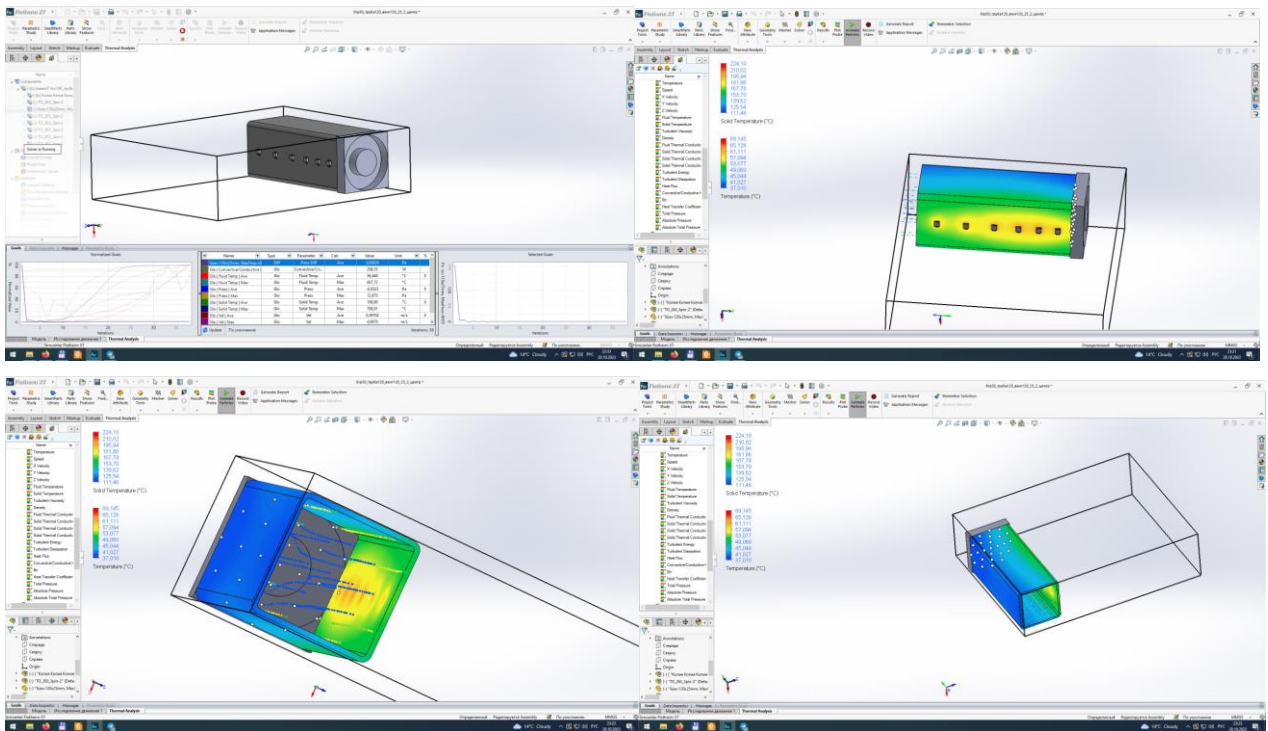


Рисунок 3.9 – Моделювання температурного поля по бічних поверхнях «труби» з центральним розташуванням джерел тепловиділення

Помістимо всередину «труби» з кожною з прилеглих до вихідних транзисторів сторін, алюмінієвий радіатор стандартного плоского профілю з бази даних програми Simcenter Flotherm XT. Очевидно, що теплове навантаження на кожен із транзисторів суттєво зменшилося, що дозволяє збільшити їх кількість з двох до восьми по 100 Вт (рис. 3.10). Навіть у цьому випадку теплові режими роботи транзисторів прийнятні і дозволяють реалізувати велику вихідну потужність підсилувача до 1600 Вт на плече в режимі АВ. Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номерами 5, 6.

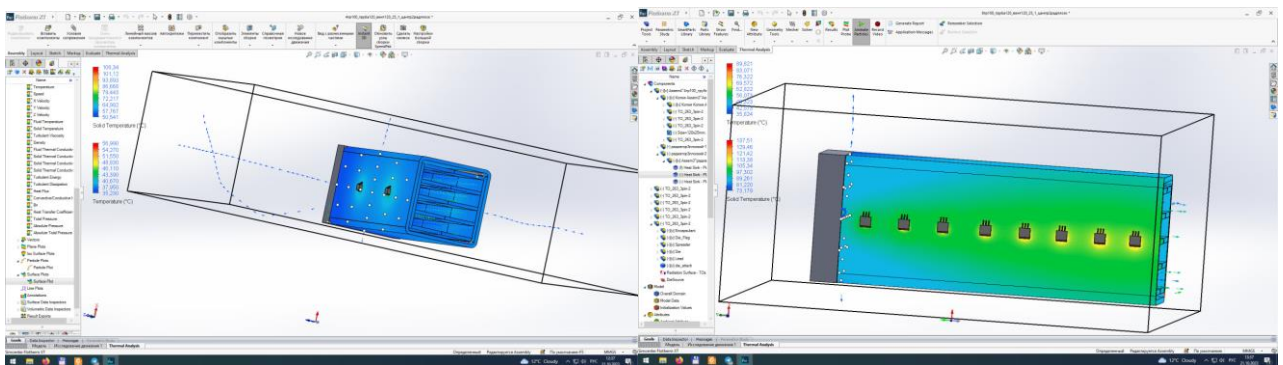


Рисунок 3.10 – Моделювання температурного поля по бічним поверхням «труби» з центральним розташванням 2 та 8 джерел тепловиділення з додатковими радіаторами всередині

Розміщення вихідних транзисторів «шахівкою» з одночасним видаленням одного з внутрішніх плоских радіаторів за результатами програмної симуляції дало гірший результат (рис. 3.11). Це пояснюється суттєвим зменшенням площі поверхні охолодження радіатора, що застосовується. Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 7.

Використання замість плоских радіаторів штирьових квадратного перерізу (рис. 3.12) (матеріал той самий – алюміній), показало за результатами симуляції найгірший результат порівняно з плоскими, що може бути пояснено переважанням вихрової складової потоку всередині «труби» над ламінарною та ефектом плівки при недостатній висоті штирів радіатора. Це призводить до зниження ефективності охолодження за інших рівних умов.



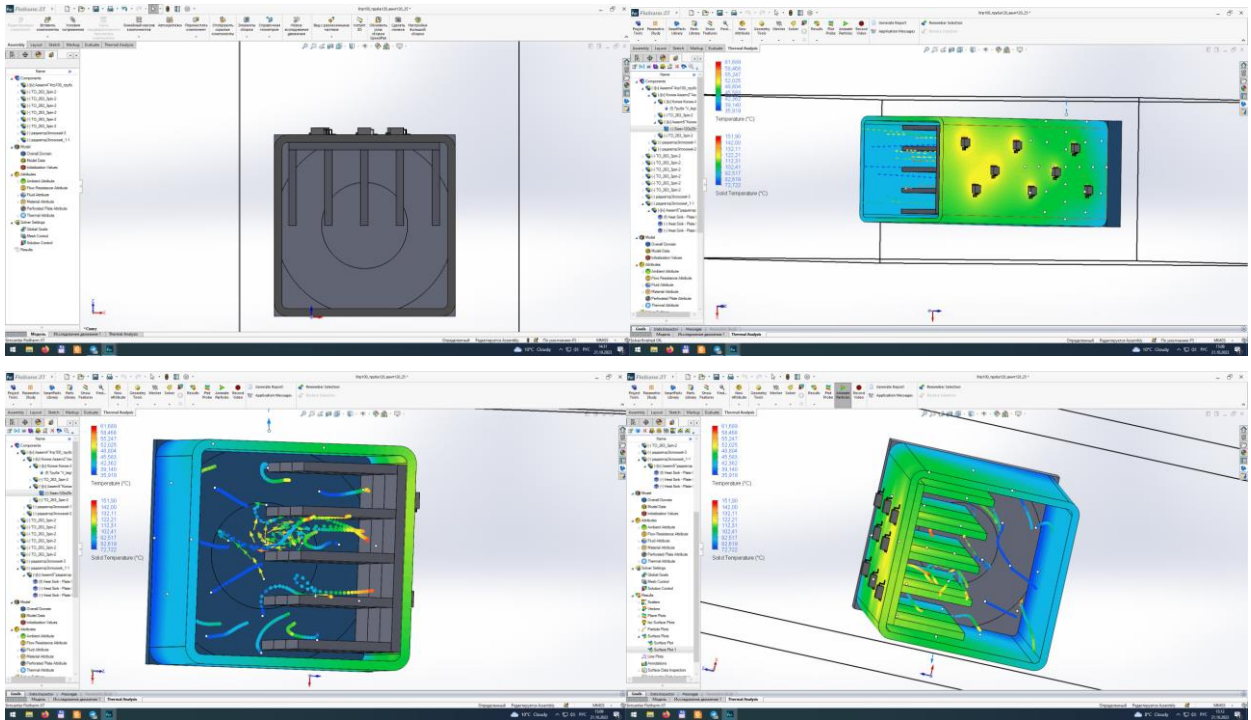


Рисунок 3.11 – Моделювання температурного поля по бічній поверхні «труби» з одним плоским радіатором всередині

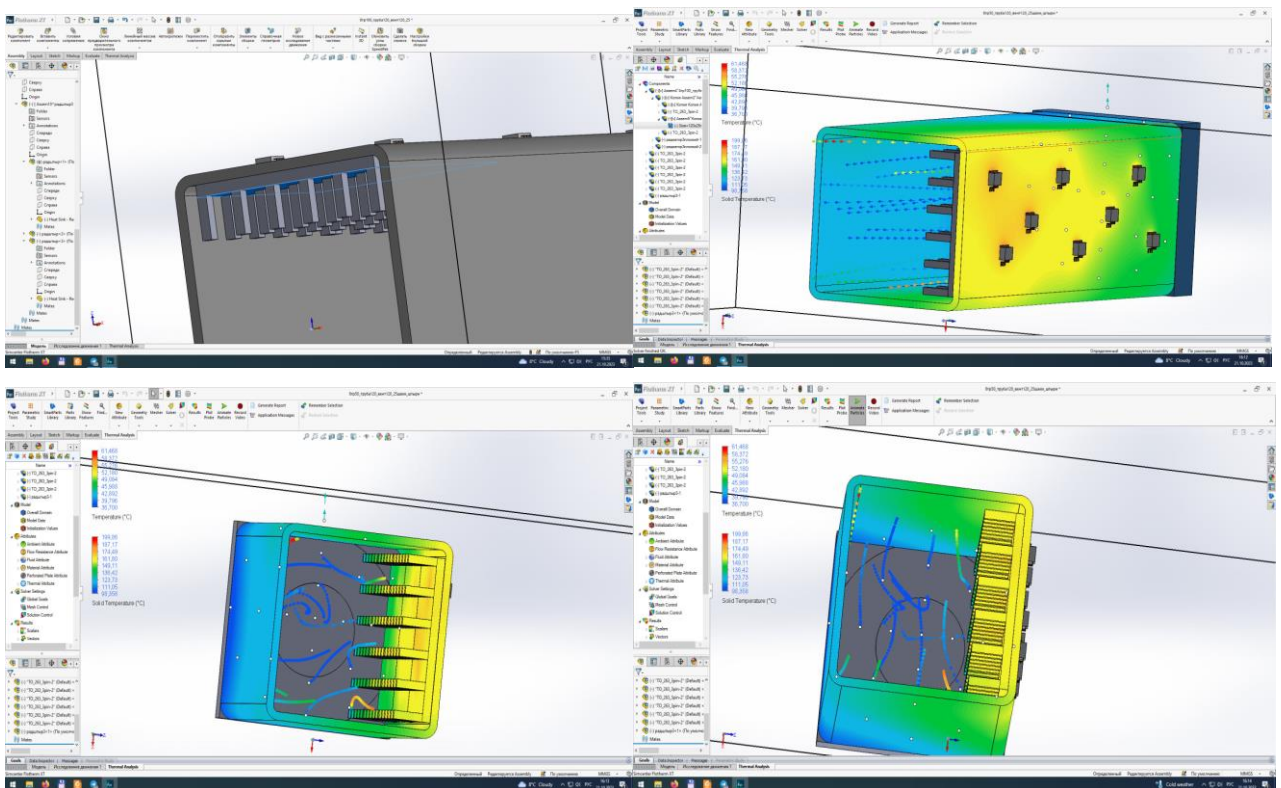


Рисунок 3.12 – Моделювання температурного поля по бічній поверхні «труби» з одним штирьовим радіатором всередині

Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 8.

Візьмемо стандартний широковикористовуваний радіатор охолодження профілю АВ2310 (Додаток Б) розміром 100 x 100 мм, зробимо з них трьох однакових віртуальну збірну одиницю 300 x 100 мм і помістимо її всередину нашої досліджуваної «труби» (рис. 3.13).

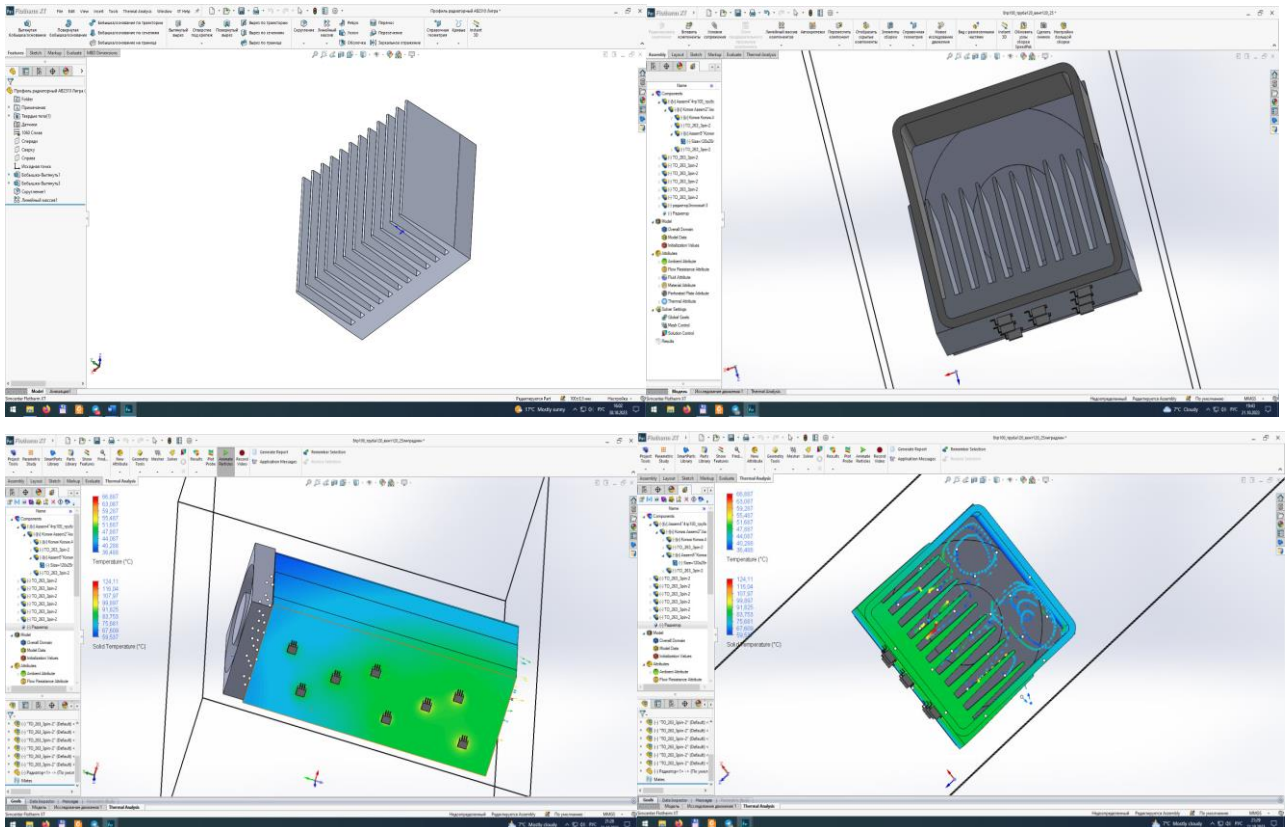


Рисунок 3.13 – Моделювання температурного поля по бічній поверхні «труби» з одним радіатором профілю АВ2310 всередині

Отримані позитивні результати пояснюються наявністю в «трубі» рівною мірою вихрового та ламінарного потоків, мінімальним ефектом плівки через достатню висоту ребер радіатора і дозволяють повернутися до початкової ідеї розміщення єдиної системи охолодження по центру корпусу (МОДЕЛЬ 1). Слід також відзначити істотно більшу масу і теплоємність застосовуваного радіатора профілю АВ2310.

Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 9.

### 3.2.3 Дослідження термопрофілю компоувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 1 з використанням радіатора профілю АВ2310

Для проведення наступного етапу досліджень беремо стандартний радіатор профілю АВ2310, з'єднуємо їх по три, отримуючи загальну довжину близько 300 мм. Прикріплюємо до нього 8 транзисторів по 50 Вт. Отримуємо збірну одиницю. Робимо їх дві. З'єднуємо таким чином, щоб вийшов повітряний тунель. Прикріплюємо на вхід тунелю вентилятор середньої потужності. Для експерименту на одній стороні транзистори розміщені ближче до вентилятора, на другій стороні - ближче до виходу нагрітого повітряного потоку (рис. 3.14), (рис. 3.15).

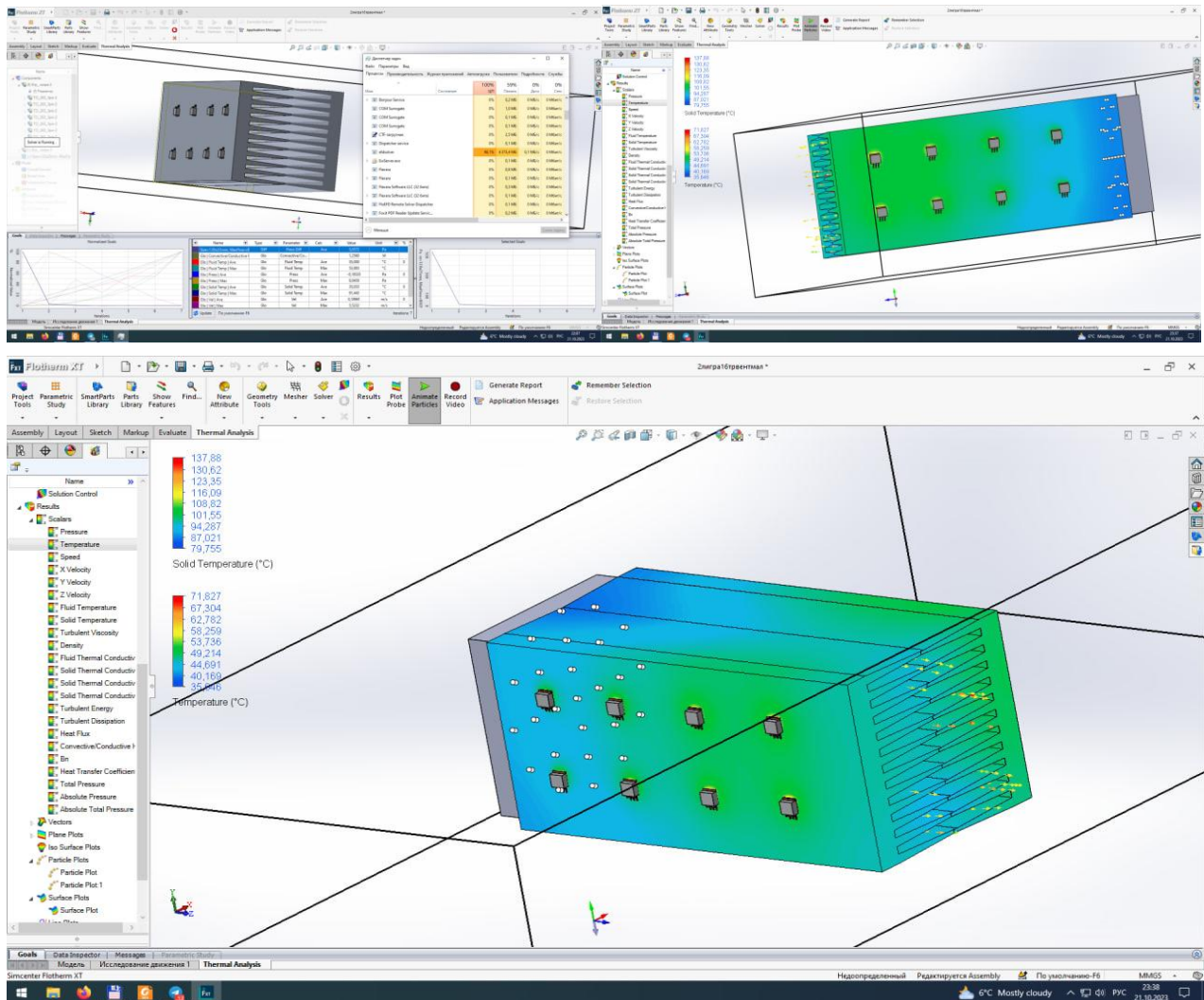


Рисунок 3.14 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях повітряного тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310



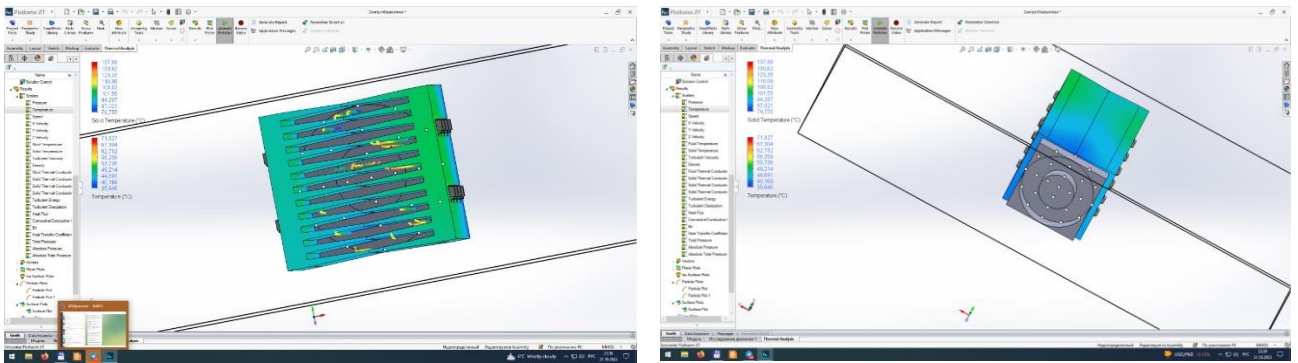


Рисунок 3.15 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях повітряного тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 (фронтальний вигляд)

Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 10.

Спроба збільшити повітряний потік, що продувається через радіаторний тунель за рахунок додавання на вихід вентилятора, аналогічного вхідному, дало несподівано негативний результат (рис. 3.16).

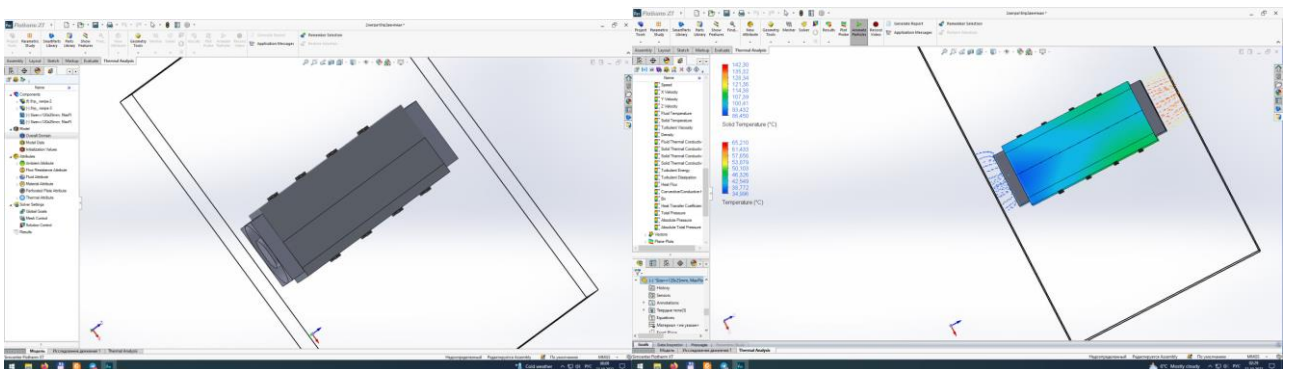


Рисунок 3.16 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях повітряного тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 з додатковим вентилятором на виході системи

Даний ефект можна пояснити збільшенням частки вихрової складової всередині тунелю зі збільшенням швидкості потоку охолоджуючого повітря в порівнянні зі звичайним режимом, що призвело до підвищення температури вихідних транзисторів і радіатором і зниження температури повітря на виході.

Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 11.

Розміщення вихідних транзисторів у шаховому порядку за результатами симуляції не дає жодного значного ефекту. Розподіл повітряного потоку всередині радіаторного тунелю зображений на (рис. 3.17).

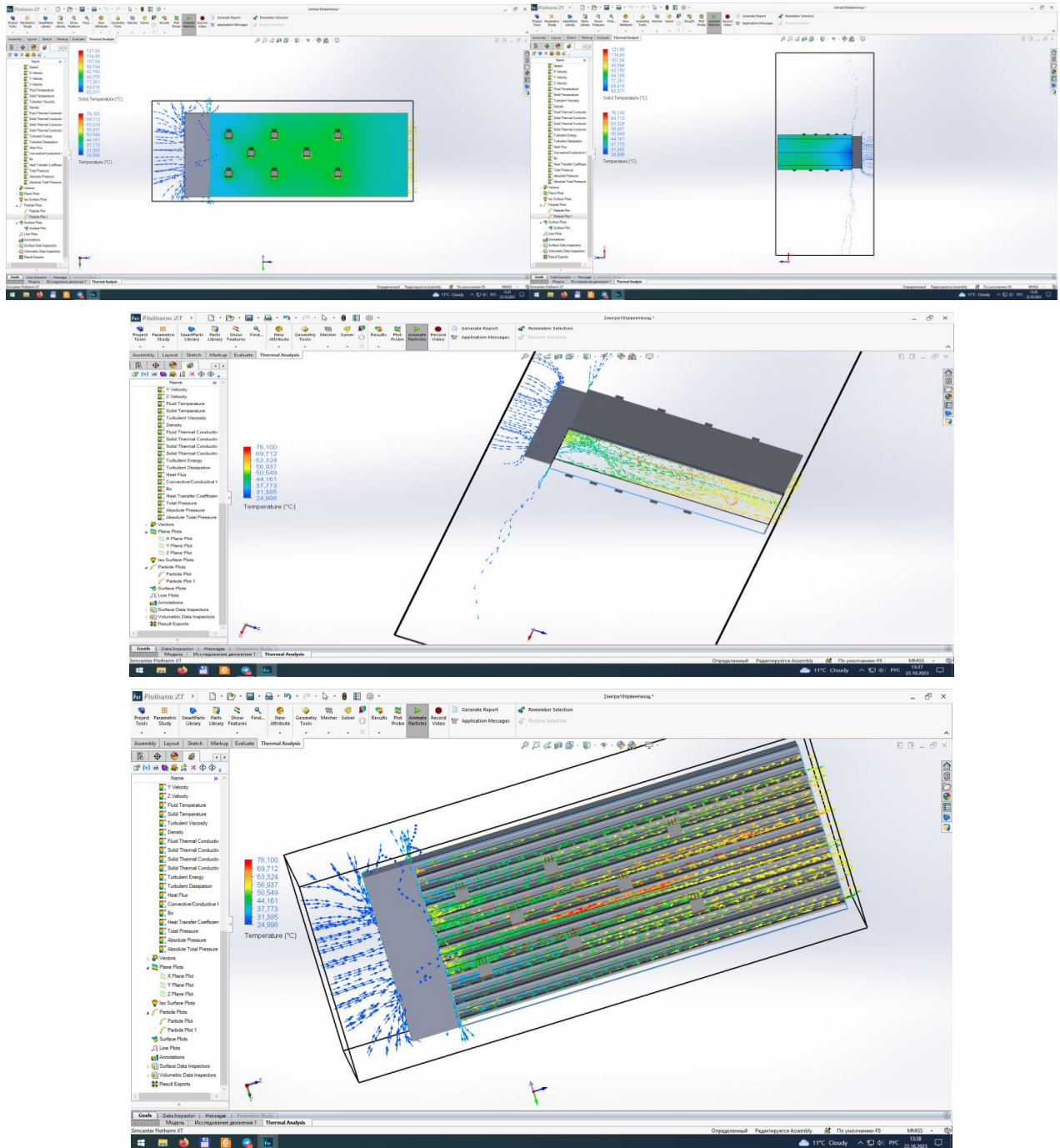


Рисунок 3.17 - Розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310

Результати досліджень вносимо до таблиці 3.1 за номером 12.

### 3.2.4 Дослідження термопрофілю компонувального рішення ПНЧ за МОДЕЛЛЮ 1 з використанням радіатора профілю АВ2310 при зміні потужностей транзисторів та вентилятора

Збільшення потужності розсіювання кожного транзистора до 75 Вт з одночасною заміною вентилятора на більш потужний, дає позитивний результат (рис. 3.18), (рис. 3.19).

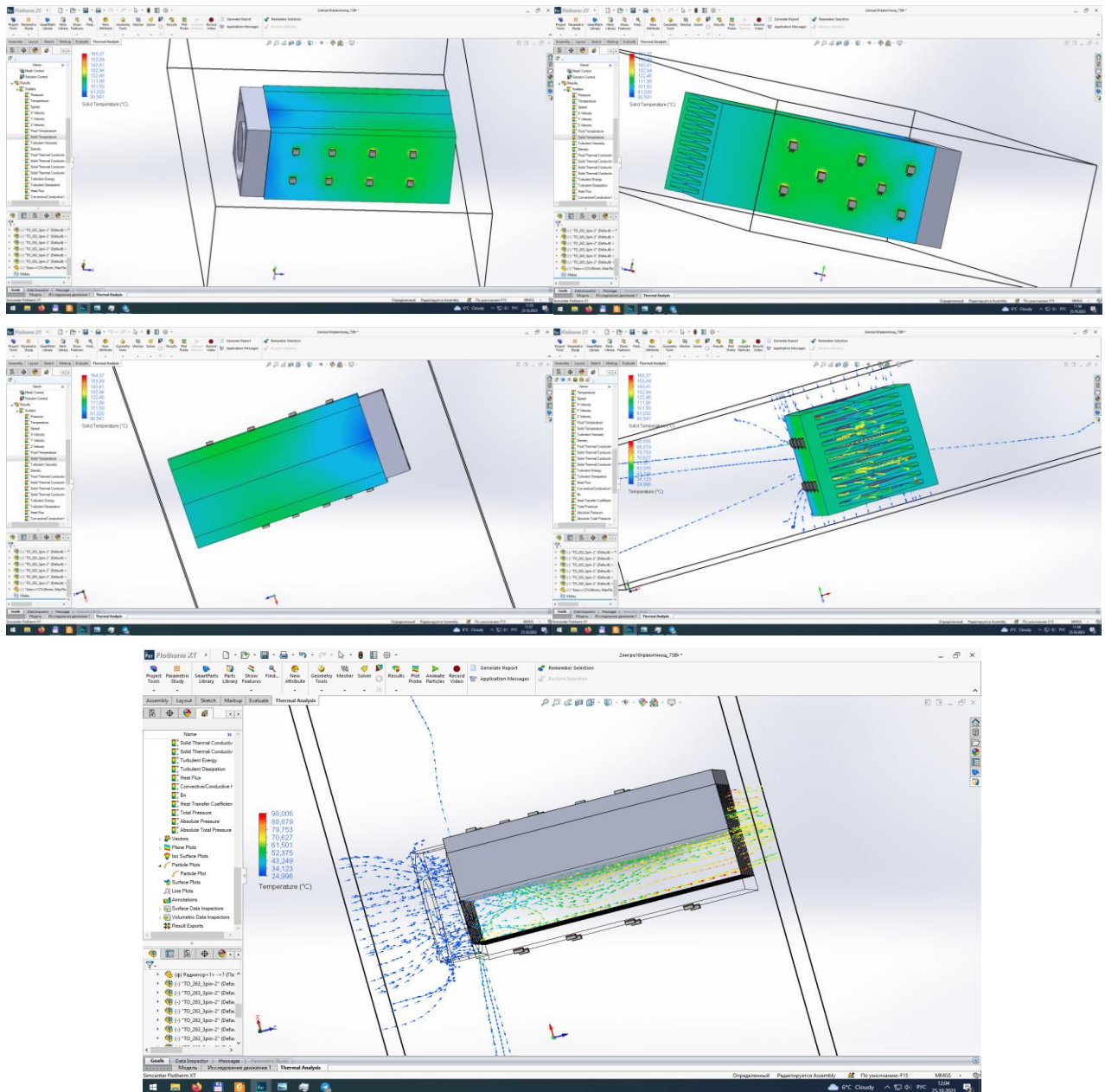


Рисунок 3.18 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 за умовами збільшення потужностей кожного з транзисторів (до 75 Вт) та вентилятора



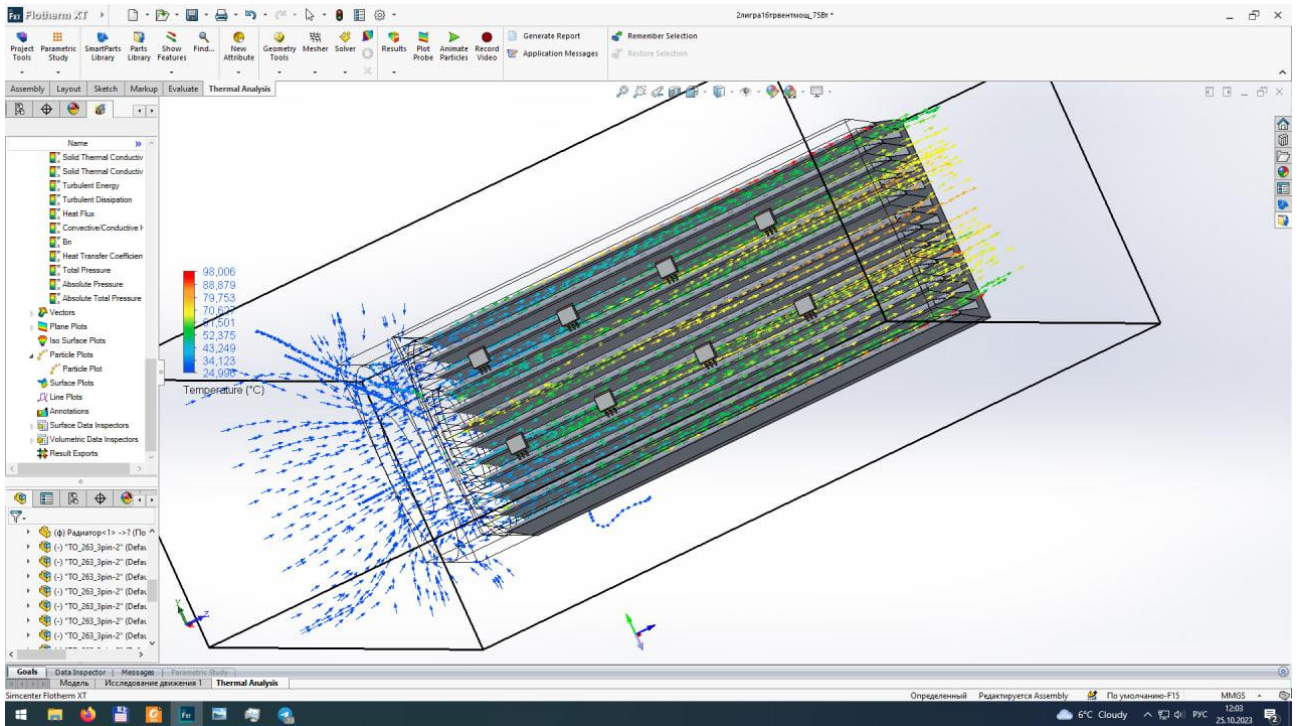


Рисунок 3.19 - Розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 за умовами збільшення потужностей кожного з транзисторів (до 75 Вт) та вентилятора (вигляд у розрізі)

Збільшення потужності розсіювання кожного транзистора до 100 Вт з таким самим вентилятором за результатами програмної симуляції дає неоднозначний результат і вимагає додаткового аналізу після введення всіх даних до підсумкової таблиці (рис. 3.20), (рис. 3.21).

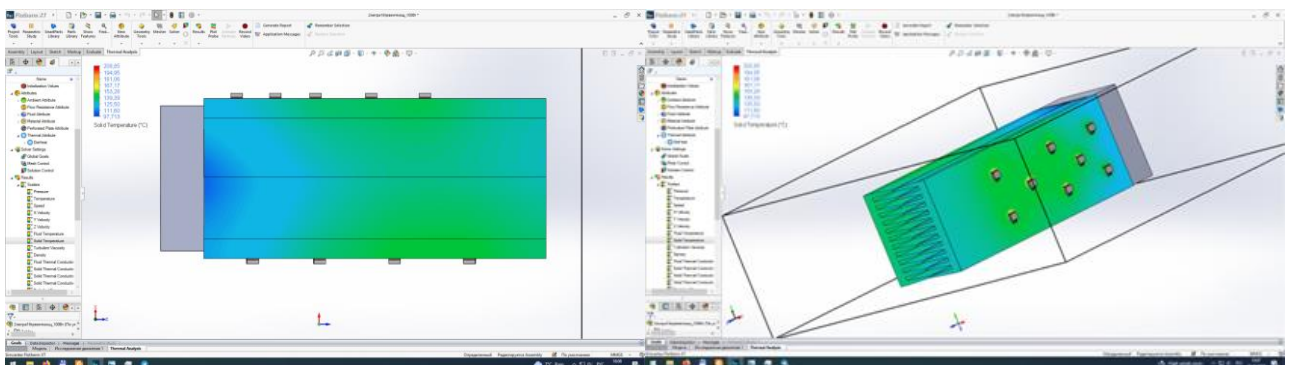


Рисунок 3.20 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 за умовами збільшення потужностей кожного з транзисторів (до 100 Вт) та вентилятора



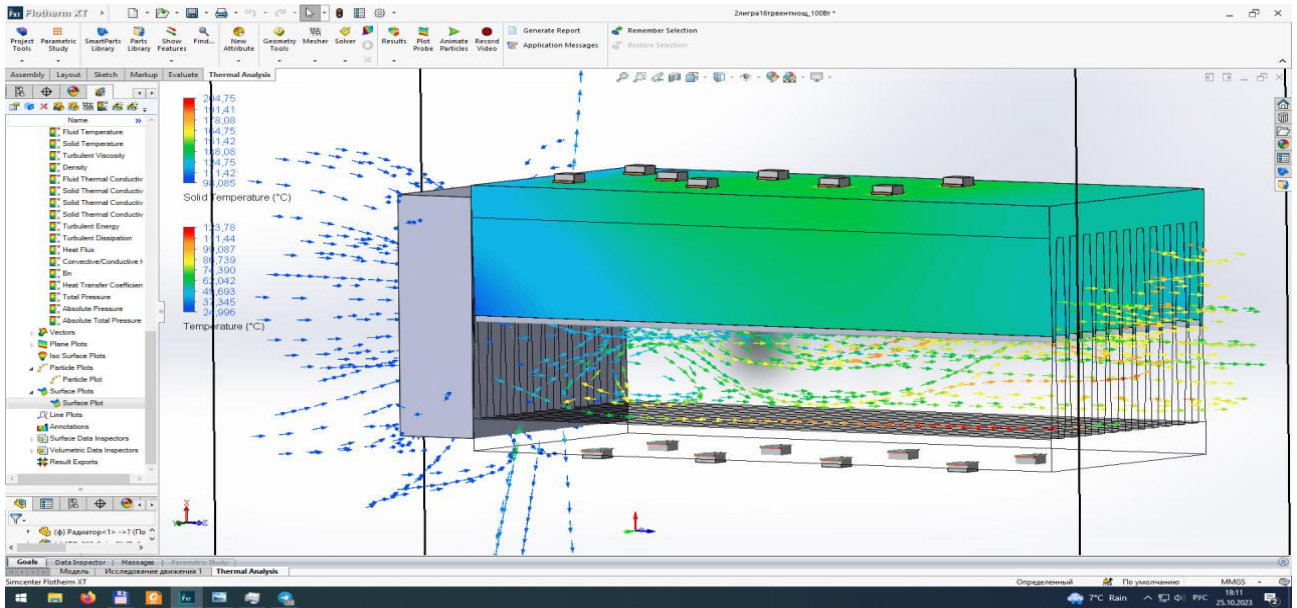


Рисунок 3.21 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 за умовами збільшення потужностей кожного з транзисторів (до 100 Вт) та вентилятора (детальний переріз)

Подальше збільшення потужності розсіювання вихідних транзисторів небажано, оскільки можливий вихід за межі ОБР транзистора.

Використання послідовно двох однакових вентиляторів середньої потужності на вході за результатами симуляції дало негативний ефект через збільшення частки вихрового потора в тунелі радіаторному і на його вході (рис. 3.22), (рис. 3.23). Також було помічено ефект зворотної тяги, коли нагріте повітря замість руху на вихід, повертається на початок тунелю.

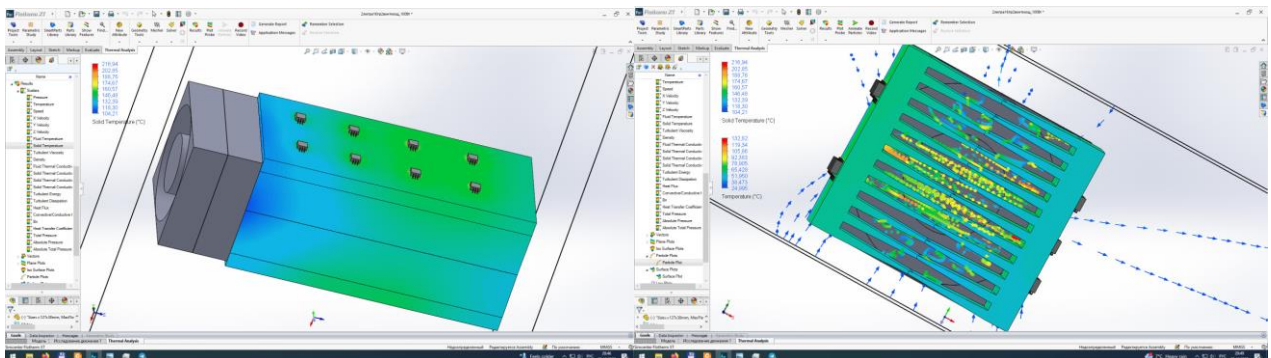


Рисунок 3.22 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 з додатковим вентилятором на вході системи

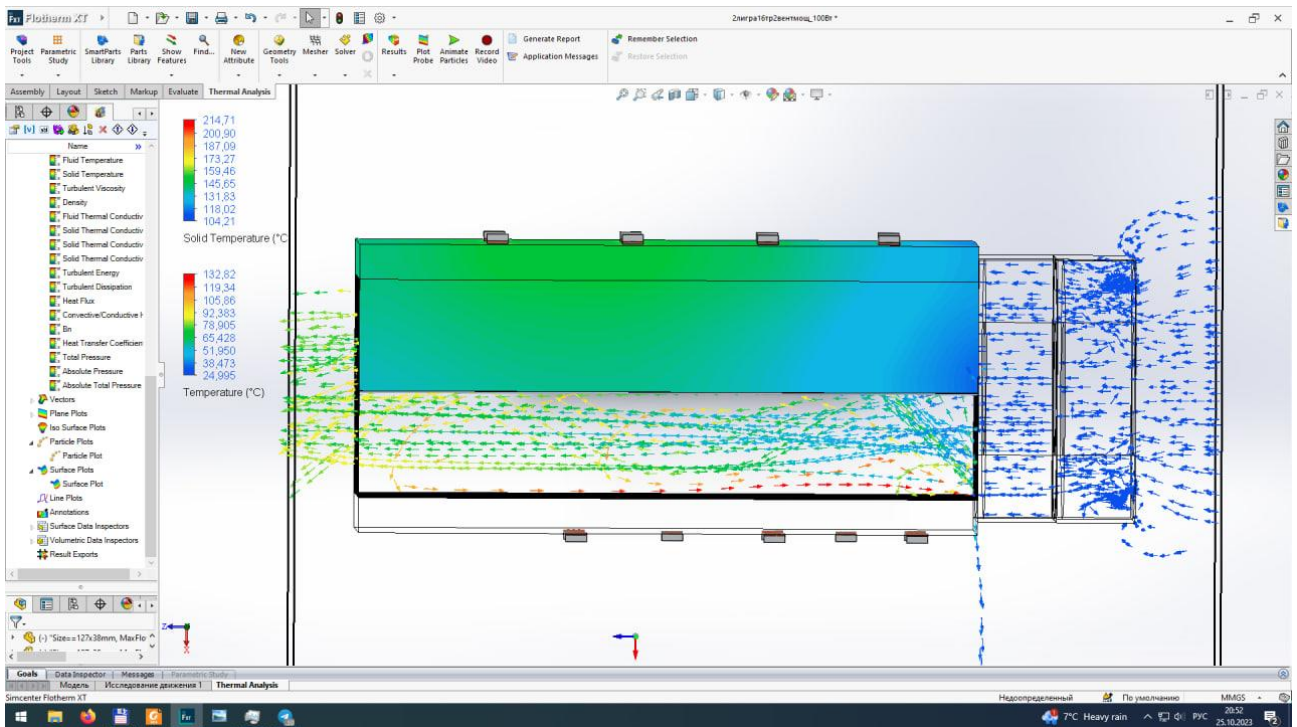


Рисунок 3.23 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 з додатковим вентилятором на вході системи (аналіз потоків)

Заміна двох вентиляторів охолодження середньої потужності на один потужний, більшого діаметру, що дозволяє виробляти не тільки продування радіаторного тунелю, а й обдув вихідних транзисторів, дала негативний результат через суттєву перевагу вихрових процесів (рис. 3.24), (рис. 3.25).

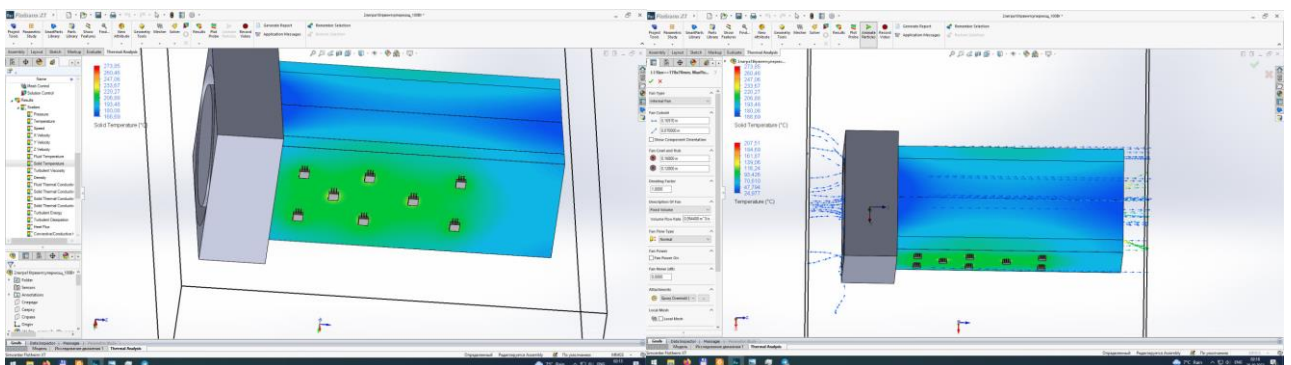


Рисунок 3.24 - Моделювання температурного поля по бічних поверхнях та розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 з надпотужним вентилятором великого діаметру на вході системи

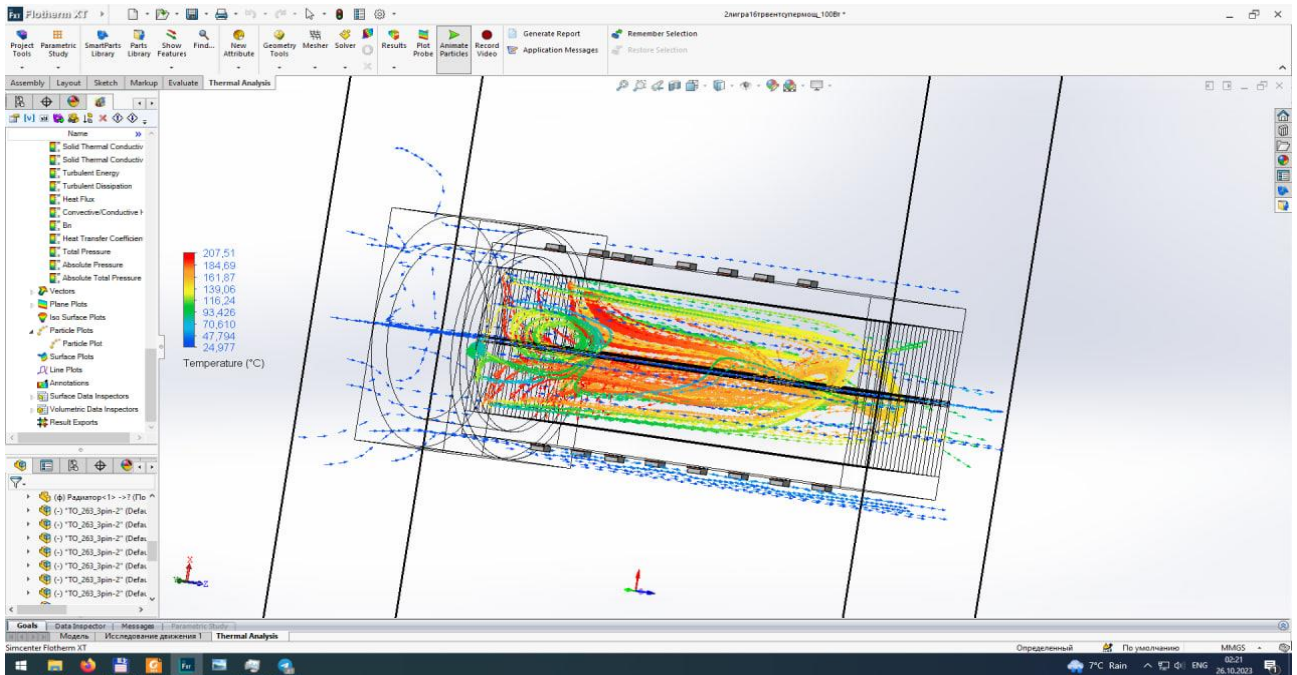


Рисунок 3.25 - Розподіл повітряного потоку всередині тунелю з двох радіаторів профілю АВ2310 з надпотужним вентилятором великого діаметра на вході системи (аналіз потоків)

Результати програмної симуляції розділу 3.2.4 вносимо до таблиці 3.1 відповідно послідовності досліджень за номерами 13, 14, 15, 16.

Таблиця 3.1 – Результати теплових досліджень компоновальних рішень ПНЧ великої потужності

№ дослідження	Тип радіатора	Кількість транзисторів/їх топологія	Потужність транзистора/загальна, Вт	Тип вентилятора	Температура, °C			
					Радіатор max	Радіатор min	радіатор біля вихідних транзисторів max	Охолодження повітря max
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Профіль «труба»	2x2 нижнє розташування	100/400	120x25mm, MaxFlow=88CFM	198	127	176	117
2	Профіль «труба»	2x2 центр розташування	100/400	120x25mm, MaxFlow=88CFM	197	130	164	123
3	Профіль «труба»	2x2 центр розташування	100/400	120x25mm, MaxFlow=240 CFM	170	92	140	62
4	Профіль «труба»	1x6 центр розташування	50/300x2	120x25mm, MaxFlow=240 CFM	224	111	195	69

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	Профіль «труба» + 2х300 плоский	2х2 центр розташування	100/400	120х25mm, MaxFlow=240 CFM	108	50	64	57
6	Профіль «труба» + 2х300 плоский	1х8 центр розташування	100/800х2	120х25mm, MaxFlow=240 CFM	137	73	113	89
7	Профіль «труба» + 1х300 плоский	1х8 шахівниця	100/800х2	120х25mm, MaxFlow=240 CFM	152	72	122	62
8	Профіль «труба» + 1х300 штир	1х8 шахівниця	50/400х2	120х25mm, MaxFlow=240 CFM	199	98	161	61
9	Профіль «труба» + 1х300 АВ2310	1х8 шахівниця	100/800х2	120х25mm, MaxFlow=240 CFM	124	59	91	66
10	2х300 АВ2310	2х4х2	50/800	127х38mm, MaxFlow=213CFM	137	80	116	71
11	2х300 АВ2310	2х4х2	50/800	127х38mm, MaxFlow=213CFM+1 на виході	142	86	128	65
12	2х300 АВ2310	2х4+8 шахівниця	50/800	127х38mm, MaxFlow=213CFM	122	62	100	76
13	2х300 АВ2310	2х4+8 шахівниця	75/1200	127х38mm, MaxFlow=213CFM	164	80	133	98
14	2х300 АВ2310	2х4+8 шахівниця	100/1600	127х38mm, MaxFlow=213CFM	209	98	167	124
15	2х300 АВ2310	2х4+8 шахівниця	100/1600	127х38mm, MaxFlow=213CFM+1 на вході	217	104	160	132
16	2х300 АВ2310	2х4+8 шахівниця	100/1600	170х70mm, MaxFlow=544CFM	274	167	220	207

Провівши порівняльний аналіз отриманих результатів досліджень, можна зробити висновок, що описаним вище критеріям потужності за мінімально

можливої температури радіатора охолодження біля вихідного транзистора задовольняють умови симуляції 6, 9, 10 і 12.

Температуру переходу транзистора обчислимо за формулою

$$T_{\text{п}} = P \cdot (R_{jc} + R_b) + T_{\text{рад max}} \quad (3.1)$$

де  $P$  - теплова потужність, що розсіюється на транзисторі;

$R_{jc}$  - тепловий опір кристал - корпус транзистора;

$R_b$  - тепловий опір прокладки між корпусом та радіатором;

$T_{\text{рад max}}$  – максимальна температура радіатора біля вихідних транзисторів.

Тепловий опір  $R_{jc}$  кристал - корпус для даного типу корпусів знаходиться в діапазоні від 0.42 К/Вт [31] до 0.75 К/Вт [32].

Тепловий опір прокладки площею 10x10 мм виходячи з типорозміру силових транзисторів, що застосовуються (Додаток В), обчислюємо за формулою

$$R_b = \frac{\sigma}{\lambda \cdot S}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma$  – товщина ізолюючої термопрокладки;

$S$  – її площа;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Для сучасних ізолюючих термопрокладок значення коефіцієнта теплопровідності знаходиться у досить широких межах від 2.4 до 190 Вт/(м·К) [33]. Для подальших розрахунків застосуємо стандартну керамічну прокладку з оксиду алюмінію, що має теплопровідність 0.0295 Вт/(мм·К) і товщину 0.1 мм.

Таким чином  $R_b = 0.1/0.0295/100 = 0.0339$  К/Вт.

Тепловий опір  $R_{jc}$  кристал – корпус у першому випадку беремо найгірший в 0.75 К/Вт, у другому – найкращий в 0.42 К/Вт, щоб у майбутньому мати можливість підвищувати надійність ПНЧ за рахунок застосування елементної бази з кращим тепловим пакетом:

1.  $R_{jc} + R_b = 0.75 + 0.0339 = 0.7839$ .

2.  $R_{jc} + R_b = 0.42 + 0.0339 = 0.4539$ .



Дані теплової потужності  $P$ , що розсіюється на транзисторі та  $T_{рад\ max}$  – максимальної температури радіатора біля вихідних транзисторів, для подальших розрахунків беремо з таблиці 3.1, а результати поточних розрахунків вносимо до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати поточних розрахунків компоувальних рішень ПНЧ великої потужності

№ дослідження/ модель	Радіатор	Кільк. джерел / топо - логія	Потужність/ загальна, Вт	Вентилятор	Температура, °С		
					радіатор під джерелом max	кристал-корпус, 1	кристал-корпус, 2
1	2	3	4	5	6	7	8
6 / 2	Профіль «труба» + 2x300 плоский	1x8 / центр	100 / 800x2	120x25 mm, MaxFlow=240 CFM	113	191	158
9 / 2	Профіль «труба» + 1x300 АВ2310	1x8 / шахівниця	100 / 800x2	120x25 mm, MaxFlow=240 CFM	91	169	136
10 / 1	2x300 АВ2310	2x4x2	50 / 800	127x38 mm, MaxFlow=213 CFM	116	155	138
12 / 1	2x300 АВ2310	2x4+8 / шахівниця	50 / 800	127x38 mm, MaxFlow=213 CFM	100	139	123

Як об'єкт, надійність якого потрібно визначити, розглянемо деяку складну систему (МОДЕЛЬ), що складається з окремих елементів (транзисторів тощо). Завдання розрахунку надійності складної системи полягає в тому, щоб визначити її показники надійності, якщо відомі показники надійності окремих елементів і структура системи, тобто характер зв'язків між елементами з погляду надійності.

Найбільш просту структуру має нерезервована система (МОДЕЛЬ 1, МОДЕЛЬ 2), що складається з  $n$  елементів (вихідних транзисторів), у якої відмова одного з елементів призводить до відмови всієї системи (в цьому випадку система має логічно послідовне з'єднання елементів).

Залежно від повноти обліку факторів, що впливають на роботу виробу, розрізняють орієнтовний та повний розрахунок показників надійності.

При орієнтовному розрахунку показників надійності необхідно знати структуру системи, номенклатуру елементів і їх кількість. Орієнтовний розрахунок враховує вплив на надійність лише кількості та типів, що входять до системи елементів, і ґрунтується на наступних припущеннях:

- усі елементи цього типу рівнонадійні, тобто. величини інтенсивності відмов цих елементів однакові;
- усі елементи працюють у номінальному (нормальному) режимі, передбаченому технічними умовами;
- інтенсивності відмов всіх елементів залежить від часу, тобто. протягом терміну служби у елементів, що входять у виріб, відсутнє старіння та знос;
- відмова елементів виробу є подіями випадковими та незалежними;
- усі елементи виробу працюють одночасно.

Орієнтовний метод розрахунку використовується на етапі ескізного проектування після розробки принципів електричних схем виробів та дозволяє намітити шляхи підвищення надійності виробу. Повний розрахунок показників надійності виробу виконується тоді, коли відомі реальні режими роботи елементів після випробування в лабораторних умовах макетів виробу.

Нехай для елементів справедливий експоненційний закон розподілу надійності та відомі їх інтенсивності відмов. Тоді і для системи справедливий експоненційний закон розподілу надійності:

$$P(t) = e^{-\lambda_e t} . \quad (3.3)$$

де



$P(t)$  - ймовірність безвідмовної роботи, як випливає з визначення, є часовою функцією;

$\lambda_e$  – сумарна інтенсивність відмов системи;

$t$  - заданий термін служби виробу, або заданий час на проміжку якого слід визначити можливість безвідмовної роботи виробу (в годинах).

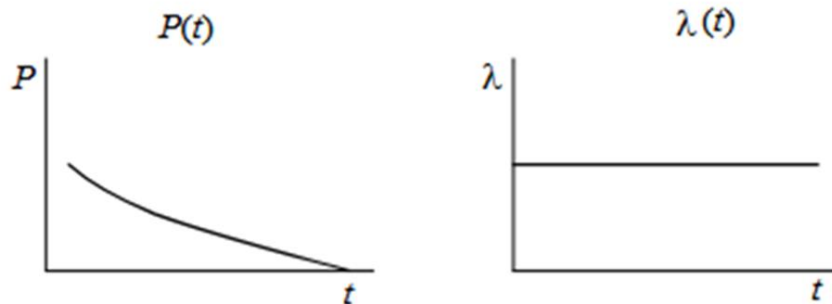


Рисунок 3.26 - Експоненційний закон розподілу надійності

Експоненційний закон досить точно описує надійність вузлів при раптових відмовах, що мають випадковий характер. Для експоненціального розподілу інтенсивність відмов  $\lambda$  – є постійна величина, причому збігається з параметром розподілу (рис. 3.26).

Експоненційний розподіл описує напрацювання до відмови об'єктів, у яких внаслідок вихідного контролю відсутній період приробітку, а призначений ресурс встановлений до закінчення періоду нормальної експлуатації. Ці об'єкти можна віднести до тих, що «не старіють», оскільки вони працюють тільки на ділянці з  $\lambda = const$ . Коло таких об'єктів дуже широке: складні технічні системи з безліччю компонентів, засоби обчислювальної техніки та в тому числі досліджувані нами ПНЧ великої потужності тощо.

Інтенсивність відмов нерезервованої системи  $\lambda_E$  дорівнює сумі інтенсивностей відмов її елементів, якщо всі елементи даного типу рівнонадійні, інтенсивність відмов системи визначається за формулою:

$$\lambda_E = \lambda_e \cdot n, \quad (3.4)$$

де

$\lambda_e$  - інтенсивність відмов одного елемента - умовна щільність ймовірності виникнення відмови невідновлюваних виробів (транзисторів) за певний час;

$n$  - кількість однакових елементів у вузлі.

Проведемо розрахунок  $\lambda_e$  для одного елемента (транзистора) за формулою (2.4), використовуючи відповідні табличні дані, прийнявши

$$\lambda_B = 0.012, K_\Phi = 8, K_Q = 1, K_E = 1.1:$$

$$\lambda_e = 0.012 \cdot K_T \cdot 8 \cdot 1 \cdot 1.1 = 0.1056 \cdot K_T .$$

Так як в підсумкових варіантах компанувальних рішень ми маємо по 16 однакових вихідних транзисторів в кожному варіанті, то сумарна інтенсивність відмов для двох типів моделей розрахуємо за формулою (3.4), перед цим визначивши  $K_T$  за формулою (2.5). Результати розрахунків вносимо до підсумкової таблиці 3.3,  $P(t)$  будемо визначати за проміжок часу в 1000 год [34], виходячи з професійного застосування ПНЧ великої потужності для, наприклад, цілей музичних виступів в напруженому режимі: гастролі – репетиція.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків надійності компанувальних рішень ПНЧ великої потужності

№ дослідження / тип моделі	Кількість вихідних транзисторів / їх топологія	Потужність кожного транзистора / загальна, Вт	$K_T, R_{jc} = 0.75$ К/Вт	$\lambda_e / \lambda_e \times 16, 10^{-6}$ 1/г	$P(t)$ за 1000 годин	$K_T, R_{jc} = 0.42$ К/Вт	$\lambda_e / \lambda_e \times 16, 10^{-6}$ 1/г	$P(t)$ за 1000 годин
6 / 2	1x8 центр розташування	100/800x2	10.07	1.063/17.01	0.98314	7.32	0.773/12.37	0.98771
9 / 2	1x8 шахівниця	100/800x2	8.25	0.8712/13.94	0.98616	5.75	0.607/9.72	0.99033
10 / 1	2x4x2	50/800	7.10	0.7498/12.00	0.98807	5.87	0.6199/9.92	0.99013
12 / 1	2x4+8 шахівниця	50/800	5.99	0.6325/10.12	0.98993	4.95	0.5227/8.34	0.99169

### 3.3 Висновки та рекомендації щодо результатів програмної симуляції

В результаті проведеного аналізу компоувальних рішень ПНЧ великої потужності, було обрано два прототипи, на підставі яких були створені відповідні 3D моделі – МОДЕЛЬ 1 і МОДЕЛЬ 2, які за розмірами задовольняють стандарту Rack формату в два юніти.

Топологія розміщення елементів моделей та їх тепловивідних систем з метою комп'ютерної симуляції були визнані конкуруючими за для визначення кращого рішення, відповідно до поставленої завдання дослідження - отримання компоувального рішення з найбільшою надійністю.

Комп'ютерна симуляція проводилася за допомогою програмного продукту фірми Сіменс Simcenter Flotherm XT, заснованого на методі кінцевих елементів (об'ємів), що передбачає побудову спеціальної трикутної сітки, число елементів якої значно перевищувало значення в  $10^6$  одиниць. Сітка формувалася програмним способом в автоматичному режимі виходячи з критерію точності обчислення відповідних температурних полів та повітряних потоків, при цьому на одну симуляцію припадало в середньому до 3 годин роботи комп'ютера за 100% завантаження процесора.

В результаті проведених досліджень на підставі описаних вище критеріїв, було обрано 4 варіанти з 16 конкуруючих, потім детально прорахованих за основним обраним нами критерієм надійності - ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$ .

Необхідний рівень надійності оцінюється значенням ймовірності безвідмовної роботи  $P(t) \geq 0,9$  [34]. Значення ймовірності безвідмовної роботи  $P(t) \leq 0,85$  свідчить про низьку надійність системи.

У нашому випадку кожен із чотирьох варіантів компоувальних рішень має  $P(t)$ , що значно перевищує необхідний рівень. Таким чином, кожна з запропонованих моделей МОДЕЛЬ 1 і МОДЕЛЬ 2 мають право на життя і можуть бути рекомендовані до проведення макетних випробувань.

Підвищення надійності завжди супроводжується збільшенням витрат коштів та робочого часу на стадіях розробки та виробництва, тоді як експлуатаційні витрати зазвичай знижуються. Тому існує певна оптимальна надійність, за якої загальні витрати на розробку, виробництво та експлуатацію виявляються мінімальними. У зв'язку з цим вимоги до показників надійності на стадії проектування мають бути досить чітко обґрунтовані з урахуванням як технічних, так і економічних аспектів цієї проблеми.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Спираючись на проведене в попередніх розділах дослідження, набуває актуальності задача реалізації розробки ПНЧ великої потужності, використовуючи запропоновану топологію основних елементів та тепловивідної системи.

Ідея проекту - створення підсилювача, здатного робити в досить важких умовах довкілля з високою надійністю, забезпечуючи високу та надвисоку вихідну потужність при великому ККД.

В (табл. 4.1) приведено зміст ідеї, вигода для користувача, а також сегмент користувачів, серед яких знаходиться цільова група клієнтів.

Аналіз потенційних переваг порівняно з пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку технічних та економічних характеристик пропозиції;
- визначення пропозицій конкурентів, а також дослідження їх технічних та економічних характеристик;
- проведення порівняльного аналізу між запропонованою ідеєю і пропозиціями конкурентів.

Для реалізації власної ідеї введемо позначення:

- W - слабка сторона ідеї;
- N - аналогічні значення (нейтральні);
- S - сильні значення (сильна сторона).

Порівняльний аналіз наведено в (табл. 4.2).

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї, вигода для користувача, а також цільова група клієнтів

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Цільова група клієнтів	Вигода для користувача

ПНЧ великої потужності високої надійності	Професійне аудіовідтворення	Власники концертних та прокатних підприємств	Менша ціна, простота конструкції для користувача
	Промислове використання (вібростенди)	Тестувальники різноманітної апаратури	Менша ціна, можливість роботи у автоматичному режимі

Таблиця 4.2 – Порівняльний аналіз власної ідеї і пропозицій конкурентів

№	Технічні та економічні характеристики	Концепції конкурентів		W	N	S
		Власна ідея	Ідея конкурентів			
1	Висока вихідна потужність, великий ККД	Дає змогу	Не дає змогу	Конструктивна складність	Прилади, що існують на сьогодні	Топологія ПНЧ відтворена в стандартному корпусі Rack
2	Висока надійність	Дає змогу	Не дає змогу	Конструктивна складність	Прилади, що існують на сьогодні	Рішення є більш ефективним відносно інших

Проведений аналіз слабких і сильних сторін ідеї формує підґрунтя для формування її конкурентноспроможності в порівнянні з запропонованими конкурентами рішеннями.

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Технологічний аудит включає у себе дослідження наступних питань:

- наявність існуючих технологій;
- технології, які необхідно допрацювати або розробити для реалізації ідеї;
- доступність до цих технологій автора ідеї.

В (табл. 4.3) відображені параметри можливості технологічної реалізації ідеї проекту.

Таблиця 4.3 – параметри можливості технологічної реалізації ідеї

№	Ідея проекту	Технологія реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Оцінка ефективності топології основних елементів та тепловивідної системи	Макетування з отриманням тепловізійної картини	Наявна	Доступна
2	Оцінка надійності роботи ПНЧ великої потужності	Збирання статистичних даних за певний період	Наявна	Доступна



### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій конкурентів.

Аналіз попиту складається з наступного (табл. 4.4):

- наявність попиту;
- обсяг;
- динаміка розвитку ринку.

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За результатами попереднього оцінювання ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показник стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних конкурентів	4
2.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
4.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, СТТУ, ТУУ
5.	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	93%

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи показано у (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Високонадійні ПНЧ великої потужності зі значним ККД в корпусі стандарта Rack	Власники концертних та прокатних фірм, тестувальники різноманітної апаратури	особливостей купівлі та експлуатації товару немає	-надійність, -висока потужність, -низьке енергоспоживання (високий ККД), -простота та стандартизованість консткурції, -низька ціна

Фактори, що сприяють ринковому впровадженню стартап-проекту приведені у (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Фактор загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Висока технічна складність	Небхідність наявності висококваліфікованих спеціалістів для обслуговування	Укладання договорів зі спеціалістами для гарантійного та післягарантійного обслуговування

Фактори, що перешкоджають ринковому впровадженню стартап-проекту показано у (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти та виробляти нові продукти, знижувати їх собівартість	Ускладнення структури та функціональної наповненості пропозиції
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені в провадженні пристрою	Рекламна діяльність, просування товару в Інтернеті

Загальні риси конкуренції на ринку показані в (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1	2	3
1. Вказати тип конкуренції – олігополія	На ринку присутня невелика кількість підприємств, що займаються розробкою такого типу пристроїв	Підвищення якості пристроїв за рахунок використання прогресивних рішень та технологій
2. Локальний	Попит на всій території країни	Окремий підхід до кожної локальної ділянки

3. Внутрішньо галузева	Пропозиції конкурентів мають більш впізнавані пристрої	Попереднє створення бази даних потенційних покупців
4. Товарно-видова	Потужність наявних технічних засобів	Використання за необхідності схожого обладнання
5. Цінова	Можливість заощадити за допомогою використання потрібної топології ПНЧ	Гнучка політика цін
6. За інтенсивністю-марочна	Використання стандартизованих корпусів формату Rack	Реклама товару, проведення тендерів

Після аналізу конкуренції проведено більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.9)[35].

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі

Назва	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Технологічні постачальники	Необхідність пошуку дилерів з міжнародними зв'язками	Залучення відомих та малопопулярних постачальників	Незалежність у прийнятті клієнтських рішень	Надання переваги більш авторитетним рішенням
Висновки	Інтенсивність незначна	Можливість виходу на ринок є	Постачальники диктують цінову політику на комплектуючі	Клієнти диктують вимоги до якості	Існують в значно більшій цінній категорії

На основі аналізу конкуренції, наведеного в (табл. 4.9) а також з урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6), (табл. 4.7), визначено та обґрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності реалізації ідеї стартапу (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Висока надійність	Використання для значного ряду потреб користувачів
2	Доступність	Значно нижча ціна ніж у конкурентів
3	Спектр застосувань (стандартизація корпусу)	Можливість використання в стандартних стійках з можливістю «гарячої заміни»

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні							
			-3	-2	-1	0	1	2	3	
1	Висока надійність	17	+							
2	Доступність	20				+				
3	Спектр застосувань	19			+					

Завершальним етапом ринкового аналізу можливості впровадження стартап-проекту є складання матриці SWOT-аналізу: аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз і можливостей, сильних та слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища.

Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, ще не реалізованими на ринку, та мають певну ймовірність здійснення. Так, зниження доходів потенційних споживачів є фактором загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно цінової конкуренції, що є вже фактором ринкової загрози.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: висока потужність, висока надійність, високий ККД, низьке енергоспоживання	Слабкі сторони: складність конструкції, від самого початку висока цінова категорія
Можливості: широкий спектр застосування, стандартизація	Загрози: незацікавленість клієнтів.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка обладнання, створення реклами, взаємодія з покупцями для перевірки працездатності обладнання	80%	6 міс
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, створення наукових ресурсів, розробка обладнання, тестування	65 %	1 рік

Обрано альтернативу №1.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки, перелік заходів для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть також бути виведені на ринок (табл. 4.9) виходячи з аналізу потенційних конкурентів.

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку - опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).



Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Власники концертних та прокатних фірм	Готові	Середній	Висока	Середня
2.	Тестувальники різноманітної апаратури	Готові	Низький	Середня	Середня
Як цільову групу було обрано групу №1					

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Використання альтернативних технологій та обладнання	Встановлення нового стандарту якості (надійності) та ціни	Дешевизна та менші вимоги для пристроїв	Стратегія диференціації

Обираємо стратегію диференціації. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Забирати існуючих та шукати нових	Так, основний функціонал	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16), потрібно запропонувати стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції - комплексу асоціацій, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку (проект) (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові позиції власного стартап-проекту	Асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1.	Висока якість (надійність) пристрою	Диферен - ціації	Стпндартизація рішення, дешевизна	Потужність, якість, надійність, енергоефективність

#### 4.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком для розробки маркетингової програми проекту є формування маркетингової концепції товару, який отримуватиме споживач.

Далі наведені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару (табл. 4.18).

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Надійність	Надійність	Надійність
2	Дешевизна	Мала ціна продукту	Менша ціна у порівнянні з конкурентами

Далі розробимо трирівневу маркетингова модель товару (табл. 4.19):

- уточнюється ідея продукту;
- уточнюється його фізичні складові;
- конкретизуються особливості процесу його надання.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумкою	Якісний високонадійний товар, стандартизована якість послуг та обладнання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх/Тл/ Е/Op
	1. Вартість обслуговування	М	
	2. Сумісність з більшістю обладнання	М	
	3. Висока надійність	М	
	4. Безпечний для користування	М	
	Якість: стабільна робота та високопродуктивний функціонал		
	Встановлення та налаштування		
III. Товар із підкріпленням	До продажу - послуги попереднього прослуховування Після продажу – супроводження та налаштування		

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари - аналоги або товари субститути. Також потрібно провести аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	3000-5000 долл..	–	Високий	Н. 2000 – В. 3500 долл

Останнім кроком буде визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення. Так як налаштування обладнання у кінцевого користувача потребує певних професійних навиків від персоналу і обладнання налаштовано на стадії виробництва, то збут можна проводити через спеціалізовані шоу-руми та аудіосалони.

#### 4.6 Висновки до четвертого розділу

У розділі описано потенційну реалізацію ідеї стартап-проекту, що полягає у практичній реалізації проведених досліджень з побудови високонадійного енергоефективного підсилювача низької частоти великої потужності. Потенційна реалізація можлива за рахунок обрання найбільш оптимальних та підходящих систем для організації роботи, застосування яких на сьогоднішній день є перспективним напрямом розвитку. На сьогоднішній день на українському ринку аналогів практично не має.

Для впровадження стартап-проекта потрібно проаналізувати поведінку споживачів, здійснити пошук наукових та виробничих ресурсів, розробити необхідні технічне завдання та за необхідності технологічне обладнання, налагодити зв'язки з рекламодавцями, концертними (продюсерськими) підприємствами та шоу-румами для попереднього прослуховування, постійно взаємодіяти з покупцями для перевірки працездатності пристроїв і отримання зворотного зв'язку для внесення необхідних констуктивних та користувальницьких змін. Подальше виконання стартап-проекту вважаємо доцільним.

## ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі магістра були проведені розробка та дослідження підсилювача низької частоти великої потужності, в тепловивідній системі якого реалізовано примусове повітряне охолодження.

Для досягнення поставленої задачі було проаналізовано характеристики існуючих ПНЧ великої потужності, топології їх основних елементів та тепловивідної системи, зроблений аналіз сучасних схемотехнічних рішень та визначення критеріїв потужності, були позначені головні параметри для оптимізації, виходячи зі сфери застосування.

Була запропонована побудова декількох власних моделей з різною топологією елементів та тепловивідної системи з примусовим охолодженням, визначені граничні умови побудови власної моделі, виходячи з сучасних технічних стандартів та при використанні корпусу в форматі Rack.

В роботі було запропоновано використання критерію надійності для конкуруючих власних моделей ПНЧ як головний критерій успішності дослідження.

Була проведена комп'ютерна симуляція запропонованих рішень власних моделей програмними засобами фірми Сіменс Simcenter Flotherm XT на основі методу кінцевих елементів з наступним відбором кращих результатів, виходячи з обраних критеріїв, зроблений їх детальний аналіз та подальші рекомендації.

Виходячи з отриманих результатів комп'ютерної симуляції, була підтвержена правильність вибору компоувальних рішень та застосування обраних електронних компонентів, що визначає високу надійність та потужність роботи пристрою при низькому енергоспоживанні, були обрані з декількох конкуруючих чотири кращі варіанти, детально прорахованих за обраним критерієм надійності - ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$ .

У нашому випадку кожен із чотирьох варіантів компоувальних рішень отримав значення  $P(t)$ , що значно перевищує необхідний рівень в  $P(t) \geq 0,9$ .

Таким чином, кожен з запропонованих варіантів має право на існування та подальшу реалізацію.

Далі було розроблено стартап-проект на провадження отриманих високонадійних рішень ПНЧ великої потужності. Розробка відбувалась за рахунок обрання найбільш оптимальних та перспективних на сьогодні критеріїв для організації роботи. В дослідженні було визначено, що на сьогодні аналогів на українському ринку практично не має.

Для впровадження стартап-проекта потрібно буде обрати альтернативне дослідження поведінки споживачів, здійснити пошук наукових та виробничих ресурсів, розробити необхідне технічне завдання при використанні відповідного обладнання, налагодити рекламні зв'язки, постійно взаємодіяти з покупцями для перевірки працездатності та якості обладнання та отримання зворотного зв'язку. Подальше виконання стартап проекту вважаємо доцільним.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Офіційний сайт «Аудіо- креатів», Нідерланди [Електронний ресурс]:  
<https://audio-creative.nl/recensie-2/perreux-silhouette-series/3/> (1.12.2023)
2. Офіційний сайт фірми «Yamaha» [Електронний ресурс]:  
[https://uk.yamaha.com/en/products/audio\\_visual/hifi\\_components/r-n2000a/index.html](https://uk.yamaha.com/en/products/audio_visual/hifi_components/r-n2000a/index.html) (1.12.2023)
3. Офіційний сайт фірми «Legacy Audio» [Електронний ресурс]:  
<https://legacyaudio.com/products/view/i-v4-ultra> (1.12.2023)
4. Офіційний сайт фірми «Yamaha» [Електронний ресурс]:  
[https://europe.yamaha.com/en/products/proaudio/power\\_amps/tn\\_series/features.html](https://europe.yamaha.com/en/products/proaudio/power_amps/tn_series/features.html) (1.12.2023)
5. Міжнародна база знань IEEE [Електронний ресурс]:  
<https://spectrum.ieee.org/chip-hall-of-fame-tripath-technology-ta2020-audio-amplifier> (1.12.2023)
6. United States US 20050069049A1 Patent Application Publication Pub. No.:  
US 2005/0069049 A1 Pub. Date: Mar. 31, 2005
7. Офіційний сайт фірми «BestCarAudio» [Електронний ресурс]:  
<https://www.bestcaraudio.com/car-audio-amplifier-cooling-considerations-and-importance/> (1.12.2023)
8. EIA-310-D EIA Standard Cabinets, Racks, Panels, and Associated Equipment
9. Офіційний сайт ТОВ СКБ Вібрації та Ресурсу [Електронний ресурс]:  
<https://vibrationvir.com.ua/category/vibrostendy-elektrodinamicheskie/1/379712/> (1.12.2023)
10. Офіційний сайт фірми «Shimadzu» [Електронний ресурс]:  
<https://www.shimadzu.co.uk/usf-2000> (1.12.2023)
11. Офіційний сайт Кена Роквела [Електронний ресурс]:  
<https://www.kenrockwell.com/audio/mcintosh/mc240.htm> (1.12.2023)
12. Офіційний сайт компанії «MSB Technology» [Електронний ресурс]:

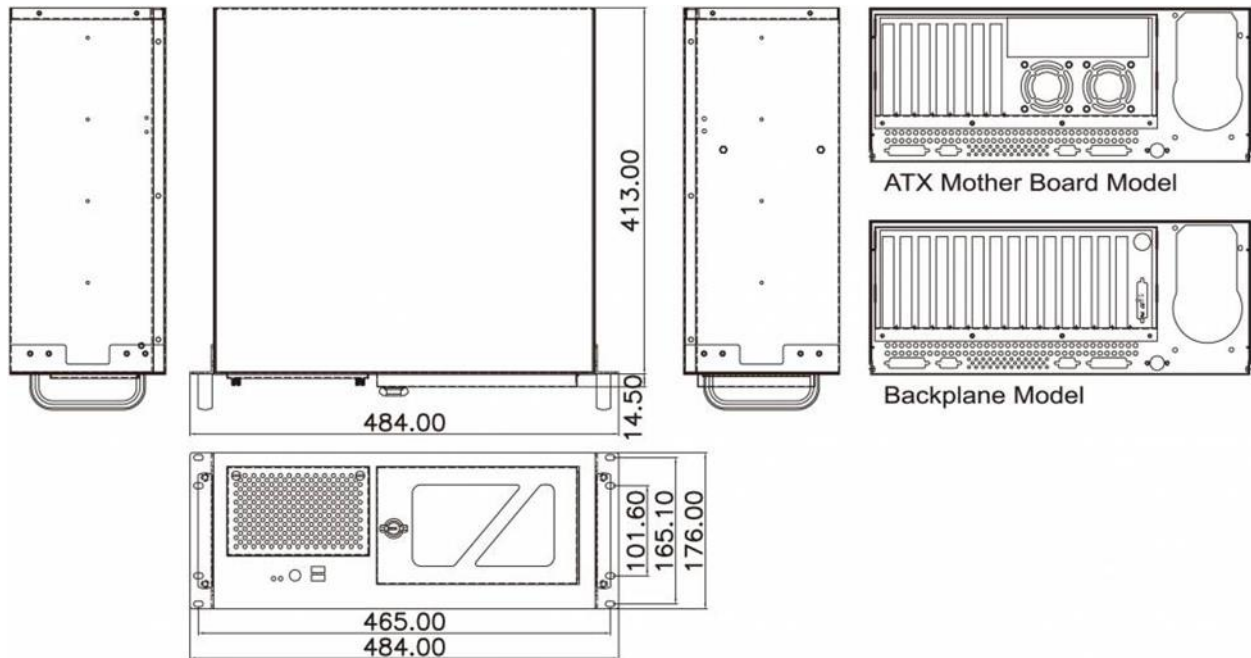
- <https://msbtechnology.com/all-new-m205/> (1.12.2023)
13. Офіційний сайт Андреа Піветта [Електронний ресурс]:  
<https://www.onlycreative.it/products/silente> (1.12.2023)
  14. Офіційний сайт електронної бібліотеки «HiFi Engine» [Електронний ресурс]: [https://www.hifiengine.com/manual\\_library/telefunken/ra-200.shtml](https://www.hifiengine.com/manual_library/telefunken/ra-200.shtml) (1.12.2023)
  15. Офіційний сайт інтернет-магазину Aliexpress [Електронний ресурс]:  
[https://www.aliexpress.com/item/32812528534.html?sku\\_id=64611357510](https://www.aliexpress.com/item/32812528534.html?sku_id=64611357510) (1.12.2023)
  16. Офіційний сайт компанії «Outlaw Audio» [Електронний ресурс]:  
[https://outlawaudio.com/shop/power\\_amplifiers/29-model-7220.html](https://outlawaudio.com/shop/power_amplifiers/29-model-7220.html) (1.12.2023)
  17. The Class D Audio Power Amplifier: A Review by Shangming Mei, Yihua Hu, Hui Xu, Huiqing Wen Electronics 2022, 11(19), 3244;  
<https://doi.org/10.3390/electronics11193244> Received: 30 August 2022 / Revised: 28 September 2022 / Accepted: 3 October 2022 / Published: 9 October 2022 / Corrected: 30 August 2023
  18. Офіційний сайт інтернет-магазину «usilok.kiev.ua» [Електронний ресурс]:  
<https://usilok.kiev.ua/pidsiluvach-lanzar-bipolar-2sc5200-2sa1943-200-vt/> (1.12.2023)
  19. IRAUDAMP9 1.7 kW / 2-Ω Single Channel Class D Audio Power Amplifier Using the IRS2092S and IRFB4227 By Israel Serrano and Jun Honda
  20. An Experimental and Computational Study of Heat Transfer in High Power Amplifiers Mar 2005 Luke Maguire M. Behnia Graham L. Morrison
  21. Elektronnaia tekhnika 2-e izd, per. I dop. Uchebnoe posobie dlia spo Червяков Г. Г., Прохоров С. Г., Шиндор О. В.  
SKU: KM1435443 Stock No: 1217551 ISBN: 978-5-534-11052-4
  22. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – Washington D.C.: Department of Defense; Revision F, 1991. – 205 p., Notice 1, 1992. – 37 p., Notice 2, 1995. – 80 p

23. Reliability Prediction Model for Electronic Equipment: The Chinese Military/Commercial Standard GJB/z 299B. – Yuntong Forever Sci.-тек. Co. Ltd. China 299B
24. Офіційний сайт NASA [Електронний ресурс]:  
<https://nepp.nasa.gov/DocUploads/1F6AB74B-4517-4AD0-A34813268E75B8EB/MIL-STD-202.pdf> (1.12.2023)
25. Офіційний сайт корпорації SOLIDWORKS [Електронний ресурс]:  
<https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation/> (1.12.2023)
26. Офіційний сайт Siemens Software [Електронний ресурс]:  
<https://plm.sw.siemens.com/de-DE/simcenter/fluids-thermal-simulation/flotherm/> (1.12.2023)
27. Офіційний сайт фірми «Tera Analysis» [Електронний ресурс]:  
<https://quickfield.com/components.htm/> (1.12.2023)
28. Офіційний сайт корпорації ANSYS [Електронний ресурс]:  
<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (1.12.2023)
29. Офіційний сайт фірми PTC [Електронний ресурс]:  
<https://www.ptc.com/en/products/creo/simulation> (1.12.2023)
30. Application Note AN-1033 Calculating Temperature Gradients In Power MOSFETs with the HEXRISE™ Program by Doug Butchers, International Rectifier GB Ltd.
31. Офіційний сайт фірми RadioLocman [Електронний ресурс]:  
<https://www.radiolocman.com/datasheet/data.html?di=91151&IXFA16N50P> (1.12.2023)
32. Офіційний сайт інтернет-магазину «smdua.in.ua» [Електронний ресурс]:  
[https://smdua.in.ua/katalog/poluprovodniki-112140/tranzistory-112825/tranzistory-unipolyarnye-17/tranzistory-s-kanalom-tipa-n-100309/tranzistory-s-kanalom-n-smd-112826/auir11404zs\\_id35787](https://smdua.in.ua/katalog/poluprovodniki-112140/tranzistory-112825/tranzistory-unipolyarnye-17/tranzistory-s-kanalom-tipa-n-100309/tranzistory-s-kanalom-n-smd-112826/auir11404zs_id35787) (1.12.2023)

33. Офіційний сайт інтернет-магазину Aliexpress [Електронний ресурс]:  
[https://www.aliexpress.com/item/32864266729.html?af=20931\\_1&cv=254790&cn=45s3ushrpi7t6dw9dj6g0a0mt3g6u56b&dp=v5\\_45s3ushrpi7t6dw9dj6g0a0mt3g6u56b&utm\\_source=epn&utm\\_medium=cra&utm\\_campaign=20931\\_1&utm\\_content=254790&product\\_id=32864266729&afref=&aff\\_fcid=ff2a9e537dc9472a8221591a9c421761-1699528383497-09561-\\_dSKU6IP&aff\\_fsk=\\_dSKU6IP&aff\\_platform=api&sk=\\_dSKU6IP&aff\\_trace\\_key=ff2a9e537dc9472a8221591a9c421761-1699528383497-09561-\\_dSKU6IP&terminal\\_id=66ae6f2dbc634131b175e4c0cff690c9](https://www.aliexpress.com/item/32864266729.html?af=20931_1&cv=254790&cn=45s3ushrpi7t6dw9dj6g0a0mt3g6u56b&dp=v5_45s3ushrpi7t6dw9dj6g0a0mt3g6u56b&utm_source=epn&utm_medium=cra&utm_campaign=20931_1&utm_content=254790&product_id=32864266729&afref=&aff_fcid=ff2a9e537dc9472a8221591a9c421761-1699528383497-09561-_dSKU6IP&aff_fsk=_dSKU6IP&aff_platform=api&sk=_dSKU6IP&aff_trace_key=ff2a9e537dc9472a8221591a9c421761-1699528383497-09561-_dSKU6IP&terminal_id=66ae6f2dbc634131b175e4c0cff690c9) (1.12.2023)
34. Бабаков М.Ф. Нормування та розрахунок надійності радіоелектронної апаратури: навч. посібник/М.Ф. Бабаков, І.К. Васильєва, І.І. Дерюга. - Х.: Нац. аерокосм. ун-т "Харк. авіац. ін-т", 2008. - 76 с УДК 621.396.6
35. Конкурентна перевага. Як досягати стабільно високих результатів  
Код ІМ-00120301 Автор: Майкл Портер Видавництво: Наш Формат  
Рік видання: 2019 Кількість сторінок: 624 ISBN: 9786177730650

## ДОДАТОК А

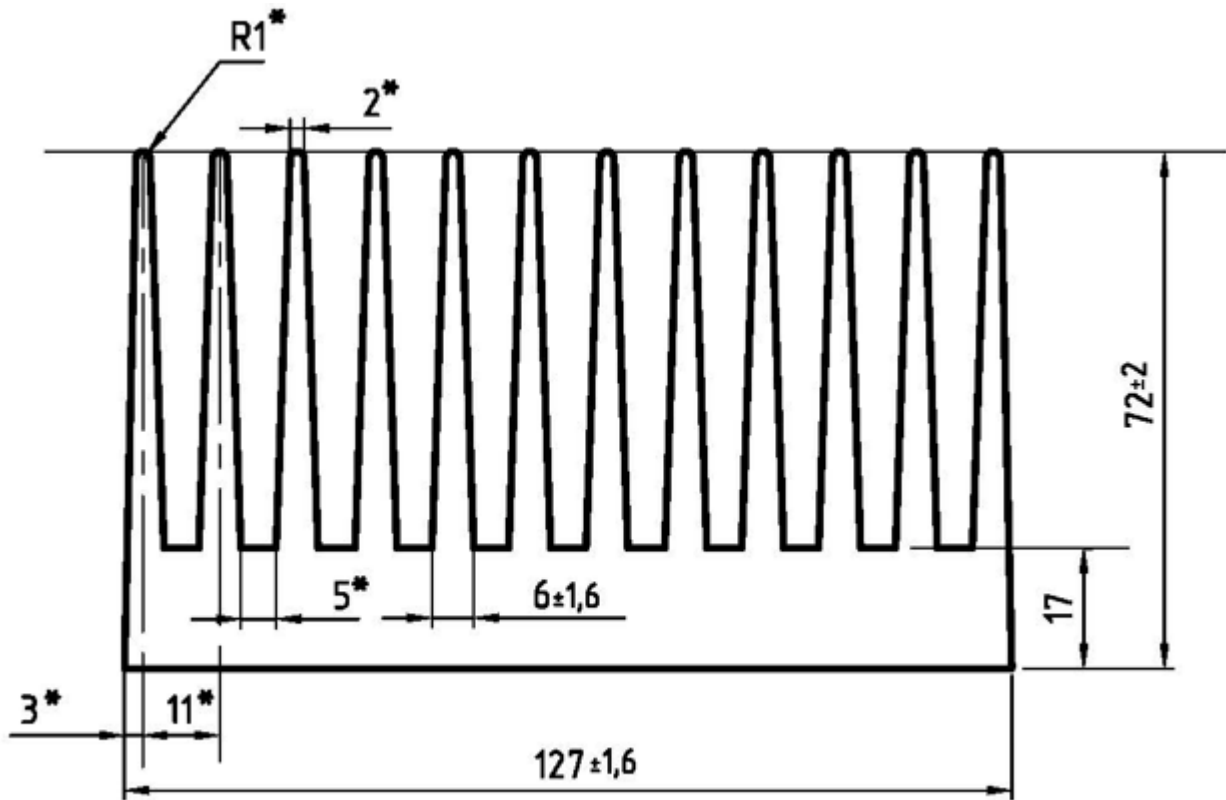
Габарити корпусу стандарта Rack розміром в два юніти



## ДОДАТОК Б

## Профіль АВ2310

(Площа поверхні профіля (радіатора) на 100 мм довжини - не менш  $1660 \text{ cm}^2$ )

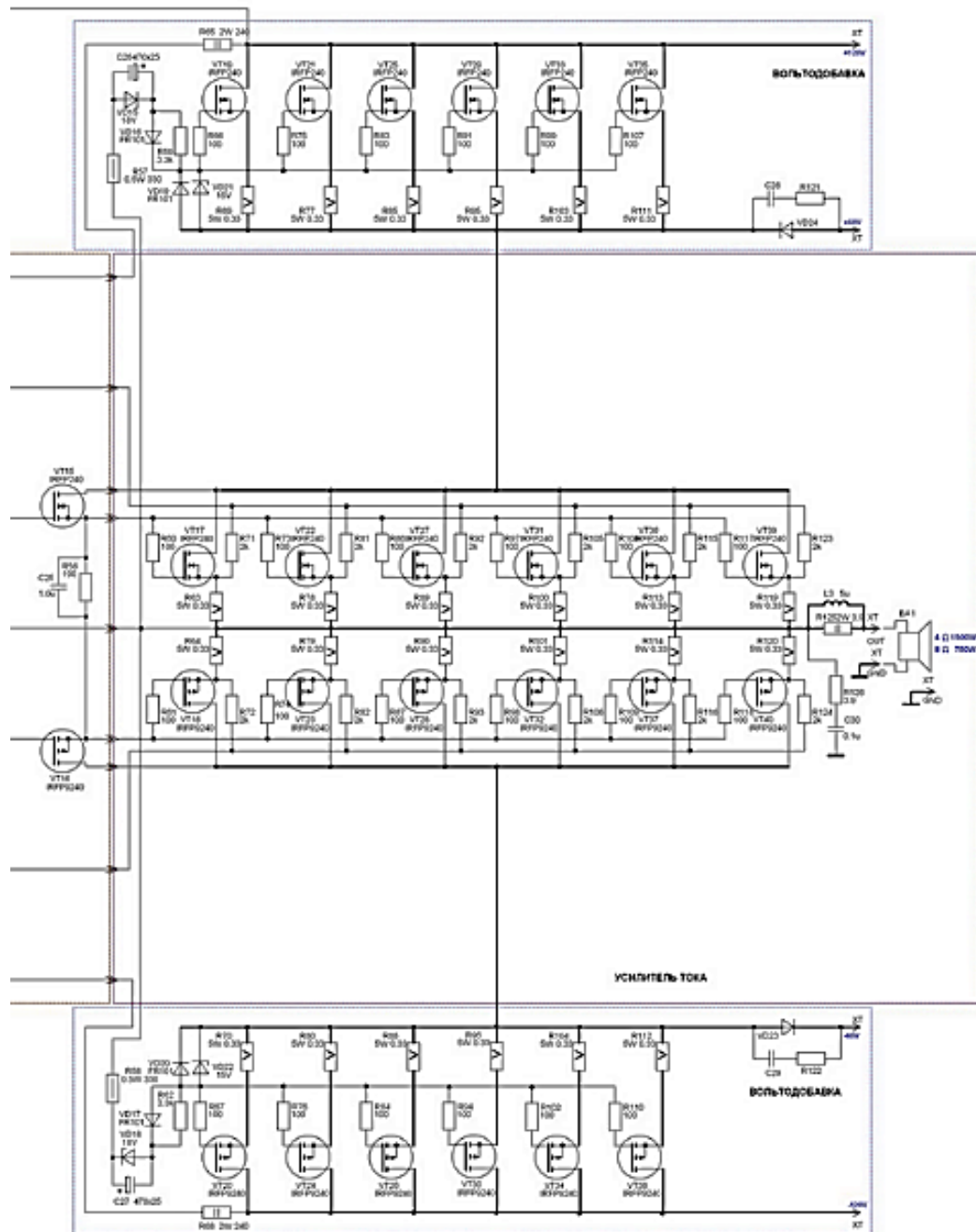




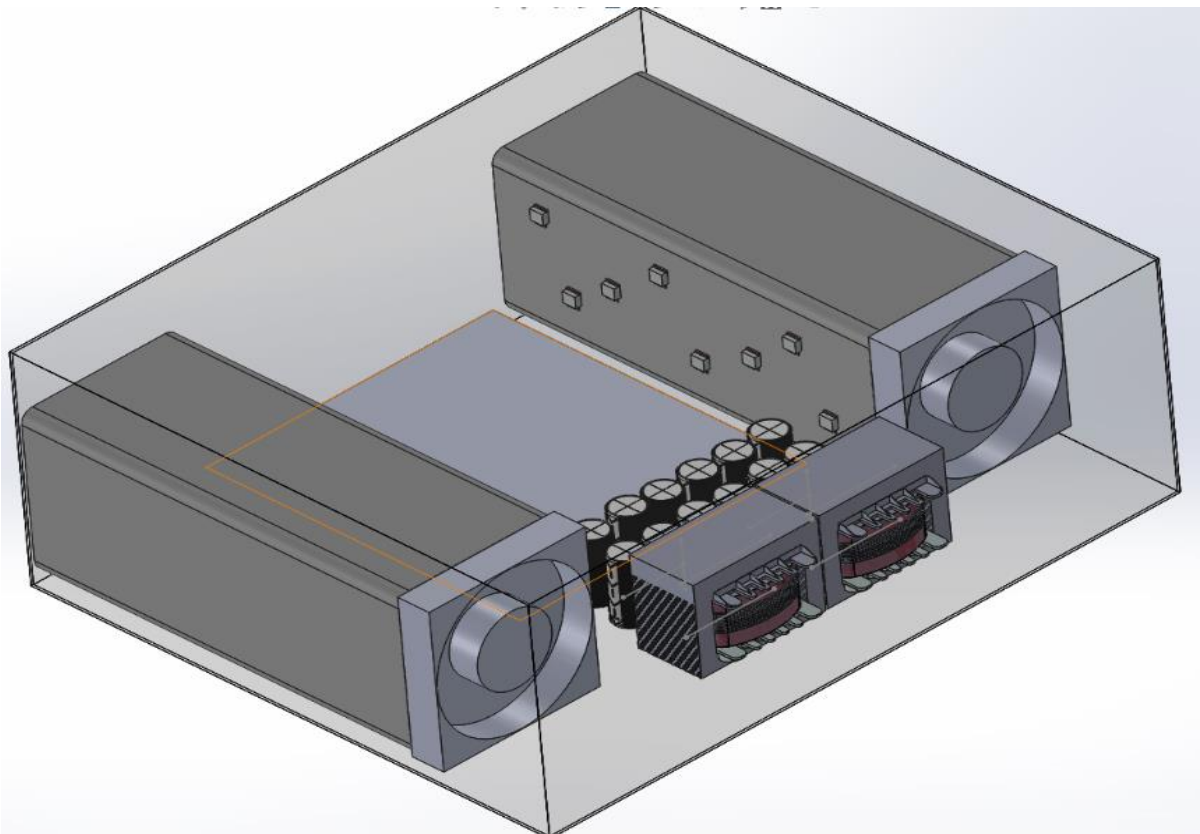
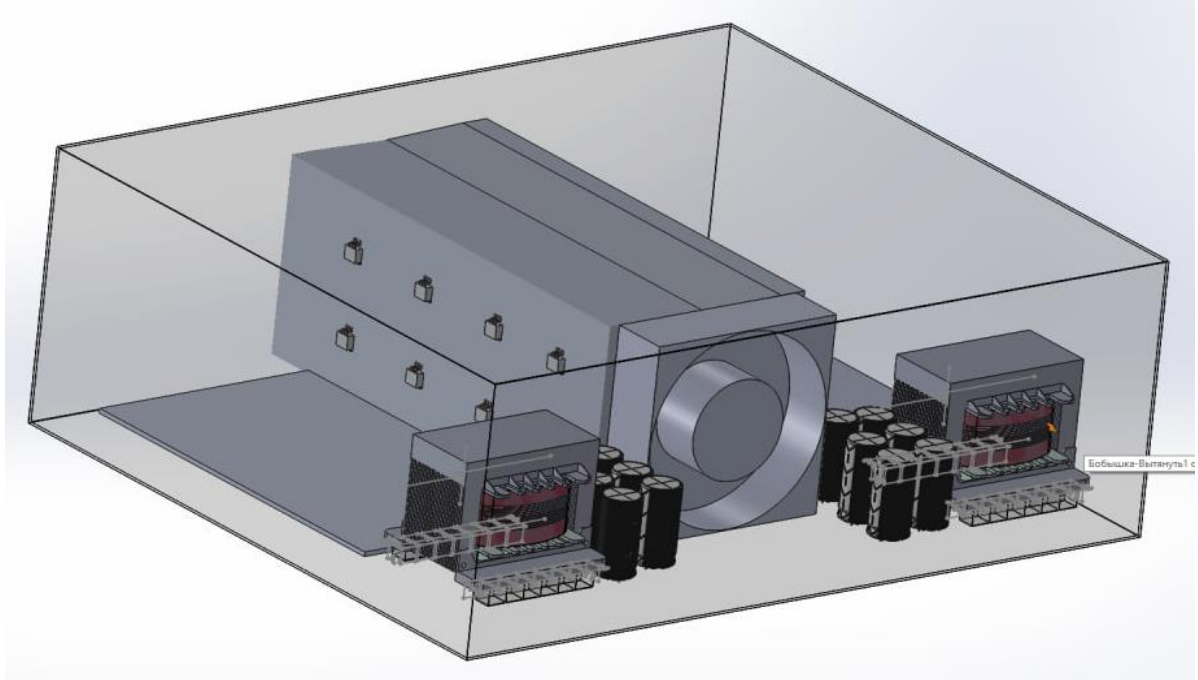


**ГРАФІЧНА ЧАСТИНА**

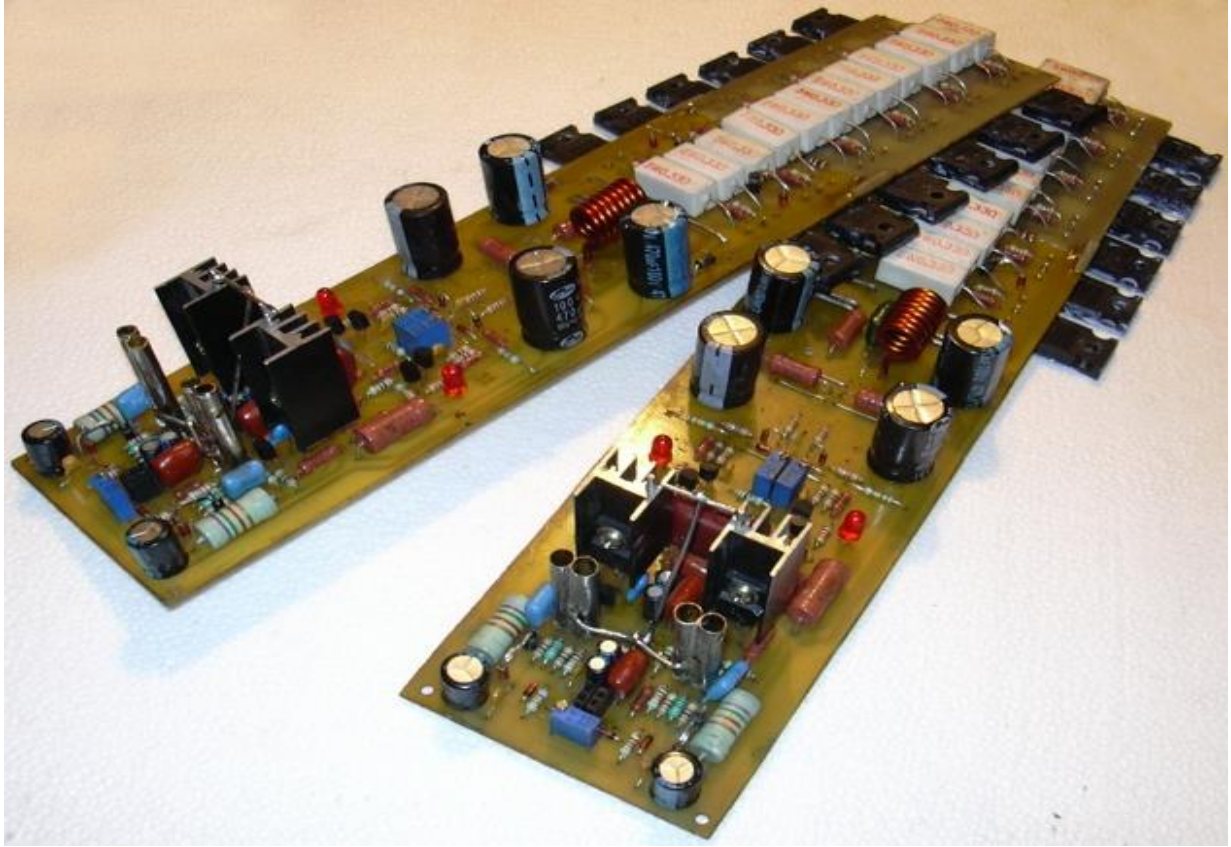
## ПРИНЦИПОВА СХЕМА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ КЛАСА G (ПРИКІНЦЕВИЙ КАСКАД)



## КОМПОНОВОЧНІ РІШЕННЯ МОДУЛЯ ПОТУЖНОСТІ ПІДСИЛЮВАЧА НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

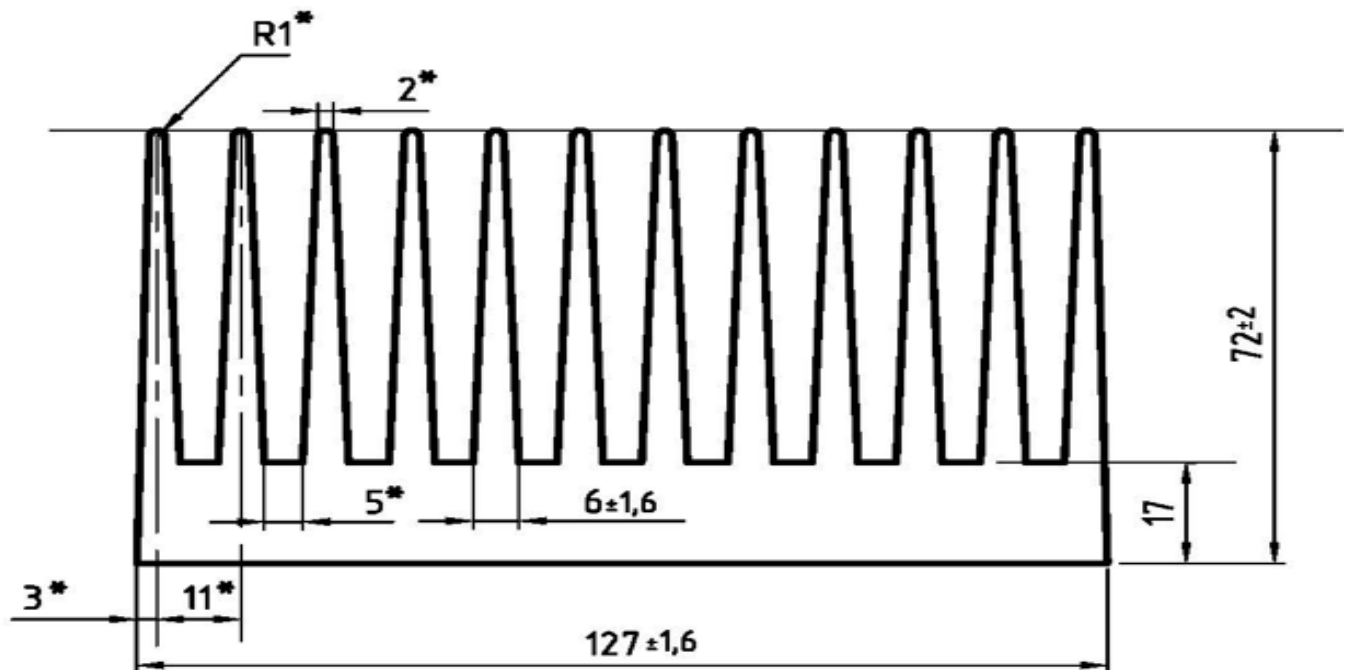


**ПЛАТА МОДУЛЯ ПОТУЖНОСТІ ПІДСИЛЮВАЧА  
НИЗЬКИХ ЧАСТОТ**





## КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ РАДІАТОР ТА КУЛЕР



**92X92X25 mm**

**JF0925-00 Series**

- Frame : Plastic Material UL 94V-0
- Impeller : Plastic Material UL 94V-0
- Speed Range : ±10%



SPECIFICATIONS											
Model	Bearing	Rated voltage (V)	Operating voltage (V)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (inchH <sub>2</sub> O)	Speed (R.P.M.)	Input Current (Amp)	Input Power (Watt)	Nominal Current (Amp)	Noise (dBA)	Weight (g)
JF0925-1UR00	B, H	12	10.2 ~ 13.8	67.85	0.204	3500	0.35	4.20	0.42	41.9	85
JF0925-1SR00	B, H, S			60.75	0.172	3200	0.31	3.72	0.32	38.9	
JF0925-1H-00	B, H, S			52.04	0.139	2800	0.25	3.00	0.35	35.1	
JF0925-1M-00	B, H, S			46.31	0.115	2500	0.17	2.04	0.20	32.0	
JF0925-1L-00	B, H, S			38.64	0.080	2100	0.13	1.56	0.16	27.6	
JF0925-1E-00	B, H, S			30.86	0.054	1700	0.09	1.08	0.10	23.1	
JF0925-2UR00	B, H	24	20.4 ~ 27.6	67.85	0.204	3500	0.23	4.20	0.24	41.9	
JF0925-2SR00	B, H, S			60.75	0.172	3200	0.18	4.32	0.18	38.9	
JF0925-2H-00	B, H, S			52.04	0.139	2800	0.15	3.60	0.19	35.1	
JF0925-2M-00	B, H, S			46.31	0.115	2500	0.11	2.64	0.15	32.0	
JF0925-2L-00	B, H, S			38.64	0.080	2100	0.08	1.92	0.13	27.6	
JF0925-2E-00	B, H, S			30.86	0.054	1700	0.06	1.44	0.07	23.1	
JF0925B4HR00	Dual Ball	48	40.8 ~ 60.0	52.04	0.139	2800	0.09	4.32	0.09	35.1	
JF0925B4MR00				46.31	0.115	2500	0.08	3.84	0.08	32.0	
JF0925B4LR00				38.64	0.080	2100	0.06	2.88	0.06	27.6	
JF0925B4ER00				30.86	0.054	1700	0.05	2.40	0.05	23.1	

Specifications subject to change without notice

# ТЕМПЕРАТУРНІ ПРОФІЛІ ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

