

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра авіоніки**

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)      проф. С.В. Павлова  
(П.І.Б.)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ**  
**“МАГІСТР”**

**Тема: Система автоматичного керування приводу синхронного генератора літака Boeing 737-500**

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ С.О. Бойчук  
(підпис) (П.І.Б.)

**Керівник:** \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. В.М. Лужбін  
(підпис) (П.І.Б.)

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**Охорона праці :** \_\_\_\_\_ доц. С.М. Занько  
(підпис) (П.І.Б.)

**Охорона навколишнього середовища:** \_\_\_\_\_ проф. В.Ф. Фролов  
(підпис) (П.І.Б.)

**Нормоконтролер:** \_\_\_\_\_ В. В. Левківський  
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2020

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Спеціальність 173 «Авіоніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ проф. С.В. Павлова

“27” жовтня 2020 р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання дипломної роботи

Бойчука Сергія Олександровича

1. Тема дипломної роботи: «Система автоматичного керування приводу синхронного генератора літака Boeing 737-500» затверджена наказом ректора від “02” жовтня 2020 р. № 1899/ст.
2. Термін виконання проекту: з 05 жовтня 2020 по 03 січня 2021.
3. Вихідні дані до проекту: Існуюча система електропостачання та споживачі електричної енергії літака Boeing 737-500.
4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз існуючої СЕП літака Boeing 737-500 та обґрунтування необхідності її вдосконалення. Розробка структурної схеми вдосконаленої СЕП літака. Розробка принципової електричної схеми привід-генераторного агрегату, принцип його дії та розрахунок частотних параметрів ПГА. Розробка принципової схеми автоматичного керування ПГА та розрахунок її основних параметрів. Характеристика показників надійності САК ПГА та обґрунтування вибору її функціональних елементів.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстрованого) матеріалу: Структурна схема існуючої та вдосконаленої системи електропостачання літака Boeing 737-500. Принципова електрична схема привід-генераторного агрегату. Частотні діаграми. Принципова електрична схема ЕСУП. Принципова електрична схема ТВП. Принципова електрична схема РН.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Підбір і вивчення відповідної літератури	05.10.20 – 12.10.20	
2.	Аналіз існуючої СЕП літака Boeing 737-500 та обґрунтування необхідності її вдосконалення. Розробка структурної схеми вдосконаленої СЕП	13.10.20 – 22.10.20	
3.	Розробка принципової електричної схеми та розрахунок частотних параметрів привід-генераторного агрегату	23.10.20 – 01.11.20	
4.	Розробка системи автоматичної керування привід-генераторного агрегату	2.11.20 – 13.11.20	
5.	Розрахунок основних параметрів структурних елементів системи автоматичного керування	14.11.20 – 24.11.20	
6.	Оформлення пояснювальної записки проекту і графічного матеріалу	25.11.20 – 03.12.20	
7.	Підготовка до захисту дипломної роботи	04.12.20 – 10.12.20	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц. Занько С.М.		
Охорона навколишнього середовища	Проф. Фролов В.Ф.		

8. Дата видачі завдання: “01” жовтня 2020 р.

Керівник дипломного проекту \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. В.М. Лужбін  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ С.О. Бойчук  
(підпис дипломника) (П.І.Б.)

## ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СЕП ЛІТАКА BOEING 737-500 ТА ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЇЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СЕП .....	13
1.1. Загальний опис системи електропостачання.....	13
1.2. Первинна система електропостачання змінного струму 200/115 В частотою 400 Гц .....	15
1.2.1. Апаратура регулювання, захисту і управління генераторів .....	18
1.2.2. Привід постійних обертів 40AGD10 .....	19
1.2.3. Резервні джерела живлення СЕП 115 В 400 Гц .....	21

1.2.4. Електропостачання змінним струмом від аеродромного джерела .....	22
1.3. Система шин електропостачання первинної СЕП.....	23
1.4. Система електропостачання постійним струмом напругою 28,5 В.....	24
1.4.1. Акумуляторна батарея RG-380E/60В.....	26
1.4.2. Зарядний пристрій акумуляторної батареї .....	27
1.5. Функціональне призначення органів управління, контролю і індикації системи електропостачання та їх розміщення на приладових панелях і щитках пультів управління .....	28
1.6. Обґрунтування необхідності вдосконалення існуючої СЕП.....	32
1.7. Висновок .....	35
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИВІД-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ, ПРИНЦИП ЇЇ ДІЇ ТА РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГА.....</b>	<b>36</b>
2.1. Принципова схема привід-генераторного агрегату.....	36
2.2. Розрахунок параметрів ПГА .....	40
2.3. Висновок .....	51
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПГА ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....</b>	<b>52</b>
3.1. Електрична схема управління та підсилення, розрахунок її параметрів .....	52
3.2. Розробка принципової електричної схеми блоку живлення ЕСУП та розрахунок його основних параметрів .....	58
3.3. Розрахунок параметрів регулюючого трансформатора випрямного пристрою ТВП.....	60
3.4. Розробка принципової електричної схеми регулятора напруги і розрахунок його параметрів .....	69
3.5. Висновок .....	81
<b>РОЗДІЛ 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ САК ПГА ТА ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЇЇ ОСНОВНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....</b>	<b>83</b>

4.1. Розрахунок показників надійності САК ПГА .....	83
4.2. Особливості застосування асинхронного тахогенератора в системі автоматичного керування ПГА.....	86
4.3. Особливості застосування функціональних елементів САК ПГА.....	88
4.4. Висновок .....	89
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	90
Вступ.....	90
5.1. Опис робочого місця та умов праці інженера-проектувальника .....	90
5.2. Перелік шкідливих та небезпечних факторів, що діють на інженера-проектувальника .....	92
5.3. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів.....	92
5.3.1. Аналіз виробничого шуму.....	92
5.3.2. Аналіз мікроклімату робочої зони.....	93
5.3.3. Аналіз впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону .....	95
5.4. Розробка заходів з охорони праці.....	96
5.5. Пожежна безпека.....	97
5.6. Розрахунок звукоізоляційної перегородки .....	98
Висновок .....	100
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....	102
Вступ.....	102
6.1. Електромагнітне випромінювання та його вплив на навколишнє природнє середовища .....	102
6.2. Методи і засоби захисту навколишнього середовища від електромагнітного випромінювання привід-генераторного агрегату та авіаційного обладнання.....	105
6.3. Розрахунок екрану для захисту від електромагнітного випромінювання МНРЛС .....	110
Висновок .....	112
ВИСНОВКИ.....	114

## ВСТУП

Сучасні літальні апарати (ЛА) насичені складним обладнанням, різними електронними і електрифікованими системами. Робота всіх цих комплексів можлива лише при використанні електричної енергії, що виробляється бортовими електроенергетичними установками, які задовольняють певні вимоги. В даний час, на сучасних ЛА в якості основних джерел електроенергії використовуються установки змінного струму з постійною частотою. Це пов'язано з тим, що такий тип систем електропостачання (СЕП) є більш надійніший та має кращі льотно-експлуатаційні характеристики. Також використання генераторів змінного струму є більш доцільним, чим використання генераторів постійного струму, оскільки останні мають щітково-колекторний вузол, який є одним з головних недоліків таких генераторів. Тому на сьогодні створення нових, більш надійних і простіших в експлуатації, генераторів змінного струму і їх приводів є дуже актуальною проблемою. Вчені і конструктори приділяють багато уваги саме джерелам електроенергії СЕП, оскільки важливість цієї системи на борту літального апарату є великою і надійність роботи її визначає надійність роботи інших систем.

Найбільш широке і практичне застосування на вітчизняному та іноземному авіаційних ринках набули літаки сімейства Boeing. Висока надійність та великий експлуатаційний ресурс забезпечує конкурентоспроможність цих літаків на ринку авіаційних перевезень.

Основним джерелом електроенергії змінного струму на літаку є привід-генераторний агрегат (ПГА) змінного струму, в якості привода постійної частоти обертання в яких використовується гідромеханічний привід. Такі приводи мають ряд недоліків: невисокий коефіцієнт корисної дії (ККД), конструктивна складність, великі витрати при виробництві і в обслуговуванні, в результаті чого є недостатній

рівень якості електроенергії, а також малий ресурс роботи гідромеханічних приводів.

Ці недоліки потребують створення нових типів приводів, які могли б забезпечувати кращу якість електроенергії і мали б більший ресурс роботи. Створення нового типу приводу є важливим завданням, оскільки привід постійної частоти обертання (ППЧО) є основним елементом привід-генераторного агрегату змінного струму постійної частоти.

Одним із таких типів є електромеханічні ППЧО. У них відсутні ряд недоліків, які притаманні гідромеханічним приводам. В електромеханічних приводах вища надійність роботи, оскільки в таких приводах відсутні будь-які механічні тертя в конструкції, тому переваги електромеханічних ППЧО дають змогу конкурувати з гідромеханічними приводами.

Слід зазначити, що схеми управління таких типу ППЧО мають на порядок вищі показники надійності. Відсутність гідравлічної частини, яка здійснює керування приводом гідромеханічного, дає змогу більш ефективно здійснювати керування, при цьому якість вихідної напруги задовольняє всі вимоги та стандарти, а собівартість виробництва і обслуговування електронних схем управління в рази нижча. Це досягається шляхом застосування сучасних методів управління, таких як тиристорні схеми, транзисторні чи схеми побудовані на мікроконтролерах, а також використання сучасної електронної бази компонентів, які мають більш якісні і кількісні показники.

Актуальність аналізу та висвітлення такого роду питань, в першу чергу, базується на тенденції переходу до автоматизованих систем управління на базі нових принципів керування, побудованих на електронних компонентах. Відмова від гідромеханічних методів керування дає змогу подолати ряд проблем і недоліків, пов'язаних із значними масо-габаритними показниками, коефіцієнтом корисної дії, а також значної собівартості при виробництві та технічному обслуговування, при чому останнє становить набагато більшу частину цих витрат. Актуальність даної теми пояснюється також глобальними проривами в сфері електроніки і мікропроцесорів, що зумовлює відмову від старих, менш ефективних способів і

методів керування різними системами. Але така тенденція застосовується в тих випадках, де її застосування є раціональним, а використання гідромеханічного керування приводами, що стосується не тільки авіаційної сфери, буде менш ефективним. В даній дипломній роботі детально продемонстровано доцільність такої заміни, а також ефективність застосування електричної схеми автоматичного керування привод-генераторним агрегатом (ПГА).

Завданням дипломної роботи є дослідження існуючої системи електропостачання літака, а саме джерел генерування електроенергії – привод-генераторних агрегатів. На основі цього досліджено головні переваги і недоліки існуючого ПГА, а також запропоновано основні шляхи вирішення і вдосконалення первинної системи електропостачання літака. Розробити електричну принципову схему ПГА та розрахувати його параметри. Розробити електричну принципову схему системи автоматичного керування (САК) ПГА, виходячи з результатів отриманих з розрахунку його параметрів. Дослідити отримані результати розрахунків, та здійснити порівняльний аналіз існуючої та вдосконаленої СЕП. Розробити структурні схеми усіх конструктивних складових елементів САК, а також привести обґрунтовані розрахунки їх параметрів.

Метою даної дипломної роботи є розробка принципової схеми та розрахунок системи автоматичного керування привод-генераторного агрегату, а також розрахунок частотних характеристик електромеханічного багатоступінчатого ПГА, що складається з електромагнітної муфти ковзання, асинхронного перетворювача, синхронного генератора та апаратури регулювання і управління.

Об'єктом роботи являється схема керування привод-генераторним агрегатом, а також інші основні складові елементи приводу. Виходячи з цього, предметом роботи є основні принципи і методи керування ППЧО ПГА, а також їх реалізація на практиці.

В дипломній роботі застосовано низку загальнонаукових і спеціальних методів пізнання, вибір яких обумовлений особливостями його об'єкту, предмету, мети і завдань проекту. Тут застосовані такі методи дослідження: як аналіз і синтез, порівняння, моделювання, а також метод опису.

## **СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АД –	авіадвигун
АКБ –	акумуляторна батарея
АП –	асинхронний перетворювач
БТС –	блок трансформаторів струму
ДСУ –	допоміжна силова установка
ЕЕ –	електроенергія
ЕМК –	електромагнітна муфта ковзання
ЕРС –	електрорушійна сила
ЕСУП –	електрична схема управління та підсилення
МК –	мікроконтролер
ОП –	Обмотка підмагнічування
ПГА –	привід-генераторний агрегат
ППО –	привід постійних обертів
ППЧО –	привід постійної частоти обертання
РН –	регулятор напруги
САК –	система автоматичного керування
СГ –	синхронний генератор
СЕР –	система електропостачання
ТВБ –	трансформаторно-випрямний блок
ТВП –	трансформаторно-випрямний пристрій

## **РЕФЕРАТ**

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Система автоматичного керування приводу постійної частоти обертання літака Boeing 737-500»: 117 сторінок, 33 рисунка, 8 таблиць, 23 використаних джерел.

ЛІТАК, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ПРИВІД ПОСТІЙНОЇ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ, СИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА МУФТА КОВЗАННЯ, АСИНХРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПРИВІД-ГЕНЕРАТОРНИЙ АГРЕГАТ, АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – існуюча система електропостачання літака Boeing 737-500.

Мета дипломної роботи – вдосконалення системи електропостачання шляхом заміни привід-генераторного агрегату та розробки його автоматичної системи керування.

Метод дослідження – аналіз системи електропостачання, математичні розрахунки.

На основі матеріалів аналізу існуючої системи електропостачання літака запропонований шлях її вдосконалення; розроблена принципова електрична схема привід-генераторного агрегату змінного струму постійної частоти; виконаний розрахунок частотних характеристик привід-генераторного агрегату; розроблено систему автоматичного керування привід-генераторним агрегатом; виконаний розрахунок основних параметрів функціональних елементів системи.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців конструкторських бюро при розробці приводів постійної частоти обертання синхронних генераторів та їх систем автоматичного керування.

## **РОЗДІЛ 1**

### **АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СЕП ЛІТАКА BOEING 737-500 ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЇЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СЕП**

### **1.1. Загальний опис системи електропостачання**

Система електропостачання призначена для безперебійного забезпечення електроенергією змінного і постійного струму усіх споживачів на борту літака. Для цього на літаку є дві СЕП – первинна і вторинна (рис. 1.1).

Первинна СЕП – це система трифазного змінного струму напругою 200/115 В постійної частоти 400 Гц. Вторинна система являє собою СЕП постійного струму напругою 28,5 В, яка живиться від первинної системи через трансформаторно-випрямні блоки та паралельно їм підключеної акумуляторної батареї, для згладжування пульсації мережі.

Джерелами електроенергії (ЕЕ) первинної СЕП є два генератора змінного струму, встановлені по одному на кожному двигуні. Генератори приводяться в обертання через приводи постійних обертів (ППО), що забезпечує стабілізацію частоти змінного струму в необхідному діапазоні. При нормальній роботі кожен генератор забезпечує електроенергією власну систему електричних шин, однак, якщо один з генераторів не функціонує, то частина цих шин автоматично переключається на енергопостачання від працюючого генератора.

Резервними джерелами живлення первинної СЕП є генератор змінного струму, встановлений на допоміжній силовій установці (ДСУ) і статичний перетворювач.

В якості джерел електроенергії вторинної СЕП використовують три трансформаторно-випрямних блоки (ТВБ). Також сюди відноситься акумуляторна

батарея, яка забезпечує подачу постійного струму напругою 24 В тим споживачам, які повинні зберігати працездатність при відсутності інших джерел живлення.

Органи управління, контролю і індикації системи електропостачання знаходяться в кабіні пілотів, на верхній приладовій дошці.

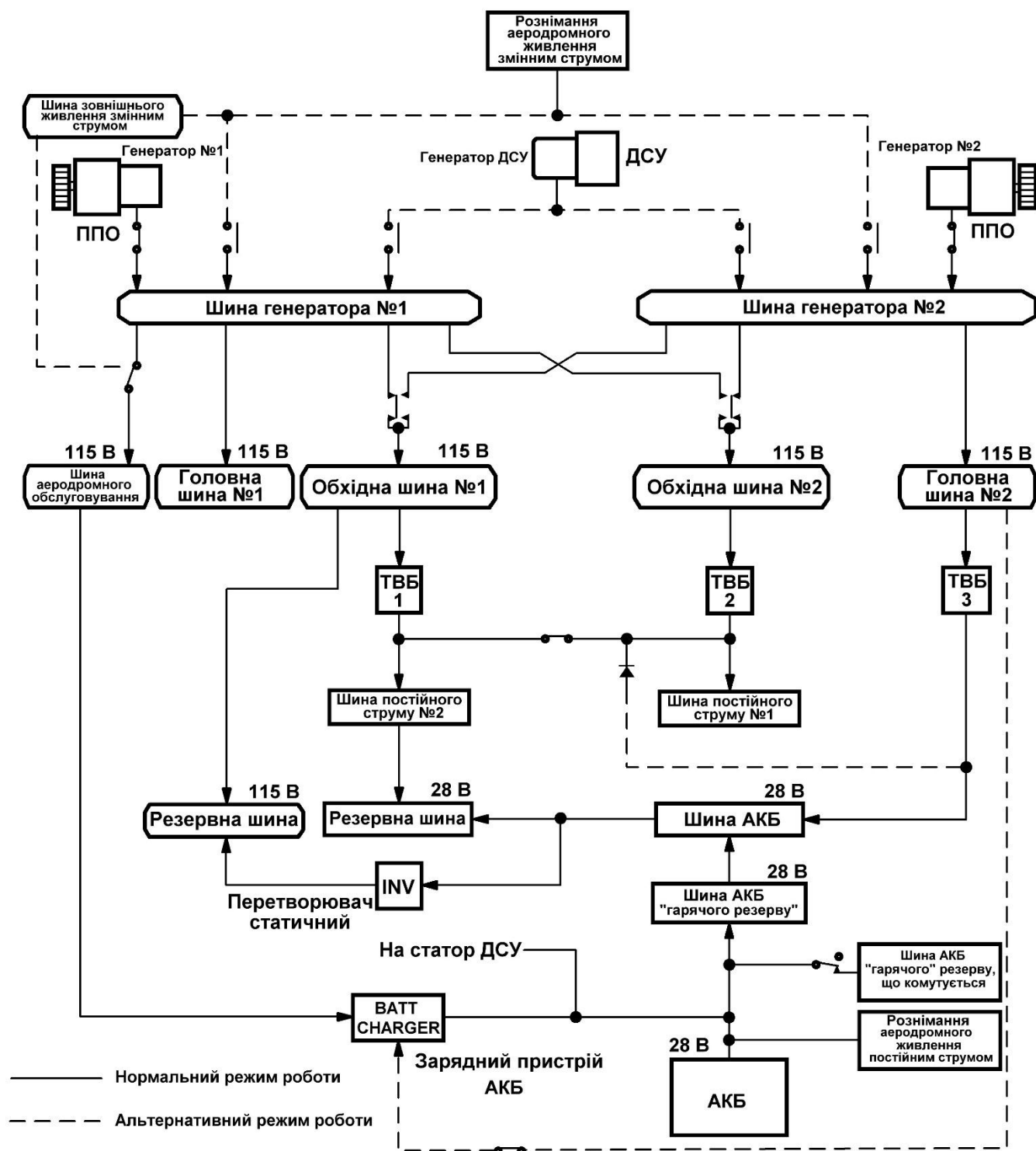


Рис. 1.1. Структурна схема системи електропостачання

## 1.2. Первинна система електропостачання змінного струму 200/115 В частотою 400 Гц

До складу первинної СЕП змінного трифазного струму напругою 200/115 В постійної частоти 400 Гц (рис. 1.2) в якості джерел електроенергії входять два генератори змінного трифазного струму марки 976J498-2, встановлених на маршових двигунах CFM56-3s, і трифазний синхронний генератор, який приводиться в обертання від ДСУ.

В систему також входять: три блоки регулювання, захисту і управління генераторів, які забезпечують нормальну роботу генераторів, система шин, три контактори, тумблери та світлові індикатори.

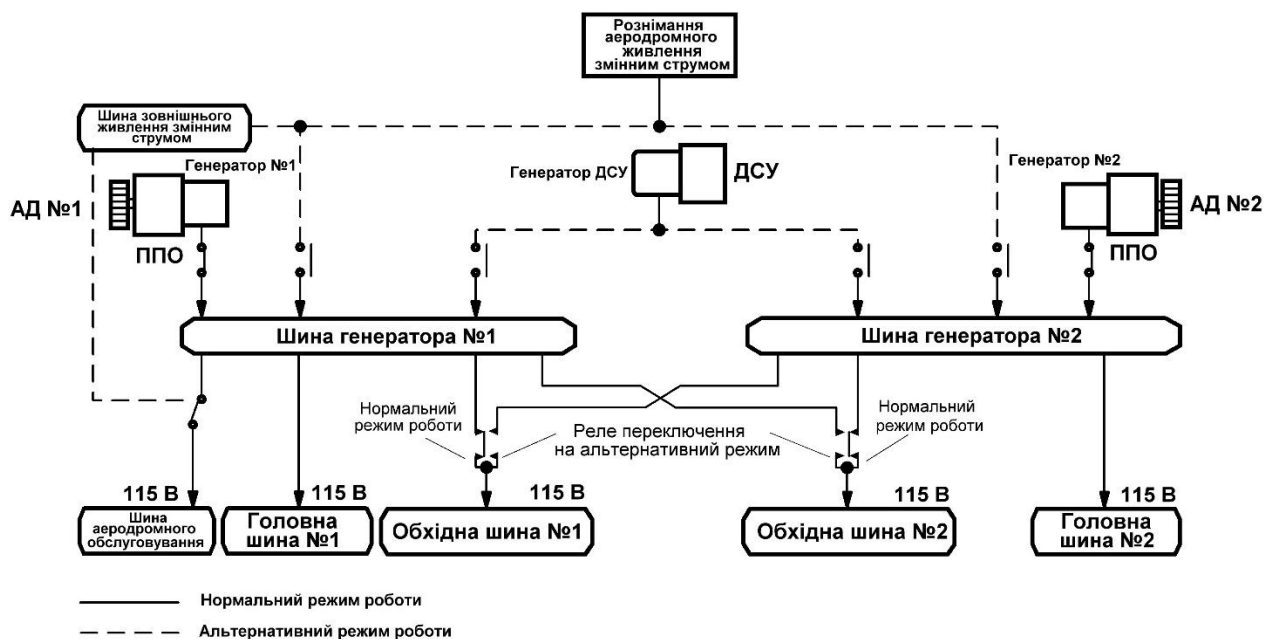


Рис. 1.2. Схема структурна СЕП 115 В 400 Гц

Первинну ЕЕ генерують два трифазних безщіткових генератори моделі 976J498-2, потужністю 40 кВа кожен (рис. 1.3.), встановлених по одному на кожному двигуні. Кожен генератор є частиною привід-генераторного агрегату (ПГА), привід постійних обертів якого підтримує постійну частоту обертання ротора генератора протягом усього часу нормальної роботи двигуна.

Основна функція генератора – перетворення механічної енергії маршового двигуна літака в електричну енергію змінного трифазного струму напругою 120/208 В частотою 400 Гц, що призначена для живлення споживачів цієї електроенергії.

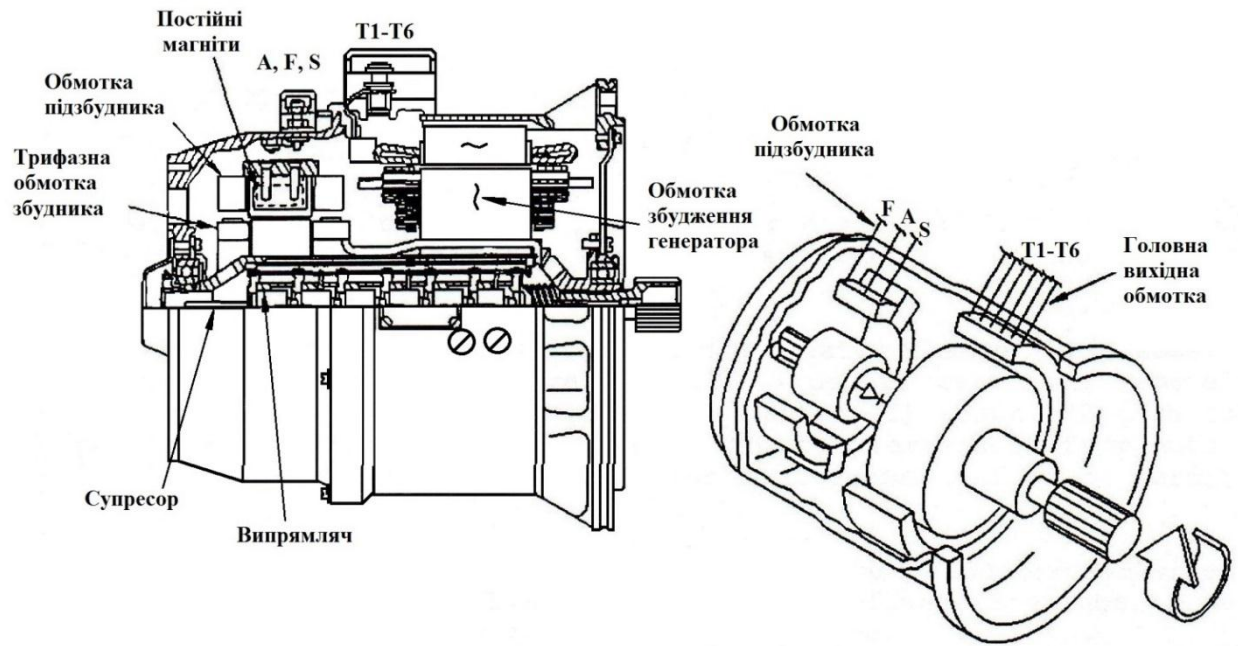


Рис. 1.3. Конструктивне виконання генератора 976J498-2

Генератор є каскадним з'єднанням трьох безконтактних електричних машин: підбудника, збудника і основного синхронного генератора (рис. 1.4).

Під час запуску маршового двигуна літака, генератор самозбуджується і починає генерувати електроенергію змінного струму постійної частоти. При обертанні ротора генератора постійні магніти, що закріплені нерухомо на статорі, наводять в трифазній обмотці збудника електрорушійну силу (ЕРС) з частотою, яка пропорційна частоті обертання ротора авіадвигуна. В трифазній обмотці збудника, що обертається, виникає напруга змінного струму. Ця напруга через діодний випрямляч, що обертається, подається на обмотку збудження основного генератора і створює постійне магнітне поле, що обертається разом з ротором та наводить в головній вихідній обмотці генератора ЕРС, яка утворює трифазну напругу 200/115 В на виході генератора.

Напруга, вироблена основним генератором, подається на регулятор напруги. В регуляторі напруга випрямляється і подається на регулюючу обмотку підбудника, яка в свою чергу, разом з постійними магнітами, наводить в

трифазній обмотці збуджувача додаткову ЕРС. Таким чином підтримується на виході постійна напруга.

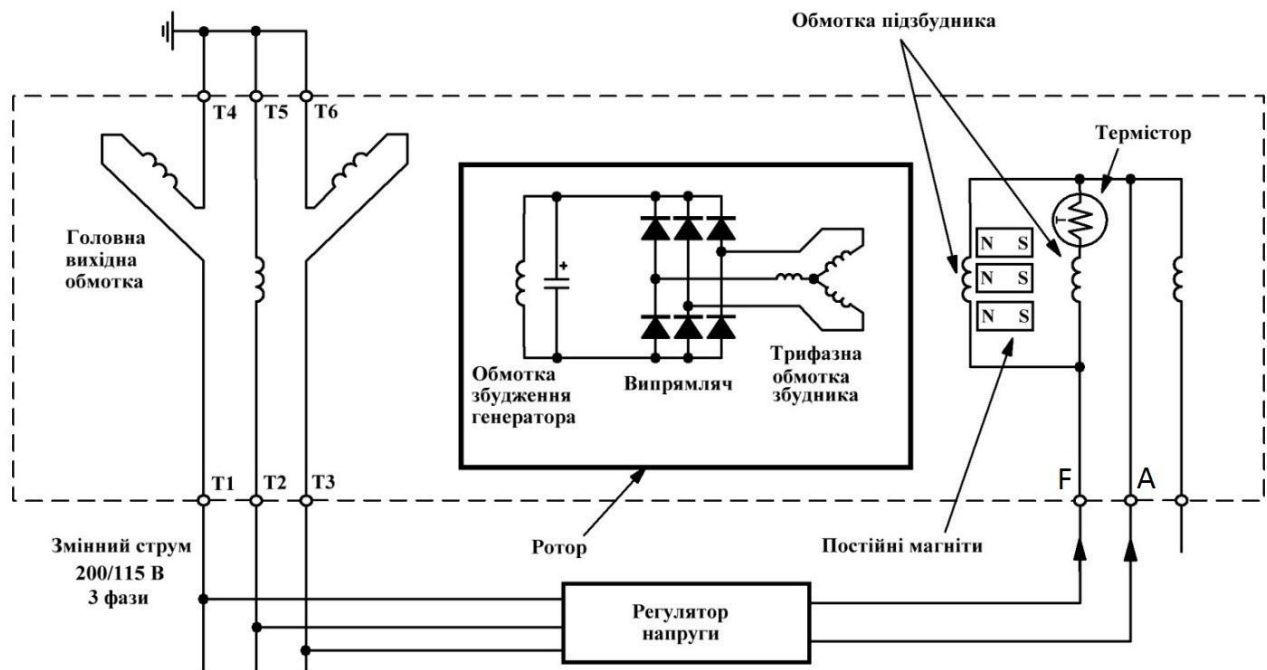


Рис. 1.4. Схема генерування змінного струму генератором 976J498-2

Конструкцією генератора передбачені 6 клем змінного струму та 2 клем постійного струму.

T1, T2 та T3 – клем фаз. T4, T5 та T6 – нейтральні клем та клем заземлення. T1– клем фази А, T2– клем фази В, T3– клем фази С.

Дві клем постійного струму F та А призначені для подачі напруги в коло підбудника генератора від регулятора напруги.

В літаку Boeing 737-500 на основних авіадвигунах застосовують два генератора фірми «Hamilton» (рис. 1.5), потужністю по 40 кВа кожний, які здатні розвивати номінальну потужність 80 кВа, а при необхідності 135 кВа, але короткочасно – на час в 5 хвилин. Пікова потужність для таких моделей складає 160 кВа.

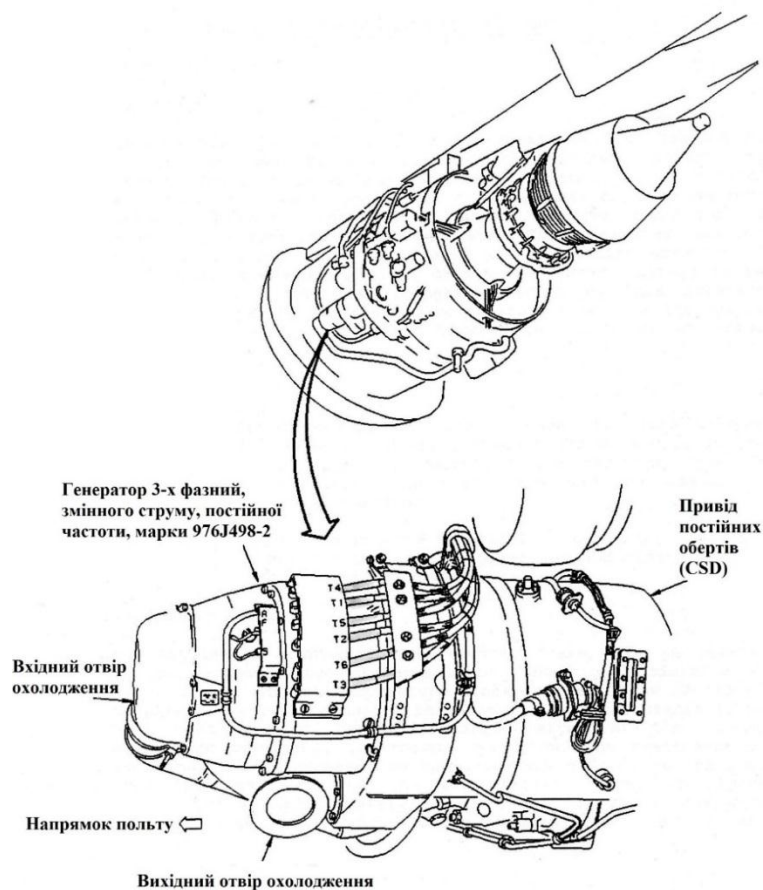


Рис. 1.5. Розміщення генератора 976J498-2

### 1.2.1. Апаратура регулювання, захисту і управління генераторів

Апаратура регулювання, захисту і управління забезпечує нормальну роботу генератора і якість параметрів виробленої електроенергії. Для цього на літаку є блок регулювання, захисту і управління (БРЗУ).

Блок забезпечує:

- а) включення генератора на бортову мережу, якщо виконані умови:
  - вимикач генератора включений;
  - напруга генератора знаходиться в межах від  $100 \pm 3$  В до  $130 \pm 2$  В;
  - частота струму перевищує  $365 \pm 5$  Гц;
  - диференційний захист справний;
  - відсутній обрив фаз;
- б) відключення генератора від бортової мережі та відключення збудження генератора при:
  - досягненні напруги більше  $130 \pm 2$  В будь-якої фази;

- досягненні напруги менше  $100 \pm 3$  В будь-якої фази;
- обриві будь-якої фази;
- несправних діодах;
- короткому замиканні в межах диференціального захисту;
- в) відключення генератора від бортової мережі при частоті струму:
  - меншій  $365 \pm 5$  Гц;
  - більшій  $430 \pm 5$  Гц;
- г) підтримання фазної напруги генератора в межах  $100 \pm 3 - 130 \pm 2$  В.

На літаку Boeing 737-500 є три блоки БРЗУ, які розміщені з правої сторони на передній частині панелі Р6 і є взаємозамінні.

Для підключення генератора до системи розподілення ЕЕ в СЕП передбачено 3 контактори. Два контактори генераторів №1 і №2 розташовані з кожного боку шпангоута, який знаходиться праворуч в ніші передньої стойки шасі. Контактор генератора ДСУ розташований внизу панелі Р6 в кабіні екіпажу.

### **1.2.2. Привід постійних обертів 40AGD10**

Привід постійних обертів (рис. 1.6) призначений для забезпечення постійної швидкості обертання ротора генератора незалежно від режимів роботи маршового двигуна, навантаження генератора та інших умов польоту літака.

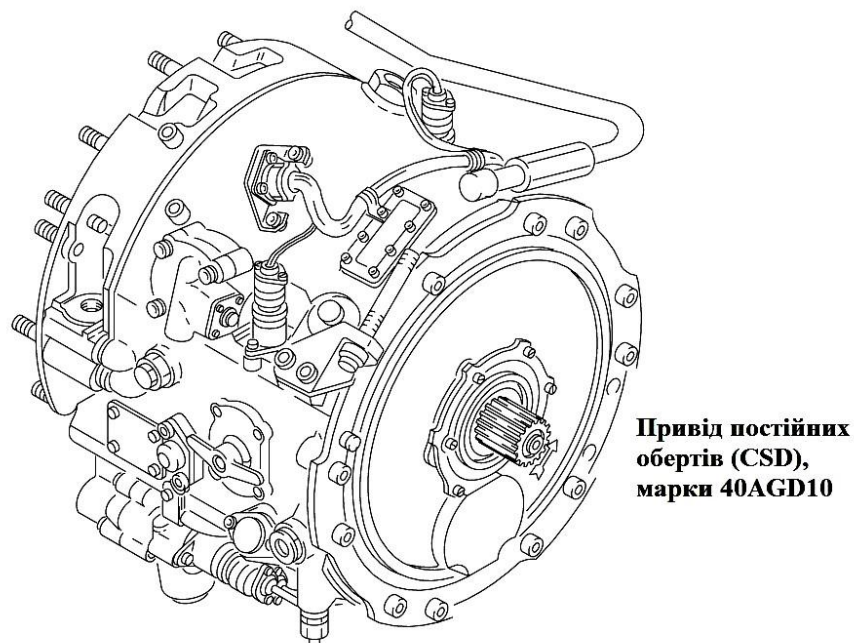


Рис. 1.6. Конструктивне виконання приводу постійних обертів.

На літаку Boeing 737-500 цю функцію виконують два гідромеханічні ППО, моделі 40AGD10, що встановлені разом з основними генераторами, і складають єдиний привід-генераторний агрегат (рис. 1.7).

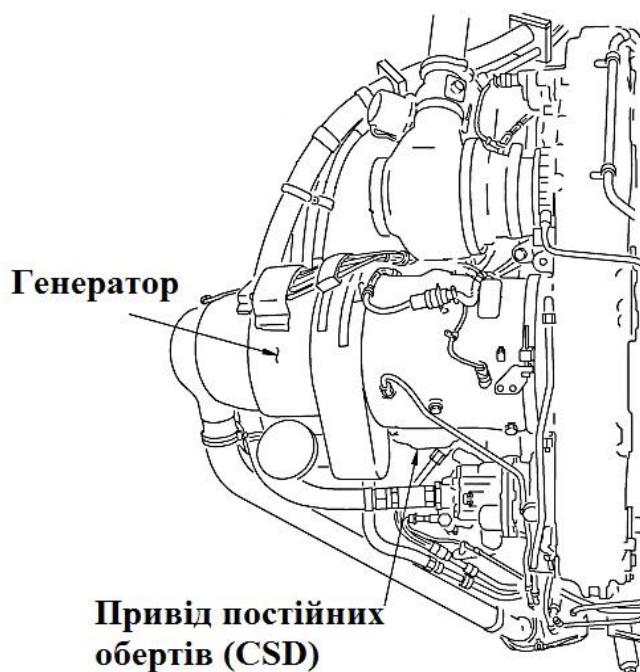


Рис. 1.7. Привід-генераторний агрегат

ППО являє собою планетарну передачу, яка складається з двох частин: гідравлічної частини і механічного диференціалу. Момент обертання валу авіадвигуна передається на привід через планетарну диференційну передачу. Передача, в залежності від зміни швидкості обертання валу двигуна, докручує або гальмує частоту обертання на вихідному валу. Частота обертання валу в такому приводі стабілізується за рахунок зміни продуктивності гідронасосу. В режимі докручування гідравлічна частина працює як гідродвигун, а в режимі реверсу – як гідронасос. Також ППО працює і в номінальному режимі (прямой передачі).

В залежності від зміни обертів на вході, ППО буде збільшувати або зменшувати оберти так, що б на вихідному валу була постійна частота обертання 6000 об/хв.

Для нормальної роботи ППО потрібно підтримувати певний рівень масла в системі. Для цього передбачено власну масляну систему, яка також включає в себе систему очистки і охолодження масла. Масло являється не тільки масляною речовиною для змащування елементів ППО, а також робочою рідиною гідравлічної частини приводу. Регулятор масла виконує функцію розподілу масла в системі і контролює об'єм необхідної кількості рідини для регулювання моменту обертання валу.

Індикація і керування приводом здійснюється в кабіні пілотів, на панелі управління ППО P5-5.

Основні характеристики приводу 40AGD10:

1. Оберти на вході агрегату — 4300-8600 об/хв. (2:1);
2. Оберти на виході агрегату — 6000 об/хв.;
3. Номінальна потужність на виході агрегату — 40 кВа;
4. Вага — 25,5кг (0,64кг/кВт);
5. Розміри — 320 x 220 мм.

### **1.2.3. Резервні джерела живлення СЕП 115 В 400 Гц**

Резервним джерелом СЕП на літаку є трифазний синхронний генератор ДСУ марки 976J497-1, потужністю 30 кВа (рис. 1.8).

Генератор ДСУ аналогічний основним генераторам літака за тим винятком, що в ньому відсутній ППО.

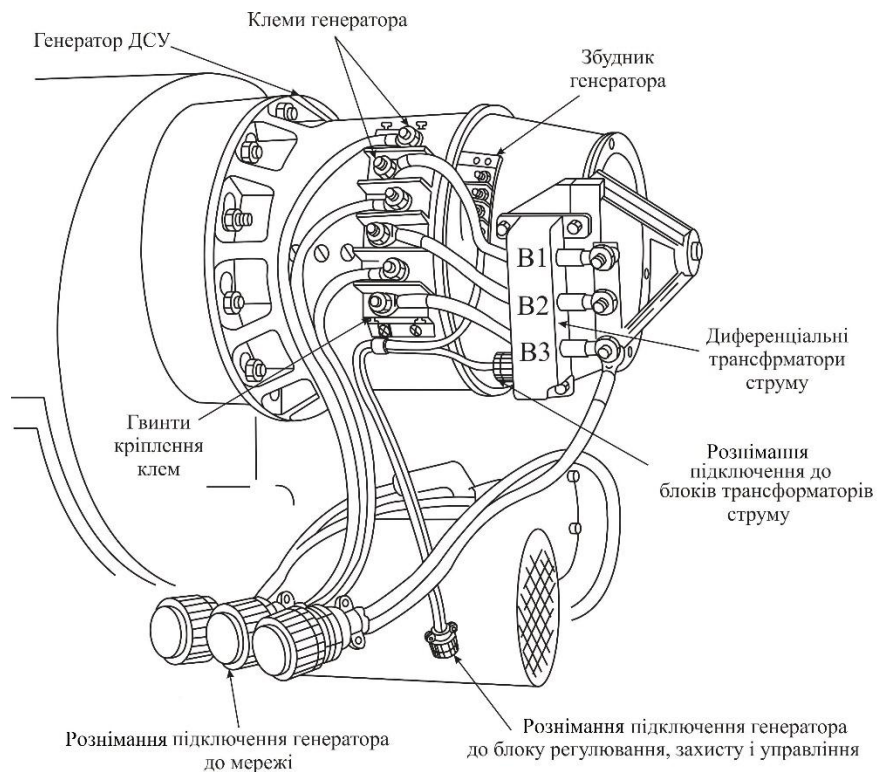


Рис. 1.8. Генератор ДСУ марки 976J497-1 фірми “Hamilton”

При відсутності електроживлення від основних генераторів, або на землі при відключених основних двигунах, живлення СЕП може забезпечуватися генератором ДСУ. При цьому шина одного із генераторів підключається до живлення від генератора ДСУ, а інша шина буде знеструмлена.

Робота ДСУ контролюється на верхньому пульті, на якому передбачений вольтметр і амперметр змінного струму для контролю за навантаженням генератора.

Статичний перетворювач, моделі 1-002-0102-2089, потужністю 1000 ВА, являється також аварійним джерелом живлення. Його основне призначення – постачати однофазним змінним струмом напругою 115 В постійної частоти 400 Гц шину системи резервного електропостачання змінного струму при втраті або відсутності основних джерел живлення. Живлення статичного перетворювача здійснюється постійним струмом 24 В від шини батареї. Розташований статичний перетворювач в електронному відсіку на полиці ЕЗ-1 (Рис. 1.9).

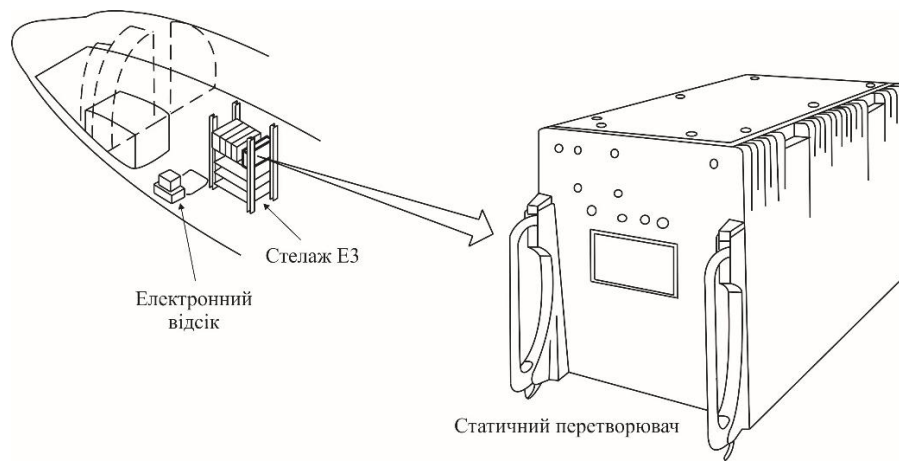


Рис. 1.9. Розміщення статичного перетворювача

#### **1.2.4. Електропостачання змінним струмом від аеродромного джерела**

На землі первинна СЕП отримує електроенергію від аеродромного джерела живлення. Рознімання для подачі аеродромного живлення змінного струму знаходиться поряд з нішею переднього колеса шасі – справа, внизу на фюзеляжі. Світлові сигналізатори, розташовані на панелі поруч з розніманням аеродромного обслуговування контролювати підключення бортової мережі до аеродромного джерела електроживлення.

Підключення аеродромного джерела відбувається шляхом ввімкнення вимикача, після чого електроенергія буде подана на обидві генераторні шини. Для того, щоб ввімкнути перемикач, потрібно підключити акумуляторну батарею на борт. На літаку також є рознімання аеродромного джерела живлення постійним струмом напругою 28,5 В.

#### **1.3. Система шин електропостачання первинної СЕП**

Кожний канал системи електропостачання змінним струмом складається з генераторної, головної і обхідної шин. При відмові генераторної шини електроживлення на пов'язану з нею обхідну шину може бути автоматично подано з іншої генераторної шини, яка знаходиться під напругою. Для цього в системі передбачено перемикаюче реле, яке автоматично підключає іншу генераторну шину при відмові своєї за умови, що перемикач шин знаходиться в положенні автоматичного переключення.

Електроенергія від генератора на генераторну шину подається шляхом підключення відповідного вимикача генератора.

В випадку, якщо літак знаходиться на землі і до нього підключено аеродромне джерело, то після ввімкнення вимикача аеродромного джерела, відключаються обидва генератори двигуна, а на обидві генераторні шини подається аеродромне живлення.

При працюючій ДСУ електроенергія з її генератора за допомогою відповідних перемикачів генератора ДСУ може бути подана як на генераторну шину №1, так і на генераторну шину №2.

Також передбачено одночасно живлення як від аеродромного джерела живлення, так і від основного генератора №1 чи №2 або генератора ДСУ. При цьому до однієї генераторної шини підключається аеродромне живлення, а до іншої можливе підключення одного із основних генераторів, або генератора ДСУ.

У польоті кожний основний генератор забезпечує електроенергією свою власну генераторну шину. Якщо який-небудь генератор не працює, то його шина може отримувати електроенергію з генератора ДСУ. Оскільки енергопостачання всієї СЕП здійснюється з використанням двох генераторних шин, то живлення всіх споживачів може здійснюватися від будь-яких двох працездатних генераторів.

Генераторні шини і головні шини призначені для електроживлення споживачів з великим і незначним струмами споживання, відповідно. Обхідні шини здійснюють електроживлення споживачів зі значним струмом споживання.

При виникненні відмови генератора і подальшому його відключенні від мережі, знеструмлюються генераторна шина і головна шини, тоді як обхідна шина автоматично перейде на енергопостачання від працюючого генератора.

#### **1.4. Система електропостачання постійним струмом напругою 28,5 В**

Система електропостачання постійного струму 28,5 В (рис. 1.10) забезпечує електроживлення всіх споживачів, для роботи яких потрібна електроенергія постійного струму.

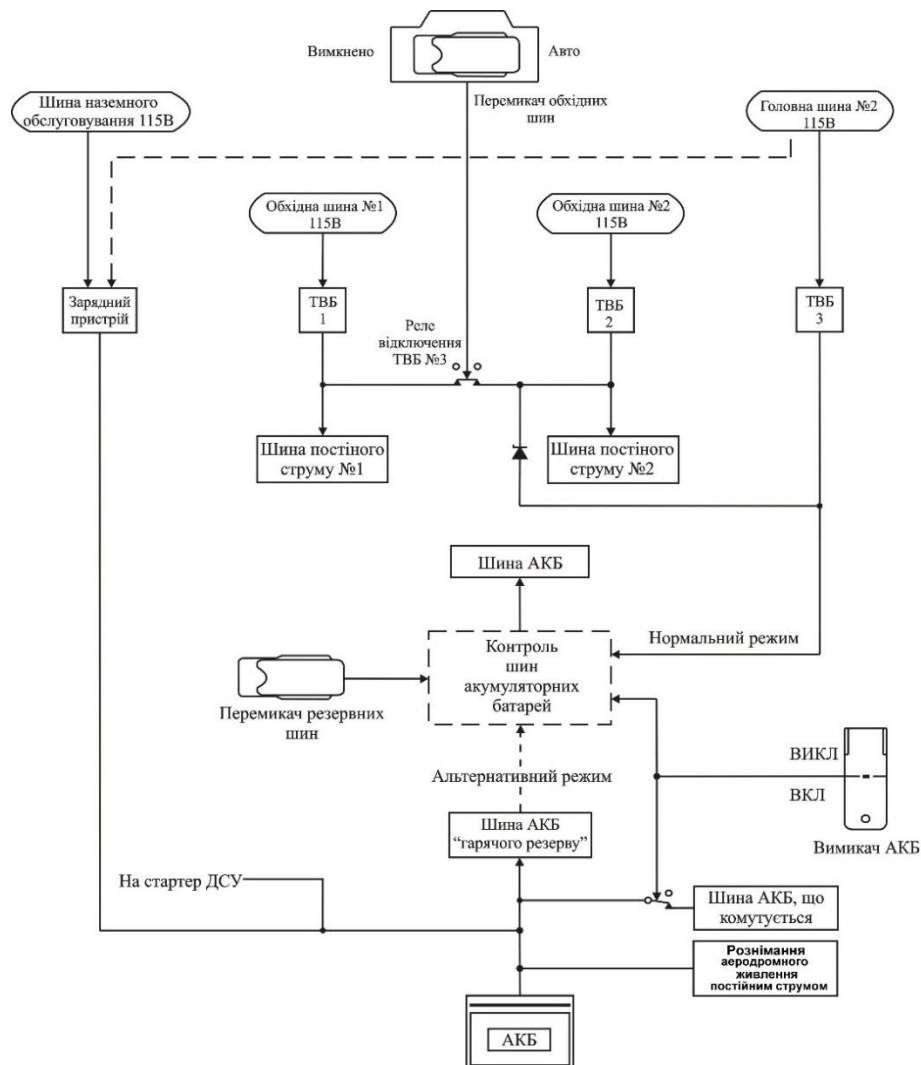


Рис. 1.10. СЕП постійного струму 28 В

В якості первинних джерел постійного струму використані три трансформаторно-випрямних блока. Акумуляторна батарея забезпечує подачу постійного струму 28,5 В тим споживачам, які повинні зберігати працездатність при відсутності інших джерел живлення.

Три ТВБ перетворюють напругу змінного струму 115 В в напругу постійного струму 28,5 В і на рисунках позначаються ТВБ №1, ТВБ №2, ТВБ №3.

ТВБ №1 та ТВБ №2 отримують електроенергію з обхідних шин, а їх виходи з'єднанні з шинами постійного струму №1 та №2, відповідно. Якщо перемикач обхідної шини знаходиться в положенні АВТ., то ТВБ №1 та ТВБ №2 працюють паралельно, а ТВБ №3, живлення до якого потрапляє від головної шини змінного струму №2, в нормальному режимі забезпечує електроенергією акумуляторну шину і в разі необхідності дублює ТВБ №1 та №2. Контакти реле відключення ТВБ

№3 автоматично розмикаються, ізолюючи шину постійного струму №1 від шини постійного струму №2, при вході на глісаду під час заходження на посадку в директорному режимі або з включеним автопілотом по системі ILS.

На літаку Boeing 737-500 ТВБ №1, ТВБ №2 і ТВБ №3, моделі 080-20325-01, мають потужність 1500 Вт. Номінальний струм для них складає 50 А. Вихідна напруга для всіх трансформаторно-випрямних блоків є 24–30 В.

Розміщуються ТВБ №1, №2 і №3 в електронному відсіку на полиці №1 стелажу Е3 (рис. 1.11).

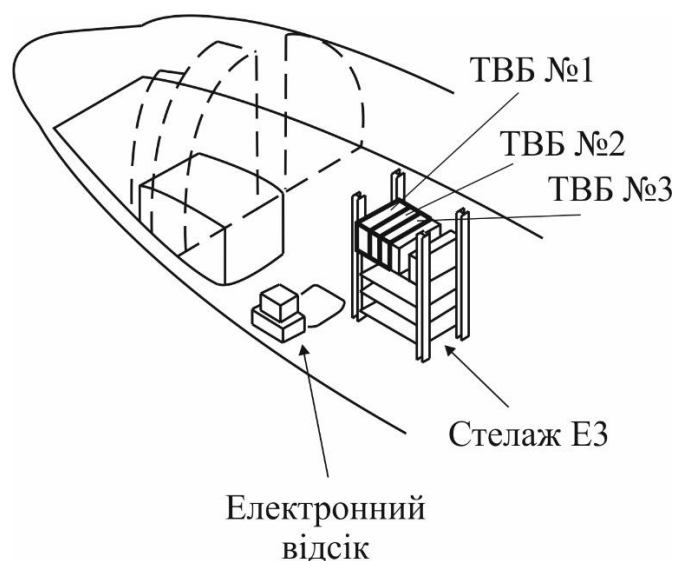


Рис. 1.11. Розміщення трансформаторно-випрямних блоків №1, №2 і №3

#### 1.4.1. Акумуляторна батарея RG-380E/60B

Нікель-кадмієва акумуляторна батарея (АКБ), марки RG-380E/60B, є джерелом електроенергії постійного струму напругою 24 В і ємністю 40 А\*год. (рис. 1.12) та розміщена у відсіку електронного обладнання.

АКБ призначена для живлення постійним струмом першочергових систем літака, в разі відсутності напруги від трансформаторно-випрямних блоків. Також використовується в якості резервного джерела для системи електропостачання змінним струмом і запуску ДСУ. При недостатній нарузі на АКБ, для запуску ДСУ, паралельно підключається рознімання аеродромного джерела постійного струму. АКБ складається з 20 нікель-кадмієвих банок, номінальна напруга кожної складає 1,2 В. Також передбачено систему захисту акумуляторної батареї. Для

цього є температурне реле з контактором (термостат), який спрацьовує при досягненні температури 58°C (136°F) і забезпечує захист батареї від перегріву або теплового розгону.

АКБ здатна протягом 30 хв забезпечувати роботу життєвоважливих споживачів.

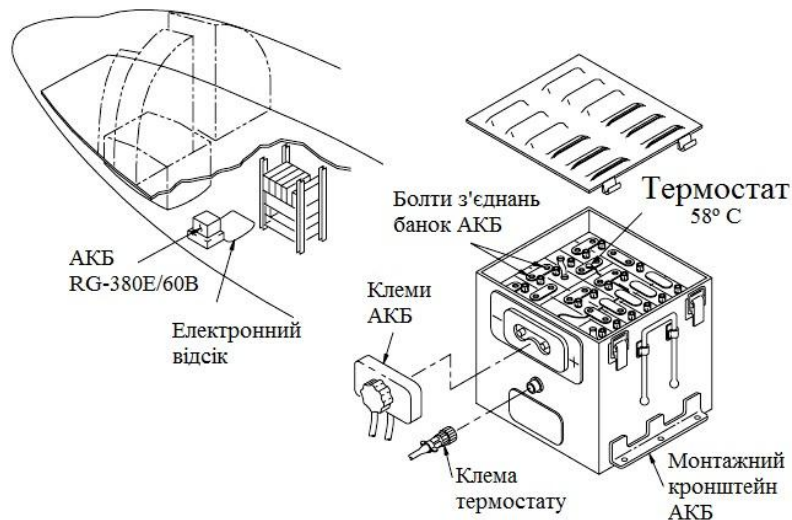


Рис. 1.12. Розміщення і склад акумуляторної батареї RG-380E/60V

Параметри акумуляторної батареї можна контролювати на панелі P5-13 в кабіні пілотів. Батарея підключається до системи електропостачання постійного струму і з'єднана з нею за допомогою реле, які управляються з панелі P5.

#### **1.4.2. Зарядний пристрій акумуляторної батареї**

При нормальній роботі напруга АКБ в режимі розряду складає 24 В, а в режимі заряду 30 В – 33 В.

Для заряду акумуляторної батареї в СЕП передбачено зарядний пристрій моделі 2-792-02. Його призначення – відновлювання і підтримування напруги акумуляторної батареї в заданому діапазоні.

Основні технічні характеристики зарядного пристрою 2-792-02:

Вхідна напруга	– однофазна напруга 115 В 400 Гц;
Вихідна напруга	– постійний струму 27,75 В;
Номінальна струм заряду	– 38 А;

Максимальний струм заряду – 60 А.

Основним джерелом живлення зарядного пристрою є змінний трифазний струм 115 В постійної частоти 400 Гц, яким він живиться від сервісної шини генератора №1, але в разі відмови цього каналу передбачено живлення від основної шини генератора №2.

В системі передбачено автоматичне керування зарядом батареї. Для заряду АКБ зарядний пристрій видає струм величиною 38 А і заряджає повністю її за 75 хв.

Зарядний пристрій має внутрішній і зовнішній контроль для різних режимів роботи. Одним із основних режимів роботи є режим зарядки і режим підтримання постійної напруги.

В режимі зарядки, при пониженні напруги АКБ, на неї поступає струм 38 А. Зарядний пристрій починає процес зарядження, а його робота прирівнюється до трансформаторного випрямляча. При досягненні напруги 27,75 В, зарядний пристрій зменшує струм заряду і поступово він знижується до нуля. Струм залишається рівним нулю до того моменту, коли напруга батареї стає меншою від напруги зарядного пристрою. Цей процес повторюється і на виході зарядного пристрою виробляються імпульси, які забезпечують рівномірний заряд всіх банок батареї.

Режим підтримки постійної напруги забезпечує безперервну зарядку акумуляторної батареї малим струмом. У випадку, коли вхідна напруга відключена на 3 або більше секунди або напруга батареї падає нижче 25,5 В, зарядний пристрій переходить на режим імпульсної зарядки.

Для запобігання виділення газу з батареї, після режиму зарядки, система автоматично переходить на режим підтримання постійної напруги.

Зарядний пристрій розміщується в електронному відсіку на стелажі Е3 біля ТВБ №3.

### **1.5. Функціональне призначення органів управління, контролю і індикації системи електропостачання та їх розміщення на приладових панелях і щитках пультів управління**

До органів управління, контролю і індикації СЕП літака Boeing 737-500 належать різні вимикачі, кнопки, перемикачі, сигнальні табло, прилади, що вимірюють, контролюють і сигналізують. Вони розміщуються на приладових панелях і щитках пультів управління, як в кабіні літака, так і поза кабіною.

Залежно від призначення і завдань, які вирішуються за допомогою органів управління, контролю і сигналізації, всі вони розміщені на наступних приладових панелях і щитках пультів управління, що знаходяться:

#### **1. В кабіні літака:**

- Панель вольтметрів і амперметрів та органів контролю СЕП Р5-13;
- Панель управління і контролю ППО та резервними джерелами живлення Р5-5;
- Панель контролю і управління генераторами та щиток управління шинами Р5-4;

#### **2. В салоні літака:**

- Панель обслуговування Р13;

#### **3. Поза кабіною літака:**

- Панель управління і контролю аеродромного джерела живлення Р19.

Панелі Р5-13, Р5-5, Р5-4 знаходяться на верхній приладовій дошці (рис. 1.13).

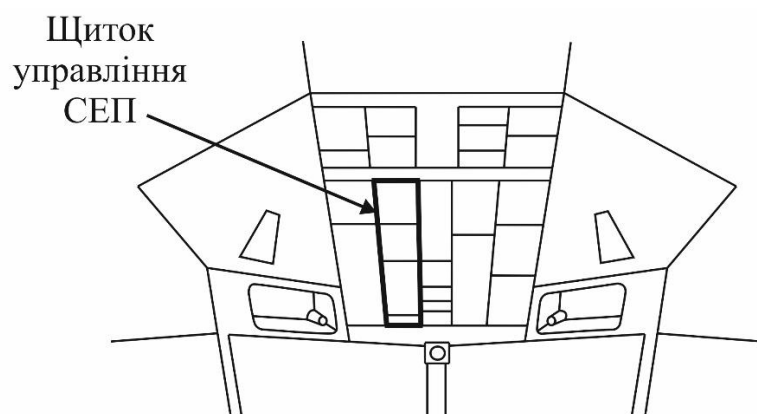


Рис. 1.13. Розміщення органів управління, контролю і сигналізації СЕП

Панель Р13 знаходиться біля вхідних дверей в пасажирський салон. Панель Р19 знаходиться поза кабіною пілотів, з зовнішньої сторони літака в носовій частині. Під нею також розміщено рознімання аеродромного живлення змінним струмом.

Панель вольтметрів і амперметрів та органів контролю СЕП Р5-13 (рис. 1.14) включає в себе:

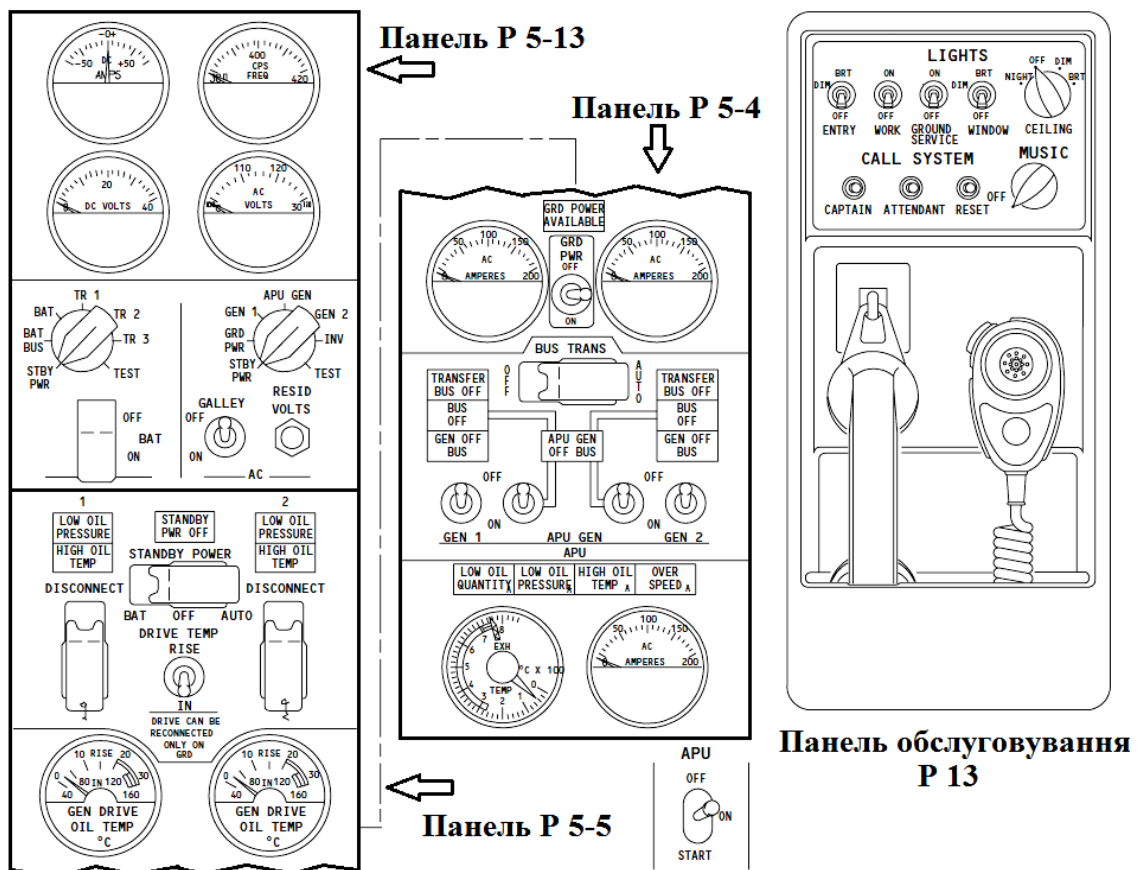


Рис. 1.14. Панелі управління, контролю і індикації СЕП

1. Вольтметри постійного струму і змінного струму;
2. Амперметр постійного струму і змінного струму;
3. Галетний перемикач для перевірки шини резервного живлення 28,5 В, шини АКБ, акумуляторної батареї, ТВБ №1, ТВБ №2, ТВБ №3 і положення для ввімкнення тест режиму;
4. Частотомір змінного струму;

5. Галетний перемикач для перевірки шини резервного живлення 115 В аеродромного джерела живлення, генератора №1 і №2, генератора ДСУ, статичного перетворювача і положення для ввімкнення тест режиму;
6. Вимикач АКБ;
7. Кнопка перевірки залишкової напруги на генераторах;
8. Вимикач електроживлення бортової кухні.

Панель управління і контролю ППО та резервними джерелами живлення Р5-5 (рис. 1.14) включає в себе:

1. Світлові сигналізатори “ТЕМПЕРАТУРА МАСЛА В ППО №1 і №2 ВИСОКА”;
2. Світлові сигналізатори “НИЗЬКИЙ ТИСК МАСЛА В ППО №1 і №2”;
3. Світловий сигналізатор “ВИМКНЕНЕ РЕЗЕРВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ”;
4. Аналогові індикатори температури ППО генератора №1 і №2;
5. Тумблер від’єднання ППО від авіадвигуна;
6. Перемикач “РЕЗЕРВНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ АКБ / ВИКЛЮЧИТИ / АВТОМАТ”
7. Тумблер управління температурою приводу.

Панель контролю і управління генераторами та щиток управління шинами Р5-4 (рис. 1.14) включає в себе:

1. Амперметри змінного струму для контролю за навантаження генератора №1 і №2;
2. Амперметри змінного струму для контролю за навантаження генератора ДСУ;
3. Світловий сигналізатор “ВВИМКНЕНЕ АЕРОДРОМНЕ ДЖЕРЕЛО”;
4. Світлові сигналізатори “ШИНА ГЕНЕРАТОРА №1 і №2 ВИМКНЕНА”;
5. Світлові сигналізатори “ОБХІДНІ ШИНИ №1 і №2 ВИМКНЕНІ”;
6. Світлові сигналізатори “ОСНОВНА ШИНА №1 і №2 ВИМКНЕНА”;
7. Світловий сигналізатор “ШИНА ГЕНЕРАТОРА ДСУ ВИМКНЕНА”;

8. Світловий сигналізатор “НИЗЬКИЙ РІВЕНЬ МАСЛА В ДСУ”;
9. Світловий сигналізатор “НИЗЬКИЙ ТИСК МАСЛА В ДСУ”;
10. Світловий сигналізатор “ВИСОКА ТЕМПЕРАТУРА МАСЛА В ДСУ”;
11. Світловий сигналізатор “ПЕРЕВИЩЕННЯ НОРМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ДСУ”;
12. Аналоговий індикатор температури вихідних газів ДСУ;
13. Перемикач “ОБХІДНІ ШИНИ ВКЛЮЧИТИ / АВТОМАТ”;
14. Вимикачі генератора №1, генератора №2 і генератора ДСУ;
15. Вимикач аеродромного джерела живлення;
16. Тумблер запуску генератора ДСУ.

Панель обслуговування Р13 (рис. 1.14) включає в себе вимикачі і перемикачі системи внутрішнього в'язку з кабіною пілотів і з пасажирським салоном, системи освітлення і системи розваги пасажирів.

На панелі управління і контролю аеродромного джерела живлення Р19 (рис. 1.15) знаходяться світловий індикатор підключення до наземного джерела ЕЕ, а також кнопки виклику пілота і перемикач управління освітленням.



Рис. 1.15. Панель управління і контролю аеродромного джерела живлення Р19

## 1.6. Обґрунтування необхідності вдосконалення існуючої СЕП

На літаку Boeing 737-500 використовується гідромеханічний ППО марки 40AGD10, який виконаний в одному корпусі з генератором і входить до складу інтегрального привід-генераторного агрегату.

Основою такого типу ППО є механічна і гідравлічна частини. Механічна частини являє собою планетарну передачу, а гідравлічна частина – гідронасос і гідродвигун. Частота в такому приводі стабілізується за рахунок зміни продуктивності гідронасосу, який утворює гідравлічну передачу. Механічна енергія, що підводиться до гідронасосу, перетворюється в гідравлічну. В свою чергу гідравлічна енергія, за допомогою гідродвигуна, перетворюється в механічну, яка обертає ротор гідродвигуна і привідного генератора.

Гідромеханічний ППО може працювати в трьох режимах роботи:

1. Режим докручування.
2. Номінальний режим (прямої передачі).
3. Режим реверсу;

В режимі докручування, гідравлічна частина працює як гідродвигун, допомагаючи авіадвигуну підтримувати постійну частоту обертання ротора генератора. А в режимі реверсу ППО працює як гідронасос, також стабілізуючи частоту обертання ротора.

Недоліки гідромеханічного ППО полягають в основному у складності конструкції, конструктивні елементи якого повинні працювати при високому механічному навантаженні, а також в великому діапазоні зміни температури.

Також до недоліків гідромеханічного приводу можна віднести:

1. Інтегральний привід-генераторний агрегат (40AGD10+976J498-2), що складається з гідравлічної і механічної частин, елементів електричної та масляної систем, наслідком чого є велика маса, конструктивна складність і недостатньо висока надійність роботи;
2. Виготовлення механічної частини ППО вимагає більш точної обробки матеріалів, а отже більш кваліфікований персонал на виробництві.
3. Застосування масляної системи для охолодження, фільтрації і регулювання масла в ППО, а отже і збільшення конструктивної маси агрегату.
4. Підвищені вимоги до герметичності трубопроводів гідравлічної та масляної систем.

5. Важливість забезпечення певних механічних характеристик гідромеханічного приводу, оскільки це впливає на надійність роботи привід-генераторного агрегату.

6. В разі аварійного від'єднання ППО або відмови в польоті, повернення привода в вихідне положення можливе лише на землі.

Досвід експлуатації гідромеханічних приводів показує, що багато часу і ресурсів потрібно використовувати при обслуговуванні привід-генераторного агрегату. Отже можна зробити висновок про конструктивні і економічні недоліки таких типів приводів. Тому більш рентабельною є заміна цих приводів на електромеханічні, які в свою чергу не мають більшості недоліків, що притаманні гідромеханічним приводам.

Проаналізувавши систему електропостачання літака, а саме СЕП змінного струму постійної частоти можна стверджувати про необхідність вдосконалення існуючої системи електропостачання на даному типі літаків.

В якості первинної СЕП на літаку Boeing 737-500 пропонується залишити систему електропостачання змінного струму напругою 115 В постійної частоти 400 Гц (рис. 1.6), але в якості ППО використати більш надійний і простий, дешевий в виробництві і в експлуатації електромеханічний привід постійної частоти обертання.

В якості такого приводу в системі електропостачання літака Boeing 737-500 пропонується використовувати електромеханічний ППЧО, який складається з електромагнітної муфти ковзання (ЕМК), яка збуджується змінним струмом та асинхронного перетворювача частоти і напруги (АП). Каскадне з'єднання АП і ЕМК виконує роль приводу постійної частоти обертання синхронного генератора.

Згідно з дослідженнями, ЕМК і АП забезпечують більш точну стабілізацію частоти обертання СГ, при зміні частоти обертання АД.

ППЧО і генератор виконуються в одному корпусі, утворюючи єдиний привід-генераторний агрегат.

Систему електропостачання постійним струмом пропонується залишити без змін, оскільки вона задовольняє всі поставлені перед нею вимоги і являє собою функціонально завершений елемент.

Структурна схема існуючої системи електропостачання літака Boeing 737-500 представлена на рис. 1.16, а структурна схема вдосконаленої СЕП літака – на рис. 1.17.

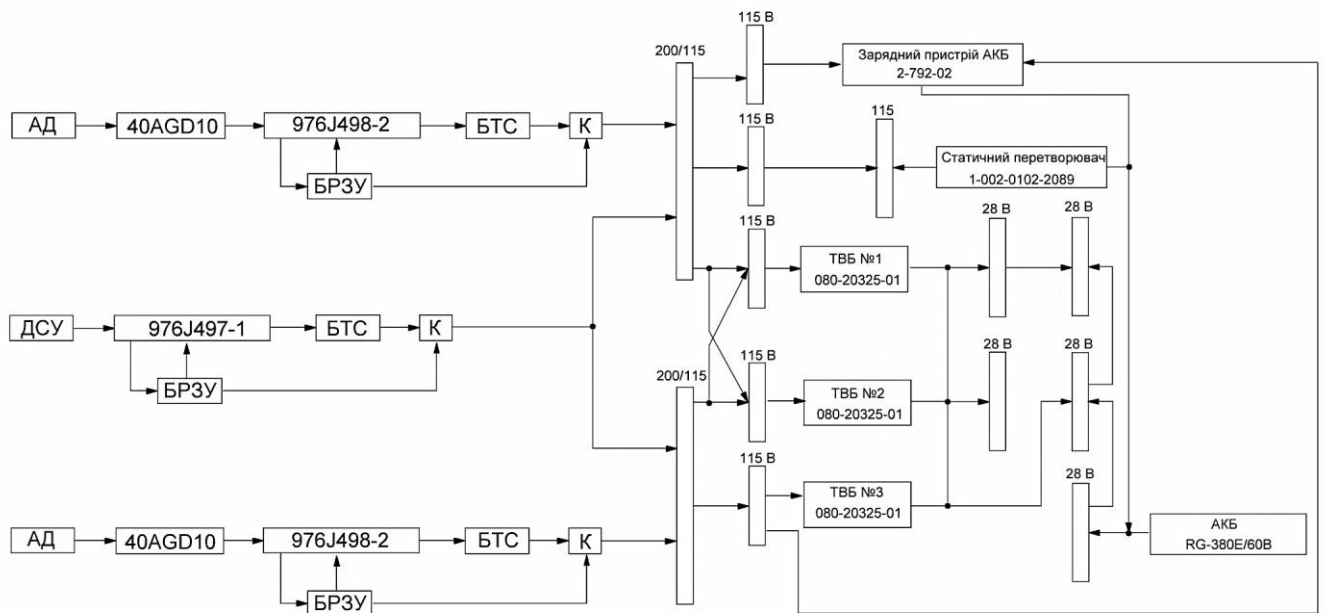


Рис. 1.16. Структурна схема системи електропостачання літака Boeing 737-500

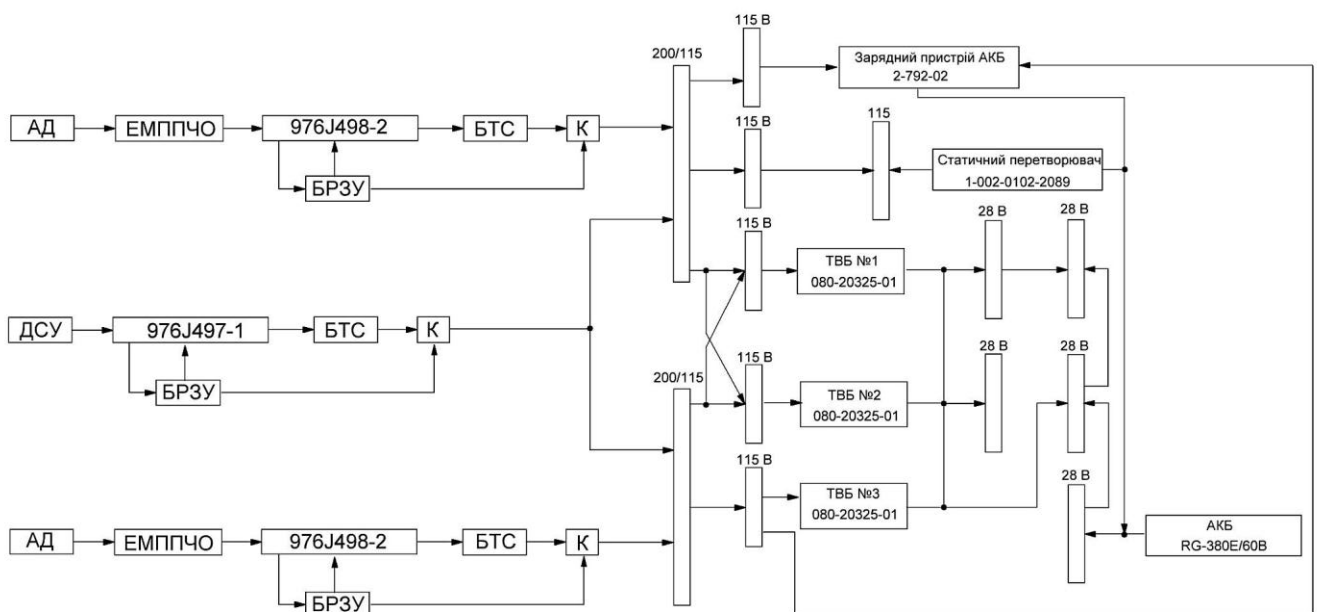


Рис. 1.17. Вдосконалена схема СЕП літака Boeing 737-500

## **1.7. Висновки**

Розглянувши систему електропостачання літака, можна стверджувати, що вдосконалення системи шляхом заміни гідромеханічного ППО на електромеханічний ППЧО є доцільно та економічно вигідно. По-перше, це стосується зменшення масогабаритних показників, при незмінній якості генеруючої ЕЕ. По-друге, електромеханічний ППЧО має вищий показник ККД, а отже при генеруванні ЕЕ є менші втрати потужності. По-третє, електромеханічний привід має більш просту конструкцію, що спрощує його виробництво, а в подальшому і експлуатацію. По-четверте, відсутність гідравлічної системи, яка потребує високого кваліфікаційного обслуговування, підвищеного рівня герметичності складових елементів, а також постійного забезпечення необхідної кількості гідравлічної рідини. Всі ці переваги електромеханічного ППЧО застосовуються в подальшому при проектуванні системи привід-генераторного агрегату.

Проаналізувавши джерела електроенергії, необхідно зазначити що, вдосконалення стосуються лише первинної системи живлення, вторинну систему пропонується залишити без змін, оскільки остання не має вагомих недоліків, які б мали вплив на якість генеруючої електроенергії.

## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ПРИВІД-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ, ПРИНЦИП ЇЇ ДІЇ ТА РОЗРАХУНОК ЧАСТОТНИХ ПАРАМЕТРІВ ПГА**

#### **2.1. Принципова схема привід-генераторного агрегату**

Принципова електрична схема привід-генераторного агрегату змінного струму постійної частоти з приводом від АД представлена на рис. 2.1. До складу ПГА входять:

СГ – безконтактний трифазний синхронний генератор, що приводиться з постійною частотою обертання  $n_{\text{сг}}$ ;

ЕМК – електромагнітна муфта ковзання, що збуджується змінним струмом;

АП – асинхронний перетворювач частоти та напруги, що живить трифазну обмотку ведучого ротора ЕМК;

ЕСУП – електрична схема управління та підсилення, що забезпечує перемикання ЕМК та АП з одного ступеня на інший, в залежності від частоти обертання АД;

ВЧ – вимірювач частоти синхронного генератора (резонансний контур);

БТС – блок трансформаторів струму, що видає сигнал, пропорційний величині струму навантаження СГ;

РН – регулятор напруги системи стабілізації частоти СГ;

Тр – трифазний трансформатор системи стабілізації частоти СГ;

ВП1 – випрямний пристрій в системі автоматичного управління роботою ПГА;

ВП2 – випрямний пристрій системи стабілізації частоти СГ;

К1 – реле в ланцюзі живлення обмотки електромагнітного чи тиристорного

перемикача К2, що обертається та змінює послідовність чергування фаз ЕМК;

К3 – реле в ланцюзі живлення обмотки К4, що змінює послідовність чергування фаз АП;

К5 – реле в ланцюзі живлення перемикача К6, що змінює послідовність напруги живлення обмотки збудження АП зі змінної трифазної на постійну та назад, в залежності від робочого ступеня ПГА;

С – кнопка для запуску ПГА;

ТГ – тахогенератор на вхідному валу АП.



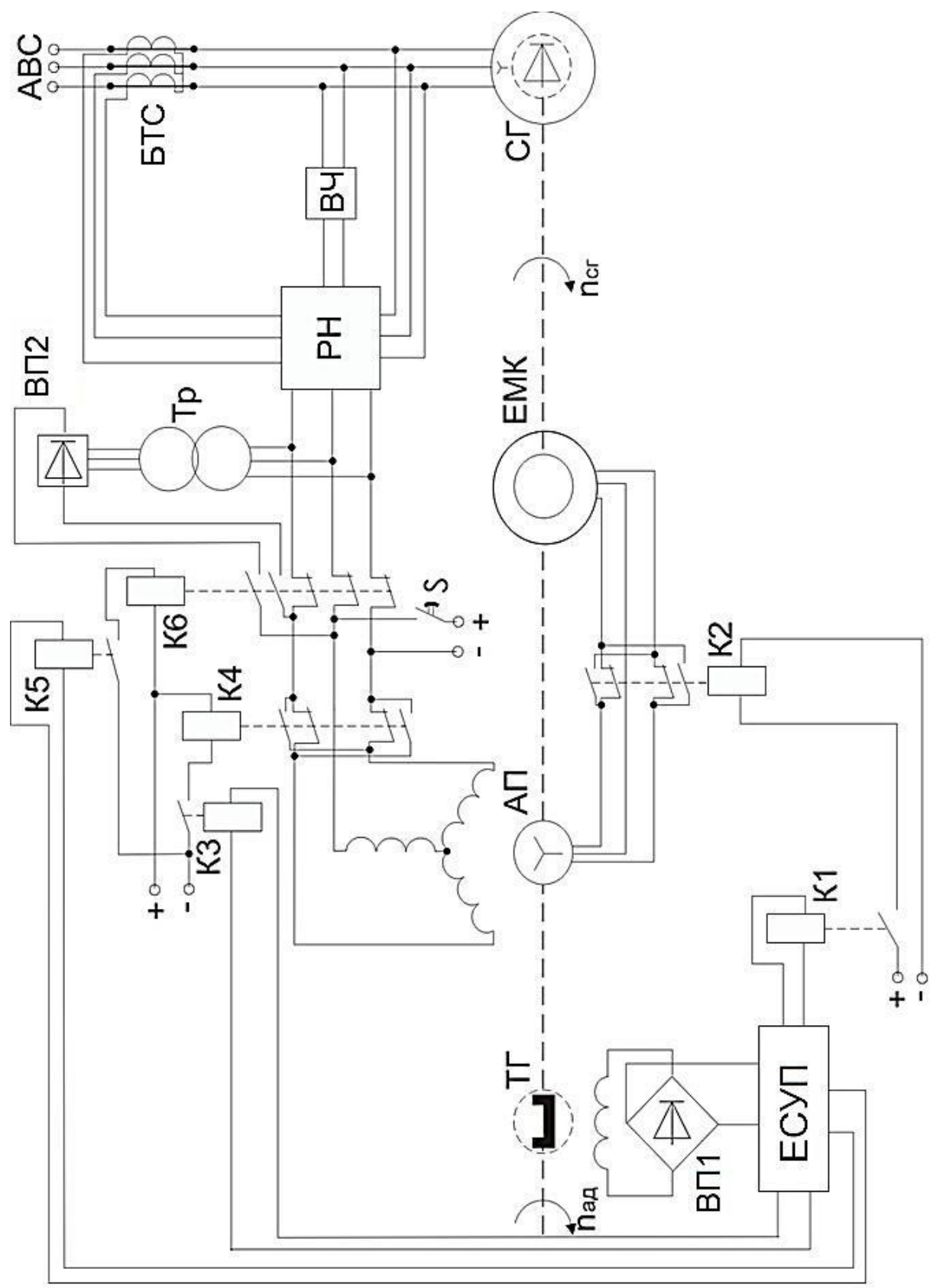


Рис. 2.1. Схема электрична принципова привод-генераторного агрегату

Для досягнення стабілізації частоти обертання синхронного генератора при змінній частоті обертання авіадвигуна, в ПГА:

1. За допомогою перемикачів контакторів К4 та К6 здійснюється ступінчаста зміна частоти і напруги, що підводиться до ЕМК.
2. Шляхом зміни напрямку обертання електромагнітного поля ЕМК, за допомогою перемикача фаз ЕМК К2, що обертаються.
3. Плавною зміною ковзання веденого ротору ЕМК відносно магнітного потоку, що обертається, її ведучого ротора шляхом автоматичного регулювання напруги за допомогою РН.

Частота ковзання її веденого ротора відносно обертаючого магнітного потоку при широкому діапазоні частот обертання авіадвигуна на всіх ступенях виходить порівняно невеликою, завдяки ступінчастій зміні частоти та напруги, що підводиться до ЕМК від роторної обмотки АП і зміні напрямку обертання магнітного потоку ЕМК. Це обмежує втрати на ковзання, підвищує ККД та забезпечує виконання задачі охолодження ЕМК [4].

Завдання ПГА – стабілізувати частоту струму синхронного генератора при зміні частоти обертання приводу авіадвигуна в діапазоні 5:1. Зазвичай такі агрегати мають до шести ступенів роботи і складаються з АП, ЕМК та СГ.

Для запуску ПГА потрібно короткочасно натиснути на кнопку S. При цьому напруга постійного струму поступає на обмотку збудження АП, в якому створюється нерухоме магнітне поле, яке наводить в обмотці ротора АП ЕРС, яка обертається і викликає появу струмів у трифазній обмотці ЕМК. Ці струми, протікаючи в обмотці ЕМК, створюють магнітне поле, що обертається, яке захоплює за собою ведений ротор ЕМК, який з'єднаний з ротором СГ [3].

При досягненні певної частоти обертання ротора, СГ самозбуджується, і на його виході з'являється напруга, а також починається робота системи стабілізації частоти.

## 2.2. Розрахунок параметрів ПГА

Для літака Boeing 737-500 існує декілька основних режимів роботи авіадвигуна. В залежності від режиму роботи частота, які наведені в табл. 2.1, обертання валу АД змінюється наступним чином:

Таблиця 2.1

Режим роботи	Земний малий газ	Крейсерський режим	Номінальний режим	Злітний режим
Частота обертання (об/хв.)	6940 ±70	8820 ±150	13300 ±150	14000±50
Час роботи (хв.)	30	Необмежено	необмежено	3

Слід зазначити, що параметри ПГА залежать від відношення пар полюсів АП і ЕМК, що у свою чергу визначає особливості роботи АД, а також величину діапазону зміни частоти обертання.

На основі попередніх розрахунків і з урахуванням особливостей роботи авіадвигуна, встановлено що найбільш оптимальне відношення пар полюсів АП і ЕМК є  $P_{АП} : P_{ЕМК} = 1:8$ . Враховуючи це, виконаємо розрахунок частотних співвідношень ПГА на всіх шістьох ступенях, згідно методики, викладеної в [3].

На першій ступені роботи агрегату АП збуджується змінним струмом постійної частоти  $f_{СТ}$ . Електромагнітне поле статора обертається проти напрямку обертання ротора АП. Тому на першій ступені ротор АП працює в режимі електромагнітного гальма (ЕМГ) і перетворює частину напруги, що підводиться до ЕМК.

Частота обертання поля статора АП:

$$n_{п.ап} = \frac{60 \cdot f_{сг}}{P_{ап}} = \frac{60 \cdot 400}{1} = 24000 \text{ об/хв}, \quad (2.1)$$

де  $P_{ап}$  – число пар полюсів асинхронного перетворювача.

Мінімальна частота обертання СГ ( $n_{сг}$ ) забезпечується на першій ступені при мінімальній частоті обертання АД:

$$n_{ад \min} = n_{ад1 \min} = \frac{n_{сг} - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} + n_{к1 \min}}{1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} =$$

$$= \frac{6000 - \frac{24000}{8} + 120}{1,125} = \frac{3120}{1,125} = 2775 \text{ об/хв}. \quad (2.2)$$

Значення  $n_{кmin}$  на всіх ступенях, при якому ЕМК забезпечує номінальний момент ПГА, складає  $(0,02 \div 0,03) n_{сг}$ .

Частота ЕРС обмотки якоря, яка наводиться під час обертання ротора АП з частотою  $n_{ад1}$ , знаходиться за формулою:

$$f_{2ап1} = f_{сг} \cdot S_{ап1} = 400 \cdot 1,16 = 446 \text{ Гц}; \quad (2.3)$$

$$S_{ап1} = \frac{n_{п.ап} + n_{ад1}}{n_{п.ап}} = \frac{24000 + 2775}{24000} = 1,116, \quad (2.4)$$

де  $S_{ап1}$  – ковзання АП на першій ступені.

Частота обертання електромагнітного поля відносно нерухомого простору:

$$n_{п.абс1} = n_{ад1} + n_{п.від} = 2775 + 3345 = 6120 \text{ об/хв}; \quad (2.5)$$

$$n_{п.від} = \frac{60 \cdot f_{2ап1}}{P_{емк}} = \frac{60 \cdot 446}{8} = 3345 \text{ об/хв}. \quad (2.6)$$

Частота ковзання веденого ротора ЕМК, його ковзання відносно обертаючого електромагнітного поля муфти на початку першої ступені:

$$n_{к1} = n_{абс1} - n_{сг} = 6120 - 6000 = 120 \text{ об/хв}; \quad (2.7)$$

$$S_1 = \frac{n_{п.абс1} - n_{сг}}{n_{п.абс1}} = \frac{6120 - 6000}{6120} = 0,019. \quad (2.8)$$

Якщо  $n_{п.ап} > n_{ад1}$  то при досягненні частоти обертання АД значення:

$$n_{ад1-2} = n_{ад1 \max} = n_{ад2 \min} = \frac{n_{сг} + n_{к \min} - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}}{1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} =$$

$$= \frac{6000 + 120 - 3000}{0,875} = \frac{3120}{0,875} = 3565 \text{ об/хв}. \quad (2.9)$$

При досягненні частоти обертання 3563 об/хв ЕСУП видає сигнал на спрацювання реле К3 і контактора К4, яке в свою чергу змінює порядок чергування фаз обмотки статора АП, внаслідок чого електромагнітне поле АП змінює напрямок свого обертання на протилежний та обертається згідно з ротором АП. Тому АП працює одночасно в режимі асинхронного двигуна і перетворювача частоти. Для збереження попереднього напрямку обертання електромагнітного поля ЕМК, при зміні чергування фаз роторної і статорної обмоток АП, одночасно з контактором К4 спрацьовує перемикач фаз ЕМК К2 і ПГА переходить на другу ступінь роботи [3].

Визначаємо частотні співвідношення наприкінці першої ступені:

$$S_{ап1} = \frac{n_{п.ап} + n_{ад1}}{n_{п.ап}} = \frac{24000 + 3565}{24000} = 1,15; \quad (2.10)$$

$$f_{2ап1 \max} = 400 \cdot 1,15 = 460 \text{ Гц}; \quad (2.11)$$

$$n_{п.абс1} = n_{ад1 \max} + n_{п.від} = 3565 + 3450 = 7013 \text{ об/хв}; \quad (2.12)$$

$$n_{п.від1} = \frac{60 \cdot f_{2ап1 \max}}{P_{емк}} = \frac{60 \cdot 460}{8} = 3450 \text{ об/хв}. \quad (2.13)$$

Ковзання наприкінці першої ступені  $S_{1 \max}$  визначаємо за формулою:

$$S_{1 \max} = \frac{n_{1abc} - n_{cr}}{n_{1abc}} = \frac{7013 - 6000}{7013} = 0,14; \quad (2.14)$$

$$n_{k1 \max} = n_{ад1-2} \cdot \left(1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} - n_{cr} = 3565 \cdot 1,125 + 3000 - 6000 = 1008 \text{ об/хв.} \quad (2.15)$$

Частота струму ротора АП і ЕМК на другій ступені:

$$f_{2ап1\max} = f_{cr} \cdot S_{ап2} = 400 \cdot 0,85 = 340 \text{ Гц.} \quad (2.16)$$

Оскільки напрям обертання електромагнітного поля ЕМК залишився незмінним, то:

$$n_{п.від2} = 60 \cdot \frac{f_{cr}}{P_{емк}} - n_{ад2} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} = 60 \cdot \frac{400}{8} - 3565 \cdot 0,125 = 2555 \text{ об/хв;} \quad (2.17)$$

$$n_{п.abc2} = n_{ад2} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} = 3565 \cdot 0,875 + 3000 = 6120 \text{ об/хв.} \quad (2.18)$$

Ковзання на початку другої ступені:

$$S_2 = 1 - \frac{n_{cr}}{n_{ад2} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = 1 - \frac{6000}{3120 + 3000} = 0,02. \quad (2.19)$$

Під час збільшення частоти обертання АД до  $n_{2-3} = n_{ад2\max}$  контактор К6 перемикає статорну обмотку АП на живлення від ВП2. Для збереження попереднього напрямку обертання електромагнітного поля муфти відносно її ведучого ротора спрацьовує К2, який одночасно змінює чергування фаз ЕМК. При

спрацьовані контактора К6, АП переводиться з режиму асинхронного двигуна у режим синхронного генератора. ЕМК на другій та третій ступенях працює, як і на першій, – в режимі асинхронного двигуна і муфти ковзання [3].

Перемикання ПГА з другої ступені на третю відбувається при:

$$n_{ад\ 2-3} = \frac{n_{сг} + n_{к\ min}}{1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = \frac{6000 + 120}{1,25} = 5440\ об/хв. \quad (2.20)$$

Визначаємо частотні співвідношення ПГА наприкінці другої ступені:

$$S_{ап2} = \frac{n_{п.ап} - n_{ад2}}{n_{п.ап}} = \frac{24000 - 5440}{24000} = 0,773; \quad (2.21)$$

$$f_{2ап2} = 400 \cdot 0,773 = 309\ Гц; \quad (2.22)$$

$$n_{п.від2} = \frac{60 \cdot 400}{8} - 5440 \cdot 0,125 = 2320\ об/хв; \quad (2.23)$$

$$n_{п.абс2} = 5440 \cdot 0,875 + 3000 = 7760\ об/хв; \quad (2.24)$$

$$S_2 = 1 - \frac{6000}{5440 \cdot 0,875 + 3000} = 0,2. \quad (2.25)$$

Оскільки, на третій ступені АП збуджується випрямленим струмом і електромагнітне поле ЕМК обертається разом з її ведучим ротором, то:

$$n_{ад\ 2-3} = n_{ад\ 2\ max} = n_{ад\ 3\ min} = 5440\ об/хв; \quad (2.26)$$

$$S_2 = 1 - \frac{n_{сг}}{n_{ад3} \cdot \left(1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right)} = 1 - \frac{6000}{5400 \cdot 1,125} = 0,02; \quad (2.27)$$

$$f_{2ап3} = n_{ад3} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 5440 \cdot \frac{1}{60} = 91\ Гц; \quad (2.28)$$

$$n_{п.від3} = 5440 \cdot 0,125 = 680\ об/хв; \quad (2.29)$$

$$n_{п.абс2} = 5440 \cdot 1,125 = 6120\ об/хв. \quad (2.30)$$

Коли спрацьовує перемикач фаз ЕМК К2, відбувається перемикання ПГА з третьої ступені на четверту:

$$n_{ад\ 3-4} = n_{ад3\ max} = n_{ад4\ min} = \frac{n_{сг} + n_{к\ min}}{1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = \frac{6000 + 120}{0,875} = \quad (2.31)$$

$$= 6994\ об/хв.$$

Частотні співвідношення наприкінці третьої ступені:

$$f_{2ап3} = n_{ад3} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 6994 \cdot \frac{1}{60} = 117\ Гц; \quad (2.32)$$

$$n_{п.від3} = 6994 \cdot 0,125 = 874\ об/хв; \quad (2.33)$$

$$n_{п.абс3} = 6994 \cdot 1,125 + 3000 = 7868\ об/хв; \quad (2.34)$$

$$S_3 = 1 - \frac{6000}{7868} = 0,237. \quad (2.35)$$

Початок четвертої ступені:

$$n_{ад4\ min} = n_{ад3-4} = n_{ад3\ max} = 6994\ об/хв; \quad (2.36)$$

$$n_{п.абс4} = n_{ад4} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) = 6994 \cdot 0,875 = 6120\ об/хв; \quad (2.37)$$

$$n_{п.від4} = n_{ад4} - n_{п.абс4} = 6994 - 6120 = 874\ об/хв. \quad (2.38)$$

Частота ковзання і значення ковзання ЕМК на четвертій ступені:

$$S_4 = 1 - \frac{n_{сг}}{n_{ад4} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right)} = 1 - \frac{6000}{6994 \cdot 0,875} = 0,02; \quad (2.39)$$

$$n_{к3} = n_{ад3-4} \cdot \left(1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{сг} = 7868 - 6000 = 1868\ об/хв; \quad (2.40)$$

$$f_{2ап4} = n_{ад4} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 6994 \cdot \frac{1}{60} = 117\ Гц. \quad (2.41)$$

При досягненні частоти обертання АД до:

$$n_{ад\ 4-5} = n_{ад4\ max} = n_{ад5\ min} = \frac{n_{к\ min} + n_{сг} + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}}{1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} =$$

$$= \frac{120 + 6000 + 3000}{1,125} = 8107\ об/хв. \quad (2.42)$$

Відбувається спрацьовування контактора К6 ПГА перемикається на п'яту ступінь роботи. При цьому статорна обмотка АП підключається на клема регулятора напруги с таким порядком чергування фаз, при якому електромагнітне поле статора обертається в одному напрямку з ротором АП. Значення частотних характеристик наприкінці четвертої ступені:

$$n_{п.абс4} = 8107 \cdot 0,875 = 7094\ об/хв; \quad (2.43)$$

$$n_{п.від4} = 8107 - 7094 = 1013\ об/хв; \quad (2.44)$$

$$n_{к4\ max} = n_{ад4} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{сг} = 7094 - 6000 = 1094\ об/хв; \quad (2.45)$$

$$S_4 = 1 - \frac{n_{сг}}{n_{ад4\ max} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right)} = 1 - \frac{6000}{7094} = 0,15; \quad (2.46)$$

$$f_{2ап4} = n_{ад4\ max} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 8107 \cdot \frac{1}{60} = 135\ Гц. \quad (2.47)$$

На початку п'ятої ступені електромагнітне поле статора обертається в одному напрямку з ротором АП (як на другій ступені). Тому маємо:

$$f_{2ап5} = f_{сг} - n_{ад5} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 400 - 8107 \cdot \frac{1}{60} = 262\ Гц; \quad (2.48)$$

$$n_{п.від5} = 60 \cdot \frac{400}{8} - 8107 \cdot 0,125 = 1987\ об/хв. \quad (2.49)$$

На п'ятій ступені поле ведучого ротора ЕМК обертається зустрічно з ведучим ротором, тому:

$$n_{п.абс5} = n_{ад5} - n_{п.від5} = 8107 - 1987 = 6120 \text{ об/хв}; \quad (2.50)$$

$$S_5 = 1 - \frac{n_{сг}}{n_{ад5} \cdot \left(1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = 1 - \frac{6000}{6120} = 0,02. \quad (2.51)$$

При досяганні частоти обертання АД значення:

$$\begin{aligned} n_{ад5-6} = n_{ад5 \max} = n_{ад6 \min} &= \frac{n_{сг} + n_{к \min} + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}}{1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = \\ &= \frac{6000 + 120 + 3000}{0,875} = 10420 \text{ об/хв}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Відбувається спрацювання одночасно контакторів К4 і К2. Це дає змогу змінити, в порівнянні з п'ятим ступенем, чергування фаз статорної обмотки АП. Таке чергування фаз є аналогічне як для першої ступені. При цьому ПГА переходить на шосту ступінь роботи.

Частотні співвідношення наприкінці п'ятої ступені:

$$f_{2ап5} = f_{сг} - n_{ад5 \max} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 400 - 10420 \cdot \frac{1}{60} = 233 \text{ Гц}; \quad (2.53)$$

$$n_{п.від5} = 60 \cdot \frac{400}{8} - 10420 \cdot 0,125 = 1697 \text{ об/хв}; \quad (2.54)$$

$$n_{п.абс5} = 10420 - 1697 = 8723 \text{ об/хв}; \quad (2.55)$$

$$S_5 = 1 - \frac{6000}{8723} = 0,31; \quad (2.56)$$

$$n_{к5 \max} = n_{ад5-6} \cdot \left(1 + \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} = 2723 \text{ об/хв}. \quad (2.57)$$

Так як, на п'ятій ступені роботи ПГА електромагнітне поле АП обертається назустріч ведучому ротору, тому на початку п'ятої ступені частотні співвідношення визначаються наступним чином:

$$f_{2ап6} = f_{сг} + n_{ад6} \cdot \frac{P_{ап}}{60} = 400 + 10420 \cdot \frac{1}{60} = 574 \text{ Гц}; \quad (2.58)$$

$$n_{п.від6} = 60 \cdot \frac{400}{8} + 10420 \cdot 0,125 = 4303 \text{ об/хв}; \quad (2.59)$$

$$n_{п.абс6} = n_{ад6} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}} = 9120 - 3000 = 6120 \text{ об/хв}; \quad (2.60)$$

$$S_5 = 1 - \frac{n_{сг}}{n_{ад6} \cdot \left(1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}\right) - n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = 1 - \frac{6000}{6120} = 0,02; \quad (2.61)$$

$$n_{6 \max} = \frac{n_{сг} + n_{к5 \max} + n_{п.ап} \cdot \frac{P_{ап}}{P_{емк}}}{1 - \frac{P_{ап}}{P_{емк}}} = \frac{8723 + 3000}{0,875} = 13400 \text{ об/хв}. \quad (2.62)$$

Стабілізація частоти обертання СГ ( $n_{сг}$ ) на кожній ступені роботи ПГА при збільшенні  $n_{ад}$  забезпечується за рахунок збільшення ковзання ЕМК від  $n_{i \text{ kmin}}$  до  $n_{i \text{ kmax}}$ , де  $i$ - номер ступені. Якщо відбувається пониження частоти обертання АД від  $n_{ад6\max}$  до  $n_{ад1\min}$ , то розглянута вище послідовність спрацювання контакторів і перемикачів відбувається в оберненій послідовності.

На рис. 2.2 представлені частотні характеристики ПГА, що були розраховані, а на рис. 2.3 наведена діаграма частотних діапазонів роботи АД і ПГА.

Як слідує з графіку рис. 2.3, авіадвигун літака працює без обмежень часу на всіх режимах, крім злітного та режиму малого газу. Тому для отримання найкращих енергетичних характеристик ПГА, необхідно розрахувати частотні характеристики ПГА та привести в відповідність розрахункові обороти АД з фізичних обертів двигуна шляхом установки між валом ПГА і валом авіадвигуна додатково механічного редуктора з коефіцієнтом редукції 1,22. В цьому випадку на

режимах роботи двигуна без обмеження часу (номінальний і крейсерський режими) електромагнітна муфта ковзання буде працювати з мінімальним ковзанням, а весь ПГА буде мати кращі енергетичні показники.

Робота ПГА з кращими показниками, як слідує з графіків рис. 2.3 приходить на третю, четверту і шосту ступені, тому першу, другу і п'яту ступені можна не використовувати, що суттєво спростить систему автоматичного управління роботою ПГА.

Як висновок слід сказати, що для якісного забезпечення споживачів літака електроенергією змінного струму постійної частоти на ньому необхідно встановити триступеневий електромеханічний привід-генераторний агрегат.

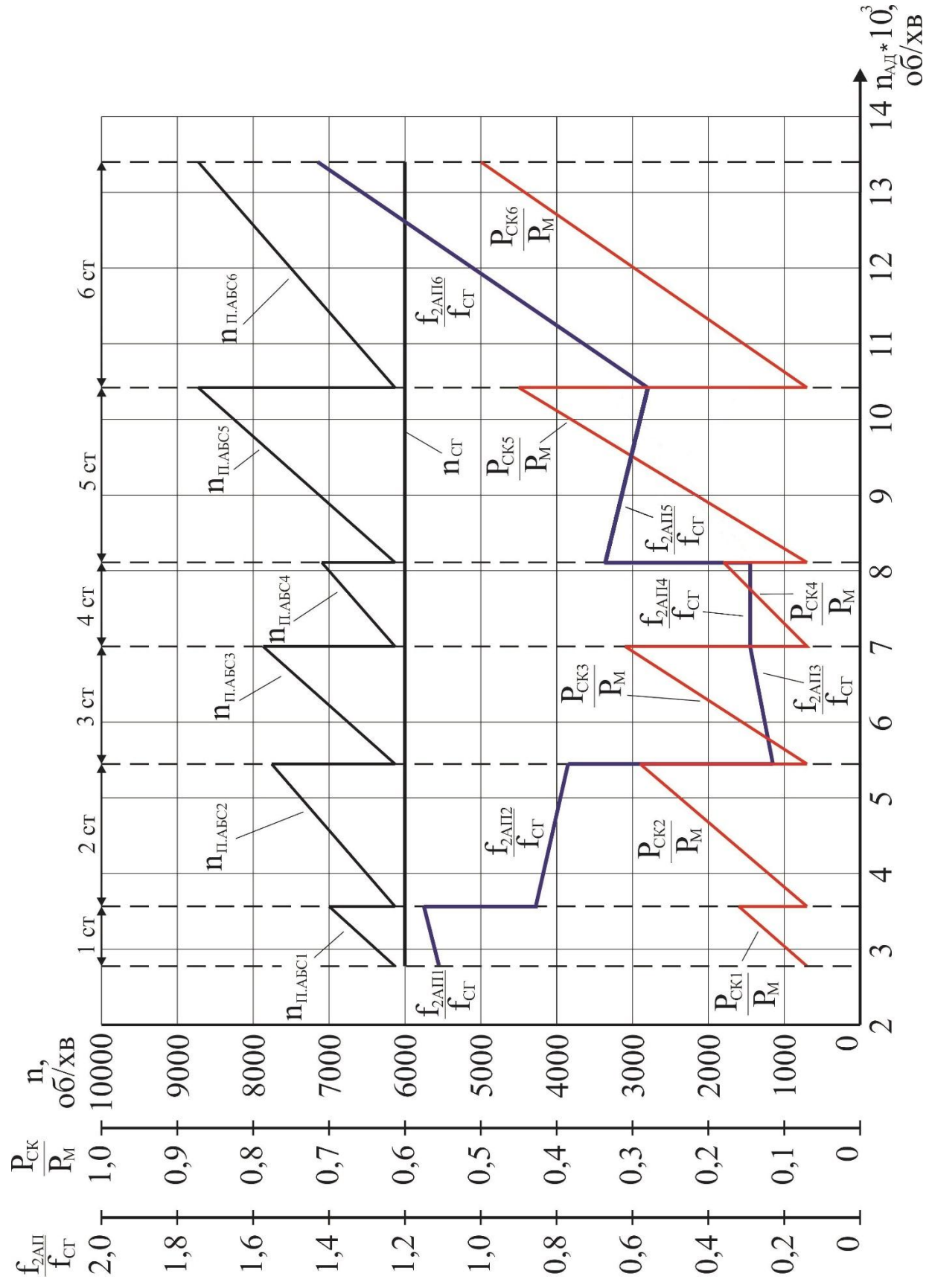


Рис. 2.2. Частотні характеристики привод-генераторного агрегату

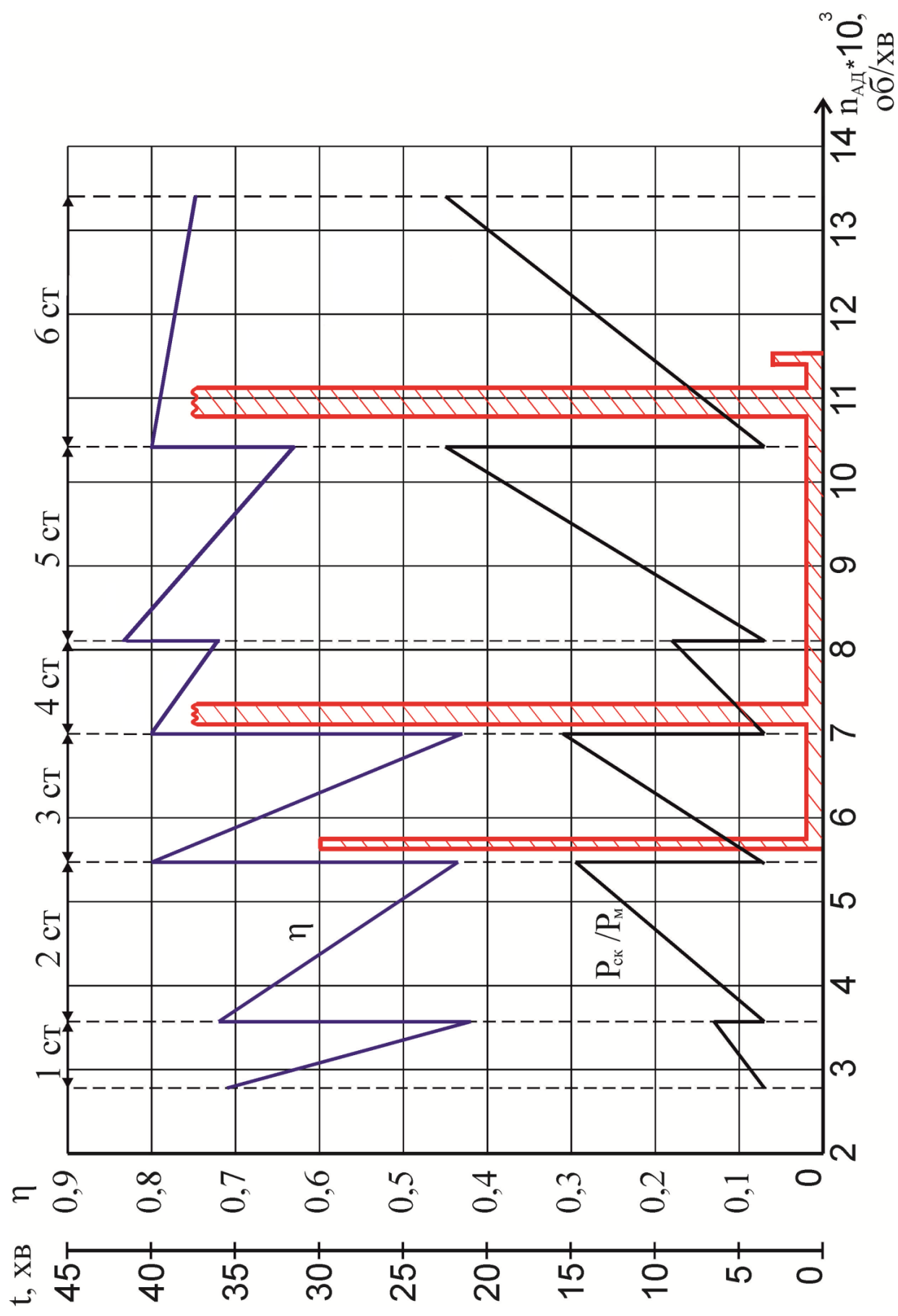


Рис. 2.3. Діаграма частотних діапазонів роботи АД і ПГА літака на всіх режимах роботи

## **2.3. Висновок**

Для вдосконалення СЕП було запропоновано використання електромеханічного привод-генераторного агрегату. При розробці принципової електричної схеми, в першу чергу, було звернута увага на простоту конструкції і мінімальний набір її функціональних елементів. Такий критерій був обраний виходячи з доцільності вдосконалення, шляхом зменшення конструктивної маси існуючого ПГА. Але при цьому слід згадати, що якість ЕЕ, яка генерується, відповідає всім вимогам і стандартам.

Стабілізація частоти СГ здійснюється як ступінчасто за рахунок зміни режимів роботи АП і ЕМК шляхом ступінчастої зміни частоти і напруги, що підводиться до ЕМК, так і плавно за рахунок плавної зміни ковзання веденого ЕМК відносно магнітного потоку, що обертається, шляхом плавної зміни частоти і напруги, що підводиться до ЕМК, на кожному ступені роботи ПГА за допомогою РН.

На основі виконаних розрахунків частотних характеристик ПГА з урахуванням діаграм зміни обертів АД за режимами його роботи був зроблений висновок про доцільність використання на даному літаку триступеневого ПГА, що суттєво спрощує систему автоматичного керування роботою ПГА. Результати розрахунків частотних характеристик будуть застосовані при виборі і розрахунках окремих елементів САК агрегату.

## **РОЗДІЛ 3**

### **РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПГА ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**3.1. Електрична схема управління та підсилення, розрахунок її параметрів**



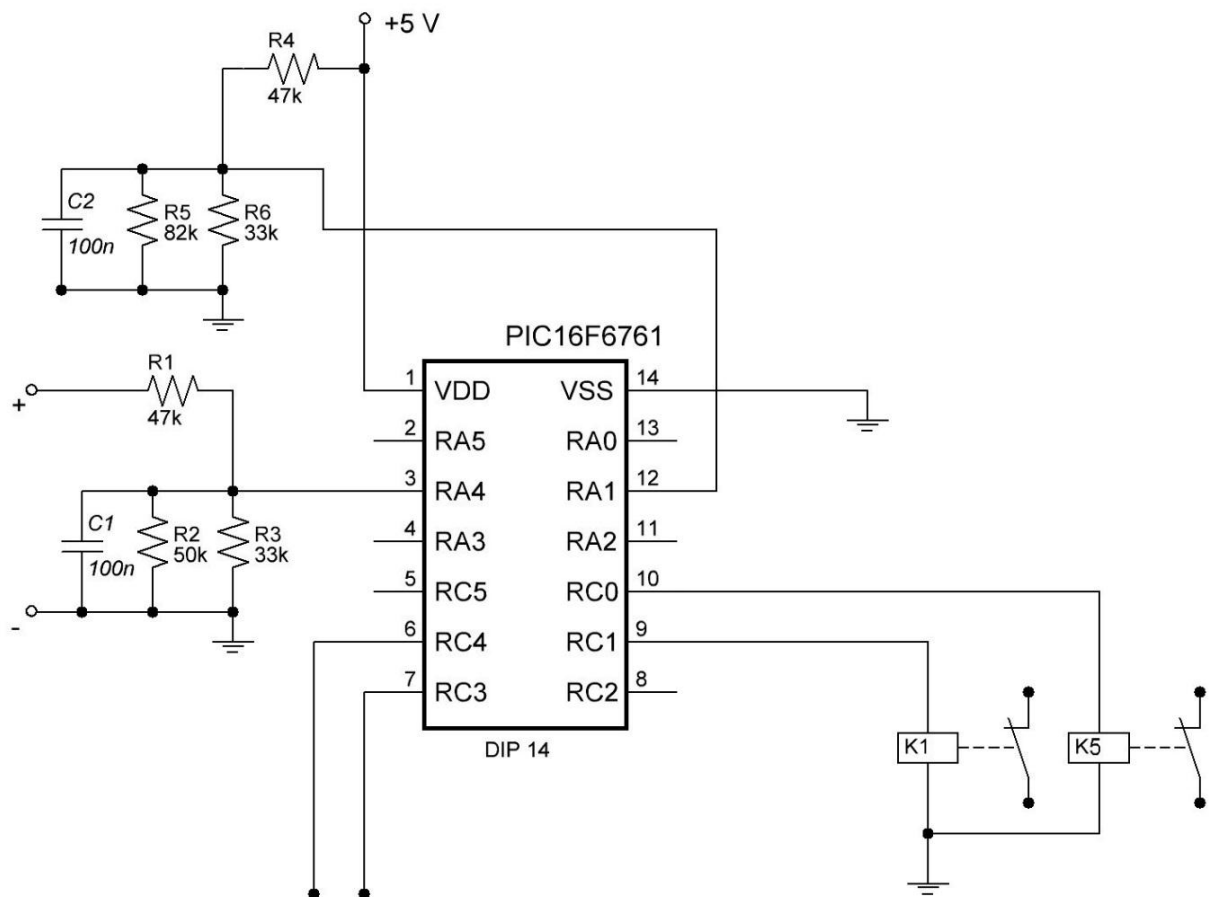


Рис. 3.2. Схема електрична принципова ЕСУП

Схема побудована на мікроконтролері (МК) серії PIC16F676, фірми Microchip Technology Inc., з восьми канальним десяти розрядним АПЦ, здатним працювати в діапазоні температур від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  градусів по Цельсію. Основна функція МК – здійснення управління ПГА шляхом вимірювання випрямленої напруги, яка приходить від ВУ1 і пропорційна величині частоти обертання авіадвигуна та видачі сигналів для управління низьковольтними реле K1 і K5. Живлення мікросхеми відбувається від стабілізованого джерела напруги постійного струму 5В через контакт VDD (1) мікроконтролера.

Принцип роботи ЕСУП полягає в наступному: при подачі живлення через резисторний подільник, який побудований на резисторах R4, R5, R6, напруга поступає на контакт RA1 (12) МК. Одночасно з цим відбувається вимірювання напруги в першому каналі аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Після проведення вимірювання рівня напруги і запам'ятовування її значення, через 30-50

мкс відбувається вимірювання в другому каналі АЦП, який призначений для контролю рівня напруги на випрямному пристрої ВУ1. Робота МК побудована таким чином, що він не може одночасно працювати з кількома каналами АЦП, тому спочатку опрацьовуються дані з одного каналу, а потім з іншого. Діапазон живлення МК складає 2 – 5,5 В. Для забезпечення надійності живлення і стабільності роботи, передбачено захист від зниження і збільшення напруги в діапазоні від 4,5 – 5,3 В. Це дозволяє МК виконувати всі його задані функції.

Захист МК від недопустимої напруги відбувається наступним чином: у випадку падіння напруги нижче, чим 4,5 В, з контакту RC4 (6) МК надходить сигнал, який сигналізуватиме про зменшення рівня напруги. Аналогічно цей сигнал буде видаватися при збільшенні рівня напруги вище допустимої. Програма, що закладена в МК, містить фіксовані значення рівня напруги, що відповідають 1,49 В для зниженого рівня напруги живлення МК (4,5 В) і 1,77 В для підвищеного рівня (5,3 В). Управляючі сигнали від резисторного подільника надходять на контакт RA1 (12) у вигляді сигналів з фіксованим рівнем напруги.

Принцип роботи МК полягає в наступному. Напруга постійного струму, що прямопропорційна частоті обертання датчика індукційного тахогенератора, поступає на вхід резисторного подільника напруги, який побудований на резисторах R1, R2, R3 і конденсаторі C1. Після цього напруга поступає на контакт RA4 (3) МК і опрацьовується третім каналом АЦП AN3. Дані про частоту обертання порівнюються з даними, які запрограмовані в МК, і які відповідають частоті, при якій відбувається переключення ступенів роботи ЕМК і АП.

Перемикання ступенів ЕМК здійснюється шляхом видачі напруги на замкнення чи розімкнення відповідного реле K1 і K5. При досягненні оборотів, які виходять за межі вимірювання тахогенератора або не відповідають значенням напруги переключення ступенів, на контакт RC3 (7) МК буде видаватися сигнал про несправність датчика тахогенератора.

Для забезпечення нормальної роботи комутуючих реле необхідний струм величиною від 50 мА до 100 мА. З контактів контролера можна знімати напругу до 5В, але при цьому струм не більше 40 мА для всіх портів разом взятих.

Забезпечення необхідного рівня струму здійснюється шляхом підключення до контактів RC0 (10) і RC1 (9) схеми транзисторного підсилювача струму (рис. 3.3).

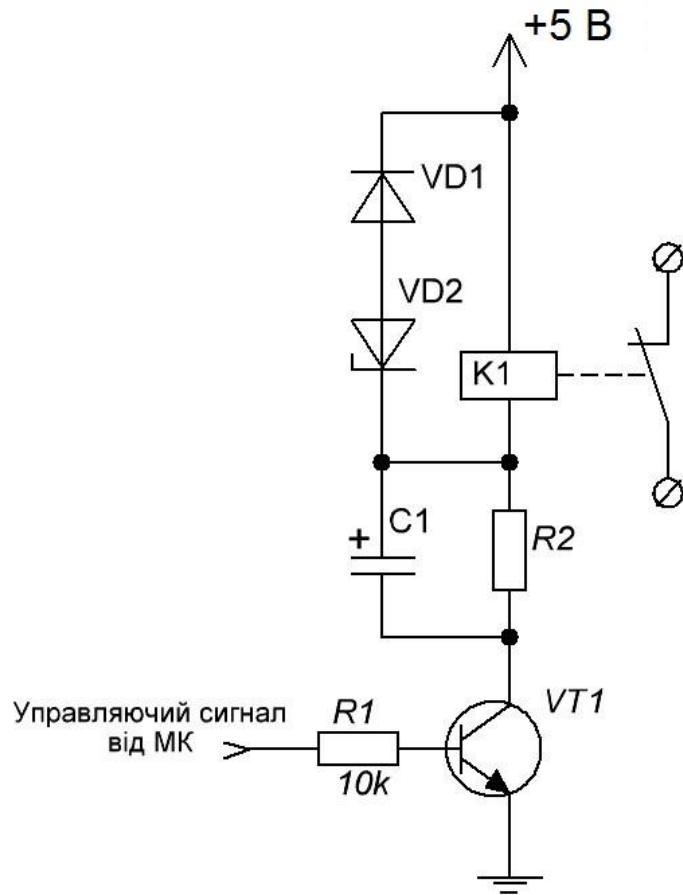


Рис. 3.3. Схема електрична принципова транзисторного підсилювача струму

Схема підсилення струму побудована на транзисторі типу NPN, марки BC546 з коефіцієнтом підсилення 300 і колекторним струмом порядку 100 мА. В якості альтернативи транзистору BC546 можуть бути використані транзистори: BC547, BC548, BC549, KT315, KT3107. Використання альтернативних транзисторів дозволяє розширити температурний режим роботи запропонованої схеми.

В даній схемі колектор транзистора підключається до навантаження, а емітер заземляється. На базу подається напруга з МК через резистор R1. Підсилення відбувається наступним чином: якщо пропустити вхідний струм через ланцюг

база-емітер, то через колектор-емітер зможе пройти струм рівний вхідному і помноженому на коефіцієнт підсилення транзистора  $h_{fe}$ .

В схемі транзисторного підсилювача струму діод VD1 виконує функцію захисту реле від різкого підвищення рівня напруги, який виникає внаслідок відімкнення живлення реле. Електролітичний конденсатор C1 дає змогу гасити пульсації в ланцюзі і зменшити різкі стрибки напруги.

При розмиканні реле, енергія магнітного поля гаситься через діод, але при цьому в котушці продовжує протікати струм, тобто вона утримує якір реле. Це збільшує час між зняттям сигналу управління і відімкненням контактної групи. Для цього в схемі передбачено стабілітрон VD2, який знімає перешкоду протіканню струму і в цей час захищає транзистор від пробую високою напругою. В результаті цього забезпечується підвищення рівня напруги на котушці реле, але при цьому вона є нижчою критичної точки пробую реле. Також такий спосіб підключення стабілітрона дозволяє зменшити затримку на відімкнення реле.

Максимальна вихідна напруга з контакту МК, при подачі в порт одиниці, рівна 5 В, а її падіння в ланцюгу база-емітер складає 0,7 В. Опір в базовому ланцюгу рівний 10000 Ом. При цьому вхідний струм, за законом Ома, буде дорівнювати:

$$I = U/R = 5/10000 = 0,5 \text{ мА.} \quad (3.1)$$

Струм номіналом 0,5 мА дає нам змогу одночасно підключати до 8 реле, при цьому не перенавантажуючи порти МК.

Вихідний струм, або колекторний струм транзистора, буде рівним:

$$I_c = I \cdot h_{fe} = 0.5 \cdot 300 = 150 \text{ мА,} \quad (3.2)$$

де  $I$  – вхідний струм,

$h_{fe}$  – коефіцієнт підсилення транзистора.

Запропонована схема ЕСУП може забезпечувати одночасно роботу двох реле, при цьому можливе підключення ще одного реле, для відімкнення тахогенератора в разі його несправності.

Надійність роботи ЕСУП забезпечується введенням в запропоновану схему дублюючого МК з власними ланцюгами управління і живлення (рис. 3.4). Таким чином забезпечується двократне резервування для того, щоб уникнути випадкових спрацювань або десинхронізації в роботі МК.

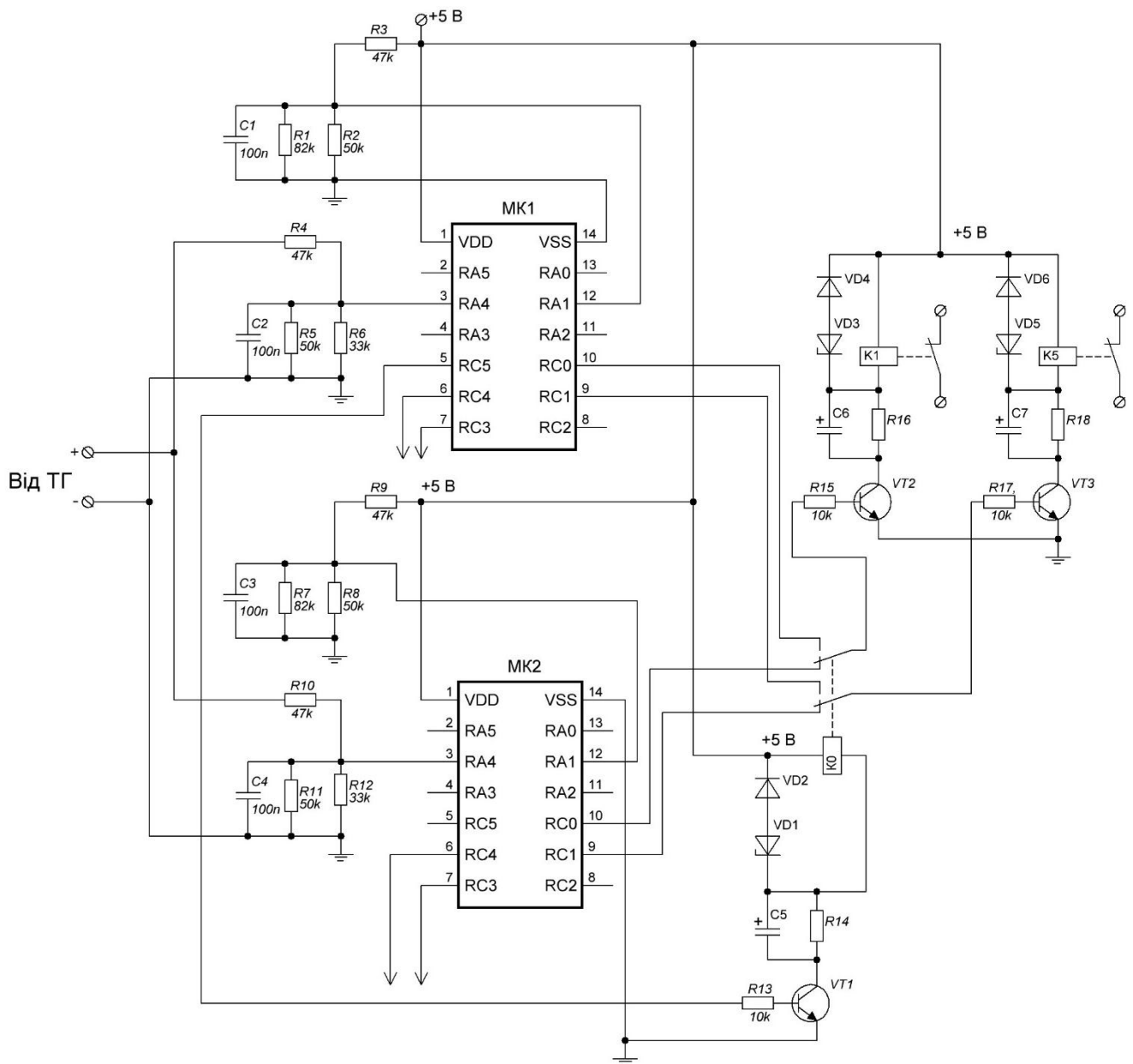


Рис. 3.4. Схема електрична принципальна ЕСУП з двократним резервуванням

Керування групою реле здійснює лише один з МК. При цьому другий МК виконує паралельно аналогічну роботу, але його сигнал не видається на реле К1 і К5. Це забезпечується видачою сигналу затримки на таймер запуску одного з МК. Час затримки включає в себе час необхідний для запуску іншого МК та початку виконання програми і складає 5с. МК1, який є основним, видає сигнал у вигляді 5 В через контакт RC5 (5) на схему транзисторного підсилювача струму реле К0. Реле, отримавши живлення, розмикає контакти для управління від МК2 і підключає контакти для управління від МК1. При цьому забезпечується робота лише від МК1, а в разі його несправності – відсутність сигналу з контакту RC5 відключить реле К0 і схема буде отримувати контролюючі сигнали від МК2.

### 3.2. Розробка принципової схеми блоку живлення ЕСУП та розрахунок основних її параметрів

Схема блоку живлення, призначеного для живлення МК і реле ЕСУП напругою 5 В і струмом до 5 А приведена на рис. 3.5.

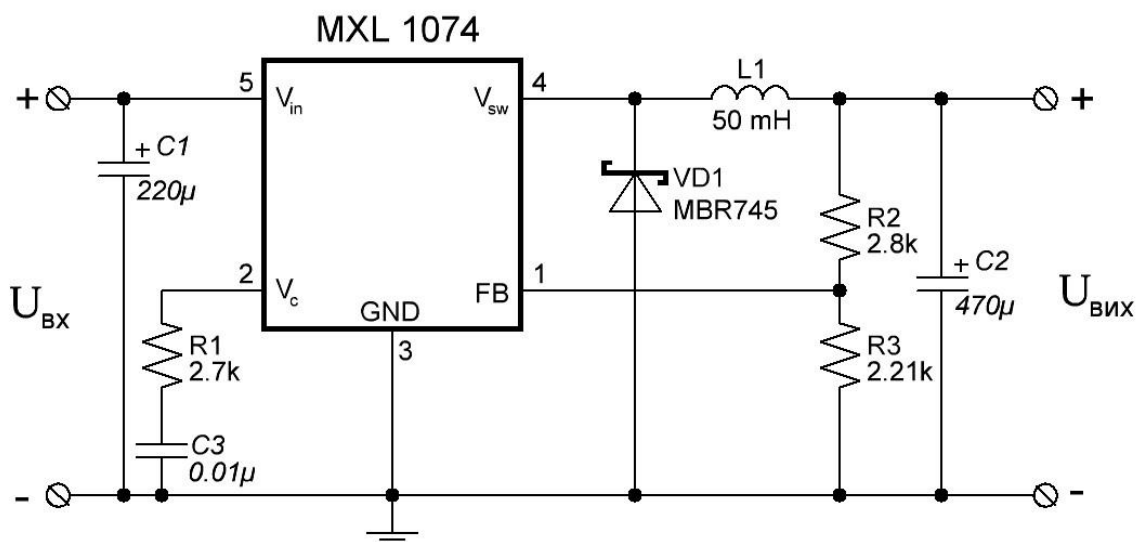


Рис. 3.5. Схема електрична принципова понижуючого перетворювача на MXL 1074

В основі такого блоку живлення лежить мікросхема MXL 1074 – монолітна, біполярна з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), ключовий понижуючий регулятор DC-DC, фірми Maxim integrated, з вихідною напругою 5 В і струмом до

5 А. Вхідна напруга коливається від 2,5 В до 35 В. Дана мікросхема здатна працювати в діапазоні температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  градусів по Цельсію. MXL 1074 випускається в 5-ти вивідному корпусі ТО-220. Задня, металева частина з'єднана з землею. ККД такого перетворювача, при частоті роботи 100 кГц, складає 93%.

Принцип роботи мікросхеми полягає в перетворенні (пониженні) вхідної напруги до 5 В вихідної напруги з фіксованим рівнем вихідних пульсацій.

Вхідний конденсатор С1 необхідний для згладжування пульсацій вхідної напруги, що виникають при роботі перетворювача. Величина його повинна бути досить великою, щоб не допустити перегріву через ESR (еквівалентного послідовного опору) і середньоквадратичного значення пульсуючої складової струму, який протікає через вхідний конденсатор:

$$I_{\text{ср.кв}} = I_{\text{вих}} \sqrt{U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}})/U_{\text{вх}}^2} = 5 \cdot \sqrt{5(28 - 5)/28^2} = 1,91 \text{ А.} \quad (3.3)$$

Для даного перетворювача, величина вхідного конденсатора складає 220 мкФ.

Конденсатор вихідного фільтра С2 призначений для згладжування пульсацій і стрибків вихідної напруги. В неперервному режимі роботи, пульсації рівня напруги на виході можна розрахувати по формулі:

$$U_{\text{п}} = \frac{(ERS) \cdot U_{\text{вих}} \cdot (1 - \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}})}{L_1 f}. \quad (3.4)$$

При частоті понад 10 кГц конденсатор можна вважати як простий опір. Якщо індуктивність складає 50 мГн, то конденсатор вибираємо по значенню ESR:

$$ERS(\text{max}) = \frac{U_{\text{п}} L_1 f}{U_{\text{вих}} (1 - \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}})} = \frac{0,05 \cdot (50 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^5}{5 \cdot (1 - \frac{5}{28})} = 0,06 \text{ Ом.} \quad (3.5)$$

Діод MBR 745 використовується для забезпечення протікання струму, від L1 через навантаження в момент, коли ключ MXL 1074 замкнений. Найбільш важкий режим роботи для цього діода є коротке замикання на виході, тобто  $U_{\text{вих}} = 0$ . При цьому, обмеження по струму

відбувається тільки на рівні, встановленому в самій мікросхемі MXL1074 і становить 6,5 А. Потужність втрат на діоді можна розрахувати по формулі:

$$P_d = U_{\text{вих}} f t_{rr} I_{\text{вих}} = 28 \cdot 10^5 \cdot 10^{-7} \cdot 5 = 1,4 \text{ Вт.} \quad (3.6)$$

де,  $t_{rr}$  – час відновлення діода, який складає 100 нсек.

Резисторний подільник напруги побудований на резисторах R2 і R3, які встановлюють вихідний рівень напруги перетворювача. R3 зазвичай має опір 2,21 кОм, що відповідає опорній напрузі мікросхеми MXL 1074, рівній 2,21 В.

R2 розраховується з наступного виразу:

$$R_2 = \frac{R_3 (U_{\text{вих}} - U_{\text{оп}})}{U_{\text{оп}}}. \quad (3.7)$$

Якщо R3 = 2,21 кОм, то R2 розраховується як:

$$R_2 = \frac{R_3 (U_{\text{вих}} - U_{\text{оп}})}{U_{\text{оп}}} = \frac{2,21(5 - 2,21)}{2,21} = 2,8 \text{ кОм.} \quad (3.8)$$

### **3.3. Розрахунок параметрів регулюючого трансформатора випрямного пристрою ТВП**

Стабілізація вихідної напруги з будь-якою доцільною точністю може бути забезпечена в разі застосування в ТВП регульованого трифазного трансформатора, який забезпечується відповідним автоматичним регулятором, що змінює величину струму підмагнічування ярма магнітопроводу трансформатора.

ТВП (рис. 3.6) має номінальну вихідну напруга 28,5 В і номінальний струм, рівний 50 А при  $U_{1\Phi} = 120 \text{ В}$ ,  $f = 400 \text{ Гц}$ .

Принципова схема розміщення і з'єднання обмоток регулюючого трифазного трансформатора, призначеного для ВП з автоматичною стабілізацією випрямленої напруги, зображена на рис. 3.6: 1 – обмотка підмагнічування лівого крайнього ярма, 2 – перша, менша частина первинної трифазної обмотки, 3 – друга, основна

частина первинної обмотки, 4 – вторинна трифазна обмотка, з'єднана в “зірку”, 5 – вторинна трифазна обмотка, з'єднана в “трикутник”. Обидві вторинні обмотки, розраховані на однакові лінійні напруги  $U_{\Delta} = U_{\lambda}$ , які живлять спільний дванадцятиімпульсний випрямляч з дванадцятьма діодами, які забезпечують високу якість випрямленої напруги [2].

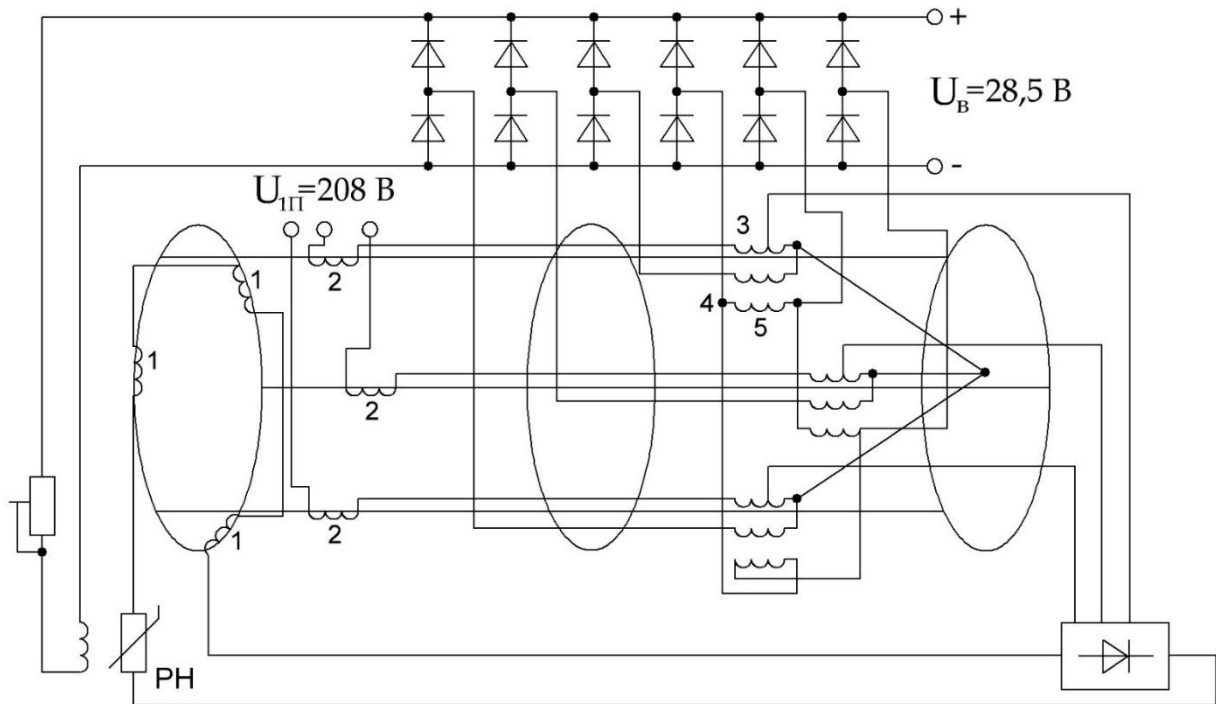


Рис. 3.6. Схема електрична принципіальна регулюючого трифазного трансформатора, призначеного для випрямного пристрою

Розрахунковою потужністю регулюючого трифазного трансформатора з складовим витим циліндричним магнітопроводом є потужність, яку він споживає при номінальному навантаженні:

$$S_1 = \frac{S_2 \cdot \cos \varphi_2}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{1 \cdot 0,98}{0,86 \cdot 0,94} = 1,212 \text{ кВА.} \quad (3.9)$$

При відношенні внутрішнього діаметру циліндричного магнітопроводу до зовнішнього  $D_B/D_H = 0,6$  розмір середнього діаметру знаходиться за наступною формулою:

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{\frac{zS_1 \cdot 10^7}{2,54\kappa_e f B_3 A_1}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1,212 \cdot 10^7}{2,54 \cdot 0,88 \cdot 400 \cdot 1,5 \cdot 165}} = 5,5 \text{ см.} \quad (3.10)$$

В цьому випадку  $D_3 = 1,25 \cdot D_{\text{cp}} = 7 \text{ см}$ ,  $D_B = 0,75 \cdot D_c = 4 \text{ см}$ , а радіальний розмір ярма:

$$h_{\text{я}} = \frac{D_3 - D_B}{2} = \frac{7 - 4}{2} = 1,5 \text{ см.} \quad (3.11)$$

При середній ширині кожного зубця на торцях середньої частини магнітопроводу, рівній ширині прямокутного пазу:

$$b_{3,\text{cp}} = b_{\text{п}} = 3,14 \cdot \frac{D_{\text{cp}}}{2z} = 3,14 \cdot \frac{5,5}{2} \cdot 3 = 2,9 \text{ см.} \quad (3.12)$$

Площа поперечного перерізу зубця і ярма та його довжина:

$$q_3 = b_{3,\text{cp}} h_{\text{д}} = 2,9 \cdot 1,4 = 4 \text{ см}^2; \quad (3.13)$$

$$q_{\text{я}} = 0,5 \cdot q_3 = 2 \text{ см}^2; \quad (3.14)$$

$$l_{\text{я}} = \frac{q_{\text{я}}}{h_{\text{я}}} = 1,45 \text{ см.} \quad (3.15)$$

Величина магнітного потоку в зубці:

$$\begin{aligned} \Phi_{3 \text{ max}} &= 0,93 \cdot q_3 \cdot B_{3 \text{ max}} 10^{-4} = 0,93 \cdot 4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = \\ &= 5,58 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Число витків в основній частині первинної обмотки, розміщеної на зубцях правого торця:

$$w_3 = \frac{U_{1н}}{\kappa_e \cdot 4,44 f \Phi_{3 \max}} = \frac{120 \cdot 10^4}{0,88 \cdot 4,44 \cdot 400 \cdot 5,58} = 138. \quad (3.17)$$

Регулюючий трансформатор (рис. 3.6) по принципу дії подібний звичайному нерегулюючому трансформатору з трифазними обмотками 3, 4 і 5, суміщеного з управляючим дроселем з трифазною обмоткою 2 і обмоткою підмагнічування 1. Для знаходження числа витків в фазі обмотки 2 потрібно побудувати векторну діаграму управляючого дроселя, з якої видно, що для регулювання напруги, яка підводиться до обмотки 3, в діапазоні від  $U_{3 \max} = 0,95U_{1 \text{ ном}}$  до  $U_{3 \min} = 0,66U_{1 \text{ ном}}$ , необхідно, щоб максимальна ЕРС фази обмотки 2 дорівнювала  $E_2 = 0,5U_{1 \text{ ном}}$ , тому число витків в фазі обмотки 2:

$$w_2 = 0,5w_3 = 69. \quad (3.18)$$

При побудові діаграми не враховано падіння напруги в фазі обмотки 2. Якщо врахувати падіння напруги, то необхідна ЕРС фази обмотки 2 буде на 4...5% менше. З цього слідує, що діапазон зміни  $U_2$  також буде дещо більше. Величина струму, що споживається в фазі при номінальному навантаженні ТВП, та щільність струму розраховуємо як:

$$I_1 = \frac{S_1 \cdot 10^3}{mU_{1\phi}} = \frac{1212}{3 \cdot 120} = 3,4 \text{ А}; \quad (3.19)$$

$$A_{1\text{cp}} = \frac{2mw_3I_1}{3,14D_{\text{cp}}} = \frac{6 \cdot 138 \cdot 3,4}{3,14 \cdot 5,5} = 163,7 \text{ А/см}. \quad (3.20)$$

Переріз проводу первинних обмоток 2 і 3 та середня довжина витків обмотки 2 і 3:

$$q_{2,3} = \frac{I_1}{j_{2,3}} = \frac{3,4}{4,5} = 0,756 \text{ мм}^2; \quad (3.21)$$

$$l_2 = l_3 = \frac{3,14(D_3 + D_B)}{z} + 2h_{\text{я}} - 0,5b_{\text{к}} = \frac{3,14(7 + 4)}{3} + 2,8 - 2 = 12,3 \text{ см.} \quad (3.22)$$

Активний опір фази обох частин первинної обмотки при  $T = 90^\circ$  та втрата потужності в первинній обмотці при номінальному навантаженні:

$$R_{2,3} = \frac{(w_2 + w_3)l_{2,3} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_{2,3}} = \frac{(138 + 69) \cdot 12,3 \cdot 1,28}{5700 \cdot 0,756} = 0,758 \text{ Ом}; \quad (3.23)$$

$$\Delta P_{2,3} = m_1 I_1^2 R_{2,3} = 3 \cdot 3,4^2 \cdot 0,758 = 26,272 \text{ Вт.} \quad (3.24)$$

З ціллю зменшення амплітуди пульсацій випрямленої напруги на зубцях правого торця середньої частини магнітопроводу, разом з котушками первинної обмотки 3, розміщуються також котушки двох вторинних обмоток 4 і 5, з'єднаних одна в зірку, а інша – в трикутник. Величини лінійної напруги обох вторинних обмоток мають бути практично однакові, а саме:

$$U_{4,5} = \frac{U_B}{\kappa_B} = \frac{28,5}{1,28} = 22,3 \text{ В.} \quad (3.25)$$

Число витків в фазі обмотки 4, з'єднаних в зірку та величина струму в фазі обмотки:

$$w_4 = \frac{\kappa_e U_4}{4,44 f \Phi_{3 \max} \sqrt{3}} = \frac{0,88 \cdot 22,3 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 400 \cdot 5,58 \cdot 1,73} = 12; \quad (3.26)$$

$$I_4 = \frac{0,5 \cdot S_2 \cdot 10^3}{1,73 \cdot U_4} = \frac{0,5 \cdot 1000}{1,73 \cdot 22,3} = 13 \text{ А.} \quad (3.27)$$

Переріз проводу обмотки 4, активний опір та втрати потужності в обмотці 4:

$$q_4 = \frac{I_4}{j_4} = \frac{13}{4,5} = 2,9 \text{ мм}^2; \quad (3.28)$$

$$R_4 = \frac{w_4 l_4 \cdot 1,28}{5700 q_4} = \frac{12 \cdot 12,3 \cdot 1,28}{5700 \cdot 2,9} = 0,011 \text{ Ом}; \quad (3.29)$$

$$\Delta P_4 = m_4 I_4^2 R_4 = 3 \cdot 13^2 \cdot 5,08 \cdot 10^{-3} = 5,8 \text{ Вт}. \quad (3.30)$$

Число витків в фазі обмотки 5, з'єднаних в трикутник та величина струму в фазі обмотки:

$$w_5 = \frac{\kappa_e U_5}{4,44 f \Phi_{3 \max}} = \frac{0,88 \cdot 22,3 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 400 \cdot 5,58} = 20; \quad (3.31)$$

$$I_5 = \frac{0,5 \cdot S_2 \cdot 10^3}{3 \cdot U_5} = \frac{0,5 \cdot 1000}{3 \cdot 22,3} = 7,5 \text{ А}. \quad (3.32)$$

Переріз проводу обмотки 5, активний опір фази обмотки та втрати потужності в ній розраховуємо як:

$$q_5 = \frac{I_5}{j_5} = \frac{7,5}{4,5} = 1,7 \text{ мм}^2; \quad (3.33)$$

$$R_5 = \frac{w_5 l_5 \cdot 1,28}{5700 q_5} = \frac{20 \cdot 12,3 \cdot 1,28}{5700 \cdot 1,7} = 0,033 \text{ Ом}; \quad (3.34)$$

$$\Delta P_5 = m_5 I_5^2 R_5 = 3 \cdot 7,5^2 \cdot 0,033 \cdot 10^{-3} = 5,5 \text{ Вт}. \quad (3.35)$$

Сила намагнічування (СН) змінного струму обмотки 2 при номінальному навантаженні та необхідна СН обмотки підмагнічування 1:

$$F_2 = 0,9 m_1 \omega_2 I_1 = 0,9 \cdot 3 \cdot 24 \cdot 21,8 = 633 \text{ А}; \quad (3.36)$$

$$F_1 = 2,2 \cdot h_1 F_2 = 1393 \text{ А}. \quad (3.37)$$

При струму підмагнічування  $I_{\Pi} = 5 \text{ А}$  число витків в обмотці 1 і в одній котушці:

$$w_1 = \frac{1393}{5} = 279; \quad (3.38)$$

$$w_{k1} = 93. \quad (3.39)$$

Переріз і діаметр проводу обмотки 1:

$$q_1 = \frac{I_{\Pi}}{j_1} = \frac{5}{7,85} = 0,636 \text{ мм}^2; \quad (3.40)$$

$$d_1 = 0,9 \text{ мм}. \quad (3.41)$$

Глибина пазів на лівому та правому торці середньої частини магнітопроводу:

$$h_{\Pi 1} = h_1 + h_2 = \frac{w_{k1} q_1}{k_3 b_{\Pi}} + \frac{2w q_2}{k_3 b_{\Pi}} = \frac{93 \cdot 0,636}{0,45 \cdot 42} + \frac{2 \cdot 69 \cdot 0,756}{0,55 \cdot 42} = 8 \text{ мм}; \quad (3.42)$$

$$h_{\Pi 2} = h_3 + h_4 + h_5 = \frac{2w_3 q_3}{k_3 b_{\Pi}} + \frac{2w_4 q_4}{k_3 b_{\Pi}} + \frac{2w_5 q_5}{k_3 b_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 138 \cdot 0,756}{0,55 \cdot 42} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 12 \cdot 2,9}{0,5 \cdot 42} + \frac{2 \cdot 20 \cdot 1,7}{0,5 \cdot 42} = 15,6 \text{ мм}. \quad (3.43)$$

Середня довжина витка обмотки підмагнічування 1 та опір обмотки 1 при  $T = 90^\circ$ :

$$l_1 = 2(h_{\text{я}} + l_{\text{я}} + 2h_1) = 2(1,4 + 1,45 + 2 \cdot 3,1) = 18,3 \text{ см}; \quad (3.44)$$

$$R_1 = \frac{w_1 l_1 \cdot 1,28}{5700 q_1} = \frac{279 \cdot 18,3 \cdot 1,28}{5700 \cdot 0,636} = 1,798 \text{ Ом}. \quad (3.45)$$

Напруга випрямленого струму на клеммах та втрати потужності в обмотці підмагнічування:

$$U_{\text{о.п}} = I_{\Pi} R_1 = 5 \cdot 1,798 = 8,991 \text{ В}; \quad (3.46)$$

$$\Delta P_1 = U_{o.п} I_{\Pi} = 8,991 \cdot 5 = 45 \text{ Вт.} \quad (3.47)$$

Сумарні втрати потужності в усіх обмотках при номінальному навантаженні і максимальному струмі в обмотці підмагнічування:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P_m &= \Delta P_1 + \Delta P_{2,3} + \Delta P_4 + \Delta P_5 = 45 + 22,272 + 5,8 + 5,5 = \\ &= 82,5 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Маса сталі магнітопроводу:

$$\begin{aligned} \Sigma M_{ст} &= [0,785(D_H^2 - D_B^2)3l_{я} + 3q_3(h_{п1} + h_{п2})] \cdot 0,93\gamma_{ст} \cdot 10^{-3} = \\ &= [0,785 \cdot (7^2 - 4^2) \cdot 3 \cdot 1,45 + 3 \cdot 4 \cdot (0,8 + 1,558)] \cdot 0,93 \times \\ &\times 7,65 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.49)$$

При максимальному струмі в обмотці підмагнічування 1 ліве ярмо магнітопроводу сильно насичено постійним магнітним потоком, тому величини змінного магнітного потоку в ньому не перевищує 5% від його максимальної величини. З цього слідує, що втрати потужності в лівому ярмі і в зубцях лівого торця магнітопроводу дуже малі і їх можна не враховувати, обчислюючи лише магнітні втрати потужності тільки в двох ярмах і в зубцях правого торця магнітопроводу, загальна маса яких знаходиться [2]:

$$\begin{aligned} M_{ст} &= [0,785(D_H^2 - D_B^2)2l_{я} + 3q_3h_{п2}] \cdot 0,93\gamma_{ст} \cdot 10^{-3} = \\ &= [0,785(7^2 - 4^2) \cdot 2 \cdot 1,45 + 3 \cdot 4 \cdot 1,558] \cdot 0,93 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,667 \text{ кг.} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Так як величини магнітної індукції в зубцях і в ярмах прийняті однаковими, то загальні втрати в сталі магнітопроводу можна обчислити по питомим втратам  $p_{пит}$  Вт/кг для даного сорту сталі при  $B = 1 \text{ Тл}$  і  $f = 400 \text{ Гц}$ :

$$\Delta P_{\text{ст}} = k_{\text{д}} p_{\text{пит}} \left( \frac{f}{50} \right)^{1,33} \cdot B^2 M_{\text{ст}} = 2 \cdot 1,75 \cdot \left( \frac{400}{50} \right)^{1,33} \cdot 1,5^2 \cdot 0,667 = 83,5 \text{ Вт.} \quad (3.51)$$

Загальні втрати в обмотках і в сталі магнітопроводу:

$$\Sigma \Delta P = \Sigma \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}} = 82,5 + 83,5 = 166 \text{ Вт.} \quad (3.52)$$

ККД і  $\cos \varphi_1$  регулюючого трансформатора при нормальній активному навантаженні:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{1000 \cdot 1}{1000 + 166} = 0,855; \quad (3.53)$$

$$\Sigma \cos \varphi_1 = \frac{S_2 \cos \varphi_2 + \Sigma \Delta P}{S_1} = \frac{1166}{1212} = 0,946. \quad (3.54)$$

Отримані значення  $\eta_{\text{н}}$  і  $\cos \varphi_1$  майже не відрізняються від прийнятих на початку, тому уточнення розрахунку не потрібно.

Розрахунок маси міді обмоток трансформатора:

$$M_{\text{м2}} = m \omega_2 l_2 q_2 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 24 \cdot 18,75 \cdot 2,91 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,171 \text{ кг;} \quad (3.55)$$

$$M_{\text{м1}} = \omega_{\text{оп}} l_1 q_1 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 624 \cdot 11 \cdot 0,636 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,289 \text{ кг;} \quad (3.56)$$

$$M_{\text{м3}} = m \omega_3 l_3 q_3 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 48 \cdot 18,75 \cdot 2,91 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,343 \text{ кг;} \quad (3.57)$$

$$M_{\text{м4}} = m \omega_4 l_4 q_4 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 7 \cdot 18,75 \cdot 10,44 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,114 \text{ кг;} \quad (3.58)$$

$$M_{\text{м5}} = m \omega_5 l_5 q_5 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 12 \cdot 18,75 \cdot 6,085 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,112 \text{ кг.} \quad (3.59)$$

Загальна маса міді всіх обмоток та активних металів:

$$\Sigma M_{\text{M}} = M_{\text{M1}} + M_{\text{M2}} + M_{\text{M3}} + M_{\text{M4}} + M_{\text{M5}} = 0,171 + 0,289 + 0,343 + 0,114 + 0,112 = 1,029 \text{ KГ}; \quad (3.60)$$

$$\Sigma M_{\text{акт}} = \Sigma M_{\text{сг}} + \Sigma M_{\text{м}} = 1 + 1,029 = 2,029 \text{ кг.} \quad (3.61)$$

### Питома маса активних металів:

$$M_{\text{акт}} = \frac{\Sigma M_{\text{акт}}}{S_2} = \frac{2,029}{1} = 2,029 \text{ кг/кВА.} \quad (3.62)$$

### 3.4. Розробка принципової електричної схеми регулятора напруги і розрахунок його параметрів

В якості регулятора напруги (РН) було застосовано регулюючий автотрансформатор (АТР) з трифазними обмотками на зубцях витого циліндричного магнітопроводу (рис. 3.7). Такий тип трансформатора здатний забезпечувати вторинну напругу на рівні номінальної первинної напруги або регулювати її рівень в більшу чи меншу сторону. Застосування АТР забезпечує отримання необхідного рівня вторинної вихідної напругу в дуже широких межах, що дає змогу жити АП на всіх його режимах роботи.

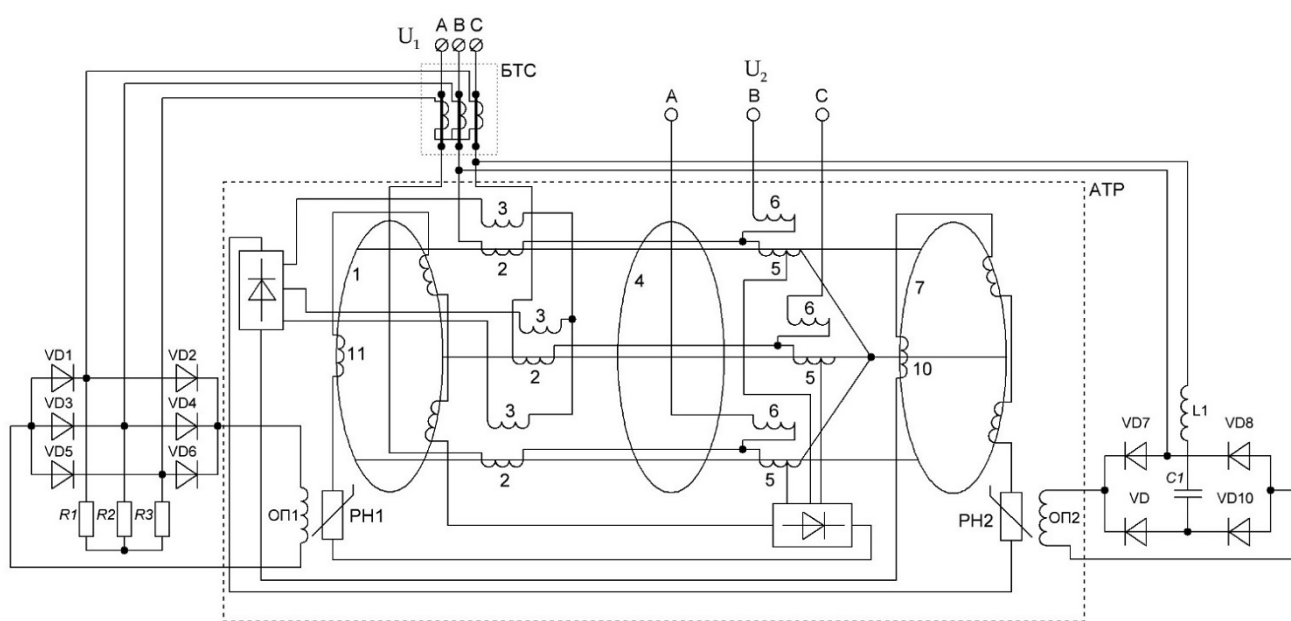


Рис. 3.7. Схема електрична принципова регулятора напруги з застосування регулюючого автотрансформатора та компаундного керування

На рис. 3.7 зображено принципову схему розміщення і з'єднання всіх обмоток регулюючого автотрансформатора: 1 і 7 – крайні ярма магнітопроводу, 4 – середнє ярмо з зубцями на торцях, де розміщені котушки всіх трифазних обмоток, а саме: послідовно з'єднані котушки загальної первинної і вторинної обмоток 2 і 5, вольтодобавна обмотка 6, яка з'єднана послідовно з фазами вторинної обмотки 5, а також обмотка 3, яка живить через діодний випрямляч і регулятор напруги РН1 обмотку підмагнічування 10. Обмотка підмагнічування 11 живиться через випрямляч і регулятор напруги РН2. Застосування вольтодобавної обмотки 6 дозволяє підтримувати вторинну вихідну напругу  $U_2$  на рівні номінальної первинної напруги  $U_1$  [2].

Для підтримування точного рівня вихідної напруги в РН застосовано компаундне керування, шляхом підмагнічування регуляторів напруги РН1 і РН2, які живлять обмотки підмагнічування 10 і 11. Це дає можливість стабілізації вихідної напруги на будь-якому рівні від  $U_{2\min}$  до  $U_{2\max}$  при будь-якому навантаженні.

Обмотка підмагнічування (ОП1), яка є складовою РН1 і живиться від блоку трансформаторів струму (БТС), призначена для автоматичного регулювання напруги в залежності від навантаження на генератор (рис. 3.8). ОП2 живиться від ВЧ і призначена для автоматичного регулювання напруги, в залежності від частоти напруги генератора.

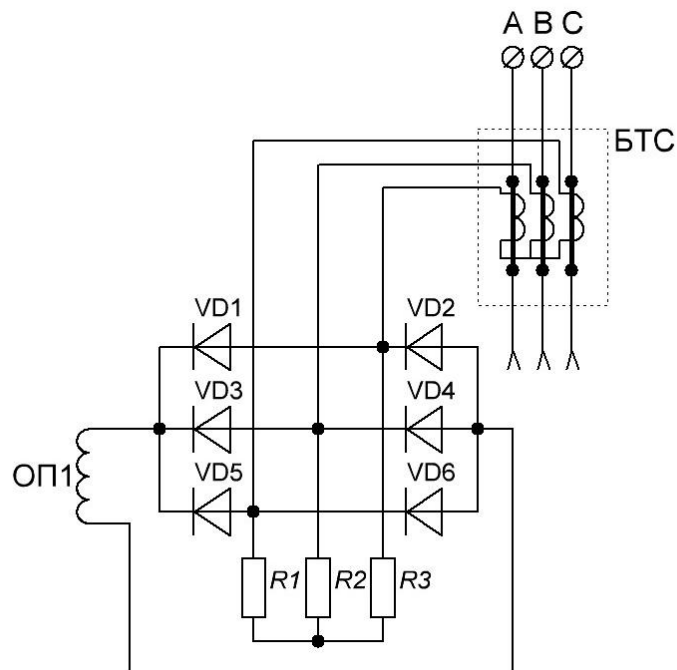


Рис. 3.8. Схема електрична принципова каналу регулювання напруги підмагнічування трансформатора

Регулювання напруги через ОП1 відбувається наступним чином. При зміні сили струму в якорі синхронного генератора СГ змінюється сила струму в обмотці підмагнічування ОП1, внаслідок чого **ЗМІНІТЬСЯ** напруга на виході АТР і напруга живлення АП. Канал регулювання напруги включає в себе: блок трансформаторів струму БТС, випрямляч, який побудований на діодах VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6 і навантажувальні опори R1, R2, R3.

Оскільки один канал системи регулювання обмоток підмагнічування не може забезпечити підтримання напруги АТР з необхідною точністю, **ТОМУ** одночасно застосовується корекція напруги СГ. Коректор напруги (рис. 3.9), або вимірювач частоти, складається з коливального контуру L, C і діодного випрямляча.

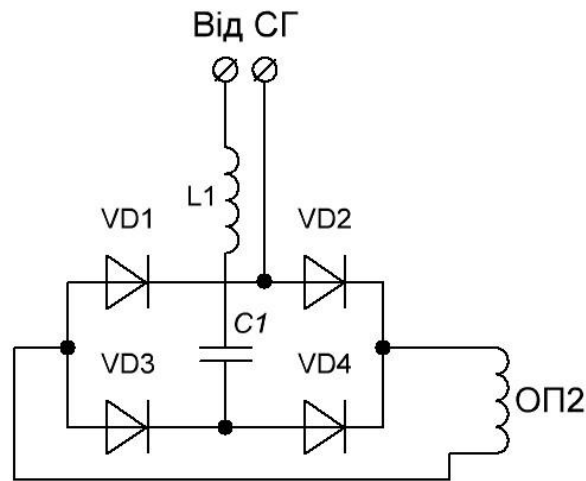


Рис. 3.9. Схема електрична принципова регулятора напруги за допомогою резонансного коливального контуру

Автотрансформатор РН регулюється від обмотки підмагнічування 10, яка в свою чергу живиться від РН2 і обмотки ОП2. Обмотка ОП2 підключена до фаз синхронного генератора через резонансний контур  $L1$ ,  $C1$  і напівпровідниковий випрямляч, побудований на діодах  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$  і  $VD4$ .

Принцип регулювання частоти за допомогою резонансного контуру полягає в наступному. Резонансний контур налаштовується таким чином, щоб резонансна частота була на 10-25% нижче робочої. При незмінній напрузі генератора і підвищенні частоти зменшується струм в обмотці підмагнічування ОП2, тим самим зменшується сила підмагнічування трансформатора. Така схема регулювання частоти дозволяє отримати точність стабілізації частоти порядку  $\pm 1\%$ .

Параметри регулюючого автотрансформатора РН: вхідна напруга  $U_{\phi 1/L1} = 120/208$  В, вихідна напруга  $U_{\phi 2} = 90 \dots 115$  В, потужність 15 кВА, частота живлення 400 Гц, номінальний струм 60 А.

Потужність трансформатора, яку він споживає, при номінальному навантаженні розраховуємо по формулі:

$$S_1 = \frac{S_2 \cdot \cos \varphi_2}{n_n \cdot \cos \varphi_1} = \frac{15 \cdot 1}{0,9 \cdot 0,95} = 17,5 \text{ кВА.} \quad (3.63)$$

Радіальні розміри витого циліндричного магнітопроводу з трьома радіальними прямокутними пазами і зубцями на кожному торці середньої частини магнітопроводу знаходиться за наступними формулами:

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{\frac{zS_1 \cdot 10^7}{2,54\kappa_e f B_3 A_{1\text{cp}}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 17,5 \cdot 10^7}{2,54 \cdot 1,2 \cdot 400 \cdot 1,6 \cdot 300}} = 9,6 \text{ см}, \quad (3.64)$$

де  $z$  – кількість зубців на одному торці середньої частини магнітопроводу;

$\kappa_\phi$  – коефіцієнт, що враховує втрати напруги в фазах обмотки;

Зовнішній і внутрішній діаметр магнітопроводу розраховується по формулі:

$$D_3 = 1,25 \cdot D_{\text{cp}} = 1,25 \cdot 9,6 = 12 \text{ см}; \quad (3.65)$$

$$D_B = 0,6 \cdot D_3 = 0,6 \cdot 12 = 7,2 \text{ см}. \quad (3.66)$$

Радіальний розмір ярма та ширина пазу розраховується як:

$$h_{\text{я}} = \frac{D_3 - D_B}{2} = \frac{12 - 7,2}{2} = 2,4 \text{ см}; \quad (3.67)$$

$$b_{\text{п}} = b_{3,\text{cp}} = 0,523 \cdot D_{\text{cp}} = 0,523 \cdot 9,6 = 5 \text{ см}. \quad (3.68)$$

Площу поперечного перерізу зубця та ярма, при  $B_{\text{я}} = B_3$ , знаходимо як:

$$q_3 = b_{3,\text{cp}} \cdot h_{\text{я}} = 5 \cdot 2,4 = 12 \text{ см}^2; \quad (3.69)$$

$$q_{\text{я}} = 0,5 \cdot q_3 = 0,5 \cdot 12 = 6 \text{ см}^2. \quad (3.70)$$

Осьова довжина ярма розраховується з формули:

$$l_{\text{я}} = \frac{q_{\text{я}}}{h_{\text{я}}} = \frac{6}{2,4} = 2,5 \text{ см}. \quad (3.71)$$

Максимальна величина магнітного потоку в зубці визначається по формулі:

$$\begin{aligned} \Phi_{3\text{ max}} &= 0,93 \cdot q_3 \cdot B_{3\text{ max}} \cdot 10^{-4} = 0,93 \cdot 12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = \\ &= 17,85 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}. \end{aligned} \quad (3.72)$$

Число витків в першій частині фази обмотки 2 та величина струму в обмотці розраховуємо за формулами:

$$w_2 = \frac{k_{e1} \cdot U_{1\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{3 \max}} = \frac{0,8 \cdot 120 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 400 \cdot 17,85} = 30; \quad (3.73)$$

$$I_1 = \frac{S_1 \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\phi}} = \frac{17,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 120} = 48,6 \text{ A}. \quad (3.74)$$

Переріз проводу обмотки 2 при щільності струму  $j = 8 \text{ A/мм}^2$  знаходимо по формулі:

$$q_2 = \frac{I_1}{j_1} = \frac{48,6}{8} = 6 \text{ мм}^2. \quad (3.75)$$

Глибина пазу на лівому торці середнього циліндра магнітопроводу, необхідна для розміщення двох сторін котушок обмотки 2 розраховується як:

$$h_2 = \frac{2 \cdot w_2 \cdot q_2}{k_3 \cdot b_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 6}{0,55 \cdot 50} = 13 \text{ мм}. \quad (3.76)$$

Сила намагнічування струмів трифазної обмотки 2 і обмотки підмагнічування 11 розраховується по формулах:

$$F_2 = 0,9 \cdot m \cdot w_2 \cdot I_1 = 0,9 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 48,6 = 3937 \text{ A}; \quad (3.77)$$

$$F_{11} = 2,2 \cdot F_2 = 2,2 \cdot 4461 = 8661 \text{ A}. \quad (3.78)$$

Число витків в обмотці 11 і в котушці розраховується за формулами:

$$w_{11} = \frac{F_{11}}{I_{11}} = \frac{8661}{15} = 576; \quad (3.79)$$

$$w_{K11} = \frac{w_{11}}{z} = \frac{576}{3} = 192. \quad (3.80)$$

Переріз проводу обмотки підмагнічування 11 при щільності струму  $j = 8$  А/мм<sup>2</sup> знаходимо по формулі:

$$q_{11} = \frac{I_{11}}{j_{11}} = \frac{15}{8} = 1,875 \text{ мм}^2. \quad (3.81)$$

Глибина пазу, необхідна для розміщення однієї сторони котушки обмотки 11, розраховується як:

$$h_{11} = \frac{w_{k11} \cdot q_{11}}{k_3 \cdot b_{\Pi}} = \frac{192 \cdot 1,875}{0,55 \cdot 50} = 13 \text{ мм}. \quad (3.82)$$

Загальна глибина на лівому торці середньої частини магнітопроводу з врахуванням 1 мм, необхідного для маловиткової обмотки 3, розраховується як:

$$h_{\Pi 1} = h_2 + h_{11} + h_3 = 13 + 13 + 1 = 27 \text{ мм}. \quad (3.83)$$

ЕРС, яка індукована в обмотці підмагнічування 11 магнітним потоком в ярмі розраховується як:

$$\Phi_{\text{я}} = 0,5 \cdot \Phi_{3 \text{ max}} = 8,925 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}; \quad (3.84)$$

$$E_{k11} = 4,44 \cdot w_{k11} \cdot f \cdot \Phi_{3 \text{ max}} = 4,44 \cdot 192 \cdot 400 \cdot 8,925 \cdot 10^{-4} = 304 \text{ В}. \quad (3.85)$$

Число витків в фазі вторинної обмотки 5, також є одночасно і частиною первинної обмотки автотрансформатора і розраховуються як:

$$w_5 = \frac{k_e \cdot U_{1\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{3 \text{ max}}} = \frac{0,8 \cdot 120 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 400 \cdot 17,85} = 30. \quad (3.86)$$

Величина струму в більшій частині обмотки 5 і між нулем і відпайкою дорівнює:

$$|\dot{I}_1 + \dot{I}_2| = 0,25 \cdot I_1 = 12,15 \text{ A}; \quad (3.87)$$

$$|\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3| = 0,6 \cdot I_2 = 26 \text{ A}. \quad (3.88)$$

Для спрощення намотки, переріз проводу обох частин обмотки 5 приймають однаковими. Переріз проводу обмотки 5 та глибина пазу, необхідна для розміщення двох сторін котушок обмотки 5, складає:

$$q_5 = 0,25 \cdot q_2 = 1,5 \text{ мм}^2; \quad (3.89)$$

$$h_5 = \frac{2 \cdot w_5 \cdot q_5}{k_3 \cdot b_{\Pi}} = \frac{30 \cdot 1,5}{0,55 \cdot 50} = 3,27 \text{ мм}. \quad (3.90)$$

Число витків в фазі вольтодобавної обмотки та величина струму в фазі обмотки розраховуються як:

$$w_6 = 0,15 \cdot w_5 = 0,15 \cdot 30 = 5; \quad (3.91)$$

$$I_6 = I_2 = \frac{S_2 \cdot 10^3}{3 \cdot U_{2\phi}} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 115} = 43,5 \text{ A}. \quad (3.92)$$

Переріз проводу обмотки 6 та глибина пазу, необхідна для розміщення двох сторін котушок обмотки 6, розраховується як:

$$q_6 = \frac{I_6}{j_6} = \frac{43,5}{8} = 5,437 \text{ мм}^2; \quad (3.93)$$

$$h_6 = \frac{2 \cdot w_6 \cdot q_6}{k_3 \cdot b_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 5,437}{0,55 \cdot 50} = 2 \text{ мм}. \quad (3.94)$$

СН струмів обмоток 5 і 6 з урахуванням збільшення сили струму в частині обмотки 5 між відпайками, від яких живиться РН1, число витків яких складає  $w_{\text{від}} = 0,08 \cdot w_5 = 3$ , розраховується як:

$$F_{5,6} = 0,9 \cdot 3 [0,25 \cdot I_1 (w_5 - w_{\text{від}}) + 0,6 \cdot I_2 \cdot w_{\text{від}} + I_2 \cdot w_6] = 2,7 \times (328,05 + 78 + 217,5) = 1684 \text{ A.} \quad (3.95)$$

Сила намагнічування обмотки підмагнічування 10 розраховується як:

$$F_{10} = 2,2 \cdot F_{5,6} = 2,2 \cdot 4461 = 3704 \text{ A.} \quad (3.96)$$

Число витків в обмотці 10 і в одній котушці при струмі  $I_{10} = 10 \text{ A}$  розраховуються як:

$$w_{10} = \frac{F_{10}}{I_{10}} = \frac{3704}{10} = 372; \quad (3.97)$$

$$w_{\text{к}10} = \frac{w_{10}}{3} = \frac{372}{3} = 124. \quad (3.98)$$

Переріз проводу обмотки підмагнічування 10 та глибину пазу, необхідну для розміщення однієї сторони котушки обмотки 10, знаходимо по формулах:

$$q_{10} = \frac{I_{10}}{j_{10}} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ мм}^2; \quad (3.99)$$

$$h_{10} = \frac{w_{\text{к}10} \cdot q_{10}}{k_3 \cdot b_{\text{п}}} = \frac{124 \cdot 1,25}{0,55 \cdot 50} = 5,64 \text{ мм.} \quad (3.100)$$

Загальна глибина на правому торці середньої частини магнітопроводу розраховується як:

$$h_{\text{п}2} = h_5 + h_6 + h_{10} = 3,27 + 2 + 5,64 = 10,9 \text{ мм.} \quad (3.101)$$

Середня довжина витка обмотки 10 розраховується з формули:

$$l_{\text{ср}10} = 2 \cdot (h_{\text{я}} + l_{\text{я}} + 2 \cdot h_{10}) = 2 \cdot 6 = 12 \text{ см.} \quad (3.102)$$

Опір обмотки підмагнічування 10 при  $T = 90^0 \text{ C}$  і падіння напруги в обмотці розраховується як:

$$R_{10} = \frac{w_{10} \cdot l_{cp10} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_{10}} = \frac{372 \cdot 12 \cdot 1,28}{5700 \cdot 1,25} = 0,8 \text{ Ом}; \quad (3.103)$$

$$U_{п10} = I_{10} \cdot R_{10} = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ В}. \quad (3.104)$$

Напруга фази і величина струму маловиткової обмотки 3, з'єднаної по схемі "зірка", розраховується з формул:

$$U_{\phi 3} = \frac{U_{п10}}{1,28 \cdot \sqrt{3}} = \frac{8}{1,28 \cdot 1,73} = 3,6 \text{ В}; \quad (3.105)$$

$$I_3 = 0,78 \cdot I_{10} = 0,78 \cdot 10 = 7,8 \text{ А}. \quad (3.106)$$

Переріз проводу та число витків обмотки 3 розраховується як:

$$q_3 = \frac{I_3}{j_3} = \frac{7,8}{8} = 0,975 \text{ мм}^2; \quad (3.107)$$

$$w_3 = \frac{1,15 \cdot U_{\phi 3}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{3 \max}} = \frac{1,15 \cdot 3,6 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 400 \cdot 17,85} = 2. \quad (3.108)$$

Середня довжина витка обмотки 3 та глибина пазу розраховується як:

$$l_{cp3} = \frac{3,14 \cdot (D_3 + D_B)}{3 + 2 \cdot h_{я} + b_{п}} = \frac{3,14 \cdot 19,2}{12,8} = 47 \text{ см}; \quad (3.109)$$

$$h_3 = \frac{2 \cdot w_3 \cdot q_3}{k_3 \cdot b_{п}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,975}{0,55 \cdot 50} = 0,15 \text{ мм}. \quad (3.110)$$

Значення 0,15 мм значно менше 1 мм, який раніше ми враховували в формулі (3.83).

Опір фази обмотки 3 та середня довжина витка обмотки 11 розраховується як:

$$R_{\phi 3} = \frac{w_3 \cdot l_{cp3} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_3} = \frac{2 \cdot 47 \cdot 1,28}{5700 \cdot 0,975} = 0,022 \text{ Ом}; \quad (3.111)$$

$$l_{cp11} = 2 \cdot (h_{я} + l_{я} + 2 \cdot h_{11}) = 2 \cdot 7,5 = 15 \text{ см}. \quad (3.112)$$

Опір, максимальна напруга обмотки підмагнічування та втрати потужності в обмотці підмагнічування 11 розраховується по формулам:

$$R_{11} = \frac{w_{11} \cdot l_{cp11} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_{11}} = \frac{576 \cdot 15 \cdot 1,28}{5700 \cdot 1,875} = 1 \text{ Ом}; \quad (3.113)$$

$$U_{п11} = I_{11} \cdot R_{11} = 15 \cdot 1 = 15 \text{ В}; \quad (3.114)$$

$$\Delta P_{11} = I_{11} \cdot U_{п11} = 15 \cdot 15 = 225 \text{ Вт}. \quad (3.115)$$

Величина фазної напруги на відпайках та число витків між точками і відпайками фаз обмотки 5 знаходимо за формулами:

$$U_{\phi.від} = \frac{U_{11} + \Delta U_{пн \min}}{1,28 \cdot \sqrt{3}} = \frac{15 + 3}{1,28 \cdot 1,73} = 8,1 \text{ В}; \quad (3.116)$$

$$w_{від} = \frac{w_5 \cdot U_{\phi.від}}{U_{\phi 5 \max}} = \frac{30 \cdot 8,1}{115} = 2. \quad (3.117)$$

Середні довжини витків обмоток 2 і 5:

$$l_{cp2} = \frac{3,14 \cdot (D_3 + D_B - 0,5 \cdot b_{п})}{3 + 2 \cdot h_{я}} = \frac{3,14 \cdot 19,2}{12,8} = 67 \text{ см}; \quad (3.118)$$

$$l_{cp5} = 0,9 \cdot l_{cp2} = 0,9 \cdot 67 = 60 \text{ см}. \quad (3.119)$$

Активний опір фази обмотки 2 і частин фази обмотки 5 та опір частини обмотки 5 від нульової точки до відпайки розраховується як:

$$R_2 = \frac{w_2 \cdot l_{cp2} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_2} = \frac{30 \cdot 67 \cdot 1,28}{5700 \cdot 6} = 0,075 \text{ Ом}; \quad (3.120)$$

$$R_5 = \frac{(w_5 - w_{від}) \cdot l_{cp5} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_5} = \frac{28 \cdot 60 \cdot 1,28}{5700 \cdot 1,5} = 0,252 \text{ Ом}; \quad (3.121)$$

$$R_{від} = \frac{w_{від} \cdot l_{cp5} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_5} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 1,28}{5700 \cdot 1,5} = 0,018 \text{ Ом}. \quad (3.122)$$

Втрати потужності в обмотках 2 і 5 розраховуються з формул:

$$\Delta P_2 = m \cdot I_1^2 \cdot R_2 = 3 \cdot 48,6^2 \cdot 0,075 = 531 \text{ Вт}; \quad (3.123)$$

$$\Delta P_5 = m \cdot (0,25 \cdot I_1)^2 \cdot R_5 + (0,6 \cdot I_2)^2 \cdot R_{\text{від}} = 124 \text{ Вт}. \quad (3.124)$$

Середня довжина витка, опір фази та втрата потужності в вольтодобавній обмотці 6 розраховуємо по формулах:

$$l_{\text{ср6}} = \frac{3,14 \cdot (D_3 + D_B)}{3 + 2 \cdot h_{\text{я}} + b_{\text{п}}} = \frac{3,14 \cdot 19,2}{12,8} = 47 \text{ см}; \quad (3.125)$$

$$R_6 = \frac{w_6 \cdot l_{\text{ср6}} \cdot 1,28}{5700 \cdot q_6} = \frac{5 \cdot 47 \cdot 1,28}{5700 \cdot 5,437} = 0,01 \text{ Ом}; \quad (3.126)$$

$$\Delta P_6 = m \cdot I_2^2 \cdot R_6 = 3 \cdot 43,5^2 \cdot 0,01 = 57 \text{ Вт}. \quad (3.127)$$

Маса та втрати потужності в сталі магнітопроводу:

$$\begin{aligned} M_{\text{ст}} &= [0,785(D_3^2 - D_B^2)3l_{\text{я}} + 3q_3(h_{\text{п1}} + h_{\text{п2}})] \cdot 0,93\gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} = \\ &= [0,785 \cdot (12^2 - 7,2^2) \cdot 3 \cdot 2,5 + 3 \cdot 12 \cdot (2,7 + 1,09)] \cdot 0,93 \cdot 7,65 \times \\ &\times 10^{-3} = 4,8 \text{ кг}; \end{aligned} \quad (3.128)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ст}} &= k_{\text{д}} \cdot p_{\text{уд}} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot M_{\text{ст}} = 1,8 \cdot 1,75 \cdot 1,6^2 \cdot \left(\frac{400}{50}\right)^{1,3} = \\ &= 578 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (3.129)$$

Оскільки номінальна напруга живлення АП складає 115 В, що становить максимальне значення вихідної напруги, магнітний потік, що індукує ЕРС в фазах обмоток 3 і 10, має доволі малі значення, тому струми і втрати потужності в фазах 3 і 10 є дуже малі і ними можна знехтувати [2].

Загальні втрати в обмотках і в сталі магнітопроводу:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P &= \Delta P_2 + \Delta P_5 + \Delta P_6 + \Delta P_{11} + \Delta P_{\text{ст}} = 531 + 124 + 57 + \\ &+ 225 + 578 \text{ Вт} = 1515 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (3.130)$$

ККД та коефіцієнт потужності на первинній стороні регулюючого АТР при номінальному навантаженні і при вихідній напрузі 115 В розраховуємо як:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{15000}{15000 + 1515} = 0,908; \quad (3.131)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_2 + \Sigma \Delta P}{S_1} = \frac{16515}{17500} = 0,944. \quad (3.132)$$

Отримані значення ККД та коефіцієнту потужності на первинній стороні регулюючого АТР дорівнюють значенням, вибраних на початку розрахунку, тому перерахунок потужності  $S_1$ , що споживається трансформатором, не потрібний.

Маса міді обмоток розраховуємо як:

$$M_{m2} = t\omega_2 l_{cp2} q_2 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 30 \cdot 67 \cdot 6 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3,22 \text{ кг}; \quad (3.133)$$

$$M_{m5} = t\omega_5 l_{cp5} q_5 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 30 \cdot 3,27 \cdot 60 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 1,57 \text{ кг}; \quad (3.134)$$

$$M_{m6} = t\omega_6 l_{cp6} q_6 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 5 \cdot 5,437 \cdot 47 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,341 \text{ кг}; \quad (3.135)$$

$$M_{m3} = t\omega_3 l_{cp3} q_3 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 3 \cdot 0,975 \cdot 47 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,037 \text{ кг}; \quad (3.136)$$

$$M_{m10} = \omega_{10} l_{cp10} q_{10} \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 372 \cdot 1,25 \cdot 12 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 0,497 \text{ кг}; \quad (3.137)$$

$$M_{m11} = \omega_{11} l_{cp11} q_{11} \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 576 \cdot 1,875 \cdot 15 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 1,44 \text{ кг}. \quad (3.138)$$

Загальна маса міді всіх обмоток і активних металів:

$$\Sigma M_m = M_{m2} + M_{m3} + M_{m5} + M_{m6} + M_{m10} + M_{m11} = 3,22 + 0,037 + 1,57 + 0,341 + 0,497 + 1,44 = 7,1 \text{ кг}; \quad (3.139)$$

$$\Sigma M_{акт} = \Sigma M_{ст} + \Sigma M_m = 4,8 + 7,1 = 11,9 \text{ кг}. \quad (3.140)$$

### 3.5. Висновок

При розробці САК ПГА особливу увагу було приділено основному функціональному елементу – ЕСУП, яка являється, мозковою складовою всієї системи керування. Застосування саме мікроконтролера, дало змогу отримати багатофункціональне керування, а саме: переключення ПГА з одного ступеня на інший; самодіагностика роботи МК; резервування МК шляхом застосування реле К0; діагностика рівня напруги живлення, яка є одним із основних критеріїв його надійної роботи. Для забезпечення останнього критерію був використаний ключовий понижуючий перетворювач з ШІМ модуляцією, який має досить високий показник ККД і низький рівень пульсацій вихідної напруги.

В якості джерел живлення для ТВП і РН було застосовано регулюючі автотрансформатори. Їх переваги полягають в високому ККД, якісній вихідній напрузі та здатності регулювати вихідну напругу в широкому діапазоні. Але слід також згадати і про недоліки, а саме відносно велика маса таких типів трансформаторів. Незважаючи на це, застосування в якості РН АТР є більш доцільно, чим використання тиристорної схеми керування, оскільки остання має конструктивну складність, високу вартість та наявність ряду високих гармонік, які мають негативний вплив на джерело живлення. Один із варіантів зниження питомої маси металів і маси АТР в цілому – об'єднання двох АТР ТВП і РН в один автотрансформатор.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ САК ПГА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

#### **4.1. Розрахунок показників надійності САК ПГА**

Однією з умов високої ефективності функціонування системи генерування ЕЕ є забезпечення високої надійності роботи привід-генераторного агрегату та його системи автоматичного керування. Розрахунок надійності розробленої системи керування буде виконано з використанням середніх значень інтенсивності відмов її основних функціональних елементів. Значення інтенсивності відмов

дозволяє оцінити ймовірність безвідмовної роботи системи, та окремих її функціональних елементів. Величина ймовірності безвідмовної роботи також надає відомості про ймовірність безвідмовної роботи блоків у визначені проміжки часу.

Одним з кількісним показників, що дозволяють безпосередньо оцінити надійність роботи елементів роботи системи, є середнє напрацювання до відмови кожного функціонального елементу. Середні значення інтенсивності відмов і кількість використаних елементів представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Назва елементу	Кількість	Інтенсивність відмов $\lambda_{\text{д}}^{\text{е}} \cdot 10^6 \text{ год}^{-1}$
Багатошарові друковані плати	5	0,005
Діоди випрямні	30	0,017
З'єднання пайкою	200	0,002
Інтегральні цифрові мікросхеми	2	0,214
Інтегральні стабілізатори напруги	1	0,18

Таблиця 4.1. Продовження

Котушки індуктивності	2	0,08
Кнопка	1	0,12
Конденсатори керамічні	6	0,014
Конденсатори електролітичні	5	0,03
Контакти перемикачів	3	0,01
Резистори постійні	24	0,01
Реле електромагнітні герметичні	3	0,25
Стабілітрони	3	0,004
Транзистори біполярні	3	0,06
Трансформатор ТВП і РН	2	1,04

Загальна інтенсивність відмов системи автоматичного керування розраховується по формулі:

$$\lambda = \sum_{i=1}^k n_i \cdot \lambda_i = 4,819 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.} \quad (4.1)$$

де  $n_i$  – кількість елементів одного типу;

$\lambda_i$  – інтенсивність відмов.

Час напрацювання на відмову знаходимо за формулою:

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4,819 \cdot 10^{-6}} = 2,075 \cdot 10^5 \quad (4.2)$$

Для оцінки ймовірність безвідмовної роботи блоків у визначені проміжки часу, отримані розрахунки були обчислені по різних проміжках часу і занесені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Час напрацювання	Ймовірність P(t)	Час напрацювання	Ймовірність P(t)
0	1	3200	0,926
200	0,995	6400	0,857
400	0,99	12800	0,735
800	0,981	25600	0,54
1600	0,962	51200	0,291

По отриманим результатам розрахунків був побудований графік (рис. 4.1), який характеризує ймовірність безвідмовної роботи спроектованої системи автоматичного керування привід-генераторним агрегатом. Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що система має достатньо високий показник

безвідмовної роботи, а саме час напрацювання до відмови становить 207500 год. Також слід зауважити, що такий показник надійності є на порядок вищий, чим в існуючій системі керування приводом СГ, яка базується на гідромеханічному принципі. Використання сучасної бази електронних компонентів та елементів і розробка систем керування на їх основі, дає змогу отримувати показники надійності в рази вищі, чим існуючі на даний час для літакових систем генерування електроенергії.

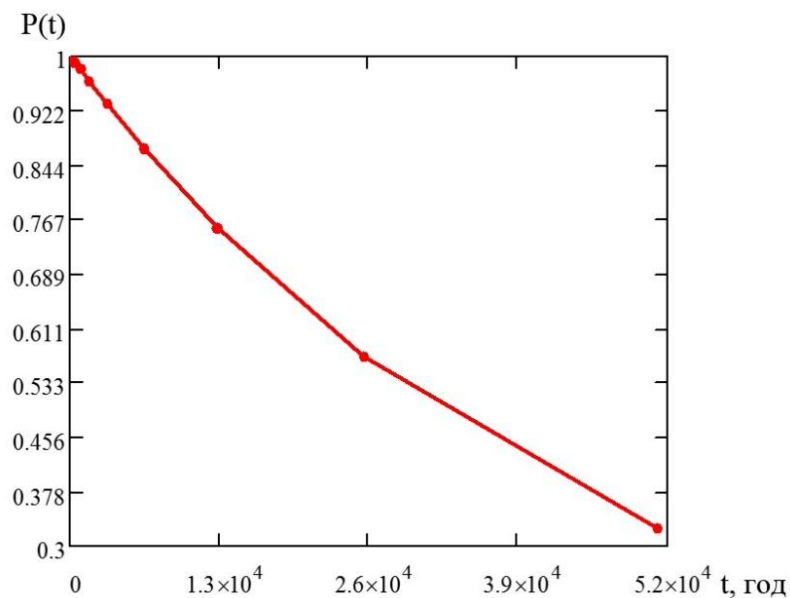


Рис. 4.1. Ймовірність безвідмовної роботи автоматичної системи керування ПГА

#### **4.2. Особливості застосування асинхронного тахогенератора в системі автоматичного керування ПГА**

Для забезпечення роботи системи автоматичного керування необхідно отримувати дані про частоту обертання авіаційного двигуна. В системі автоматичного керування ПГА асинхронний тахогенератор виконує функцію інформаційного елемента, вихідна напруга якого лінійно залежить від частоти обертання ротора при незмінному здвигу фаз між напругою збудження  $U_z$  та вихідною напругою  $U_{вих}$ . Використання такого типу тахогенератора є більш доцільним, оскільки, на відміну від ТГ постійного струму, в асинхронних ТГ відсутні ковзаючі контакти, тобто вони є безконтактними. Це дає змогу збільшити їх експлуатаційну надійність і стабільність вихідної характеристики. Одними із

недоліків такого типу ТГ є більші габарити та відносно мала номінальна частота обертання, яка становить зазвичай до 6000 об/хв, в цей час як ТГ на постійних магнітах здатні розвивати частоту обертання порядку 15000 об/хв.

В системі автоматичного керування ПГА в якості ТГ застосовано асинхронний однофазний тахогенератор з пологим немагнітним ротором, марки АТ-161. Його технічні характеристики наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Параметр	Значення параметру
Напруга збудження	115 В
Частота напруги збудження	400 Гц
Струм збудження тахогенератора	150 мА
Номінальна частота обертання	4000 об/хв
Крутизна вихідної напруги	4 мВ/об/хв
Залишкова ЕРС тахогенератора	80 мВ
Нелінійність вихідної напруги	0,15%
Діапазон робочих температур	– 40 <sup>0</sup> С до + 50 <sup>0</sup> С
Маса тахогенератора	0,89 кг

Вихідна однофазна напруга змінного струму від тахогенератора поступає на діодний випрямляч ВП1, який побудований на 4 діодах. При розрахунку вихідної напруги від ТГ слід врахувати падіння напруги них.

Оскільки частота обертів СГ сягає порядку 14000 об/хв, а номінальна частота обертання тахогенератора 4000 об/хв, доцільно застосувати перед вхідним валом ТГ понижуючий редуктор, з коефіцієнтом редукції 3,75. Значення частоти

обертання АД і відповідно її частоти обертання ТГ, а також вихідна напруга ТГ і випрямляча ВП1 наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Частота обертання АД	Частота обертання ТГ	Вихідна напруга ТГ	Вихідна напруга ВП1
2773	739	2,956	1,756
3563	950	3,8	2,483
5440	1450	5,8	4,234
6994	1865	7,46	5,7
8107	2162	8,648	6,765
10420	2779	11,116	8,975
13400	3573	14,292	11,83

При розрахунку лінійної залежності вихідної напруги ТГ від частоти обертання АД, нелінійністю вихідної напруги, яка складає 0,15 %, а також температурним коефіцієнтом вихідної напруги, який становить при 20<sup>0</sup> С 1,6 %, можна знехтувати, оскільки їхні значення відносно малі.

Оскільки, для забезпечення високої якості генеруючої ЕЕ застосовано триступінчастий ПГА, тому дані про залежність частоти обертання АД і вихідної напруги з ВП1 занесені в програму МК, а перемикання між ступенями відбувається при 5440 об/хв (частота ввімкнення 3 ступені), що відповідає 4,234 В, 6994 об/хв (частота ввімкнення 4 ступені), що відповідає 5,7 В та 10420 об/хв (частота ввімкнення 6 ступені), що відповідає 8,975 В. При частоті обертання ТГ нижче 739 об/хв або вище 3573 об/хв, з порту МК видається сигнал про несправність тахогенератора.

#### **4.3. Особливості застосування функціональних елементів САК ПГА**

Застосування МК в ЕСУП схеми автоматичного керування привод-генераторного агрегату дає ряд переваг на противагу схемам, побудованих на транзисторних ключах, компараторах, елементах логіки та аналогових мікросхем. До них можна віднести зниження маси і габаритів схем керування, підвищений рівень надійності і безвідмовної роботи, можливість забезпечення резервування системи, реалізована функція забезпечення діагностування системи, висока швидкість опрацювання отриманих даних і видача відповідних команд, можливість реалізації різноманітних алгоритмів управління без зміни структурних елементів системи. Одним із основних недоліків є необхідність живлення МК стабілізованою напругою.

Застосування блоку живлення для ЕСУП на мікросхемі MXL1074 має ряд переваг, а саме високі якісні і малогабаритні показники при відносно великій величині вихідного струму, великий діапазон вхідної напруги, достатньо високі показники надійності, низьке тепловиділення мікросхеми, а також низька собівартість. Одним із недоліків, в порівнянні з лінійними стабілізаторами напруги, є підвищений рівень шуму через пульсації при перемиканні і збільшення функціональних елементів для забезпечення нормальної роботи регулятора. MXL1074 – це регулятор перемикаючого типу на основі ключового принципу керування, а саме подача напруги порціями через низькоомний ключ на вихідний конденсатор, за рахунок чого на виході можливо отримати достатньо велике значення струму, при цьому виділення тепла є доволі низьким, а ККД складає порядку 95%.

Блок трансформаторів струму є датчиком величини навантаження на генератор 976J498-2 і призначений живлення обмотки підмагнічування ОП1 регулятора напруги РН1 автотрансформатора. Принцип роботи БТС полягає в вимірюванні значення величини сили струму в фазах генератора. Первинні обмотки трансформаторів розміщуються на силових фідерах генератора, а вторинні – під'єднані до діодного випрямляча регулятора напруги. При такому функціональному застосуванні БТС виконують функцію регуляторів напруги.

При розробці системи автоматичного керування ПГА виникли ряд проблем, пов'язаних із живленням ЕМК від АП. Це зумовлено тим, що контактна пара К2 повинна бути розміщена на валу АП, який обертається. Промислових зразків такого типу контакту на даний час не існує, у зв'язку з дуже вузькою сферою застосування. Було запропоновано спроектувати такий тип контактору наступним чином: обмотка реле контактора розміщується на статорі (корпусі) АП, а контактна пара розміщується на роторі. Принцип дії такого контактора аналогічний функціонуванню геркону. Під дією постійного магнітного поля, яке створюється котушкою на статорі АП, контактна група К2 замикається і відбувається чергування фаз в обмотці живлення ЕМК. Коли дія магнітного поля припиняється, контактна пара повертається в початкове положення. Такий тип контактору ще називають безконтактний перемикач.

#### **4.4. Висновок**

Проаналізувавши дані, отримані при розрахунку показників надійності можна стверджувати, що САК ПГА відповідає всім поставленим вимогам та стандартам і має досить високі показники безвідмовної роботи протягом усього терміну її експлуатації. Застосування мікропроцесорної техніки і сучасної бази електронних елементів дають змогу отримати показники такого рівня.

Застосування мікроконтролерів для керування САК має ряд переваг, основними з яких є універсальність, швидкодія, кращі показники надійності, застосування функції діагностики та інші. Все це дає змогу конкурентоспроможності таких схем керування, в порівнянні з схемами, де застосовуються інша база електронних компонентів. Багатофункціональність та універсальність МК, в першу чергу, була вибрана як основний критерій при проектуванні.

Використання інших функціональних елементів САК при розробці її електричної принципової схеми відбувалося виходячи з таких критеріїв як: конструктивна простота, висока надійність роботи, простота зв'язків всіх елементів між собою, а також конструктивні особливості кожного елемента.

## **РОЗДІЛ 5**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ**

#### **Вступ**

При розробці привід-генераторного агрегату для літака Boeing 737-500 необхідно дотримуватись певних заходів з охорони праці, так як в процесі проектування на суб'єкта впливає ряд небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Суб'єктом, в даному розділі, виступає інженер-проектувальник, який здійснює розробку технічної документації, а також, на основі проведених розрахунків, проектування основних елементів ПГА.

Інженер-проектувальник був обраний суб'єктом, оскільки саме він займається розробкою та проектуванням, і в процесі професійної діяльності якого відбувається вплив небезпечних та шкідливих факторів, в результаті яких можливе погіршення стану здоров'я, або повна чи часткова втрата працездатності.

Проаналізувавши вище викладену інформацію можна стверджувати, що необхідність розробки заходів з охорони праці полягає в наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів на робочому місці інженера-проектувальника, а також забезпеченні безпечних та нешкідливих умов його праці.

Робоче місце інженера-проектувальника розташоване в відділі розробок електроенергетичних установок, який знаходиться на другому поверсі конструкторського бюро.

#### **5.1. Опис робочого місця та умов праці інженера-проектувальника**

Відділ розробок електроенергетичних установок (рис. 5.1) обладнаний з розрахунку на шістьох інженерів-проектувальників. Розміри робочого приміщення становлять 6,0 м × 6,2 м, висота стелі складає 3,3 м.

У приміщенні використовується змішане освітлення. Стіни пофарбовані в світло-зелений колір, а підлога покрита світлим лінолеумом.

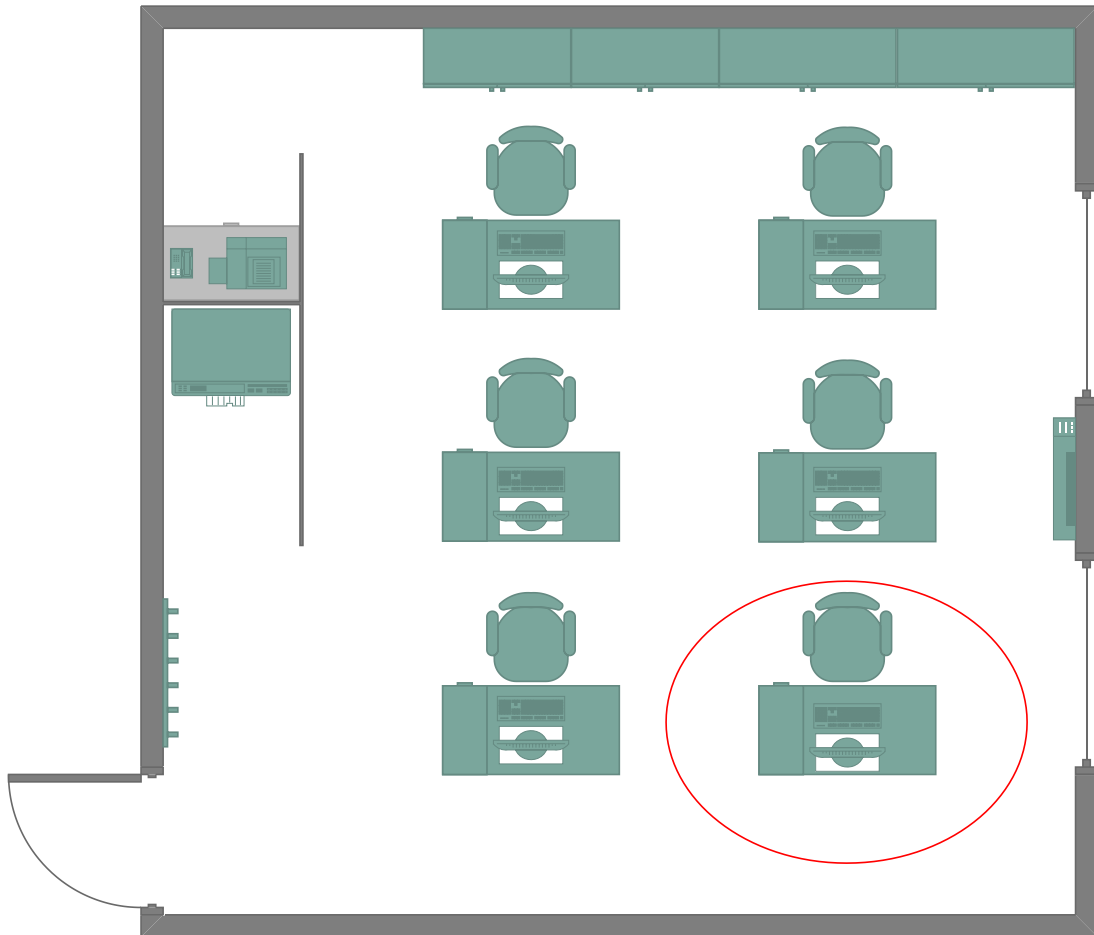


Рис. 5.1. Схема робочого місця інженера-проектувальника

Відповідно до НПАОП 0.00-1.28 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин», пункт 1.12 – площа на одне робоче місце має становити не менше ніж  $6,0 \text{ м}^2$ , а об'єм не менше ніж  $20,0 \text{ м}^3$ . Відділ розробок електроенергетичних установок має площу  $37,2 \text{ м}^2$  і об'єм  $122,7 \text{ м}^3$ , що становить  $6,2 \text{ м}^2$  і  $20,46 \text{ м}^3$  на одного інженера-проектувальника відповідно.

Основне робоче положення – положення сидячи. Робоче місце інженера-проектувальника обладнане письмовим столом  $600 \times 1200$  з багатофункціональною тумбою, персональним комп'ютером і кріслом. В відділі розробок

електроенергетичних установок також знаходяться дві шафи для особистих речей, дві шафи з технічною документацією, тумбочка, вішалка верхнього одягу, звукопоглинаюча перегородка, принтер, багатофункціональний пристрій (БФП), кондиціонер та стаціонарний телефон.

## **5.2. Перелік шкідливих та небезпечних факторів, що діють на інженера-проектувальника**

Проаналізувавши робоче місце інженера-проектувальника відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» можна перелічити такі шкідливі виробничі фактори:

1. Виробничий шум, ультразвук, інфразвук.
2. Мікроклімат: температура, вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання.
3. Неіонізуючі електромагнітні поля і випромінювання: електростатичні поля, постійні магнітні поля (в т. ч. геомагнітне), електричні і магнітні поля промислової частоти (50 Гц), електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, електромагнітні випромінювання оптичного діапазону (у т. ч. лазерне та ультрафіолетове).
4. Освітлення – природне (відсутність або недостатність), штучне (недостатня освітленість, пряма і відбита сліпуча близькість, пульсація освітленості).
5. Напруженість праці.

## **5.3. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів**

### **5.3.1. Аналіз виробничого шуму**

Державні санітарні норми ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» регламентують допустимі рівні шуму на

робочому місці. При цьому враховується характер роботи та умови технологічного процесу.

Основними джерелами шуму на робочому місці інженера-проектувальника є вентилятори системного блоку ПК, принтер, БФП та шум від кондиціонера.

Згідно з допустимими рівнями звукового тиску на робочих місцях, які приведені в ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку», робоче місце інженера відноситься до категорії робочих місць у приміщеннях проектно-конструкторських бюро, де рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБ.

Рівень шуму від джерел на робочому місці складає: жорсткий диск ПК – 30 дБ, вентилятори системи охолодження ПК – 50 дБ, принтер – 54 дБ, БФП – 62 дБ, шум від внутрішнього блоку кондиціонера – 30 дБ.

За наявності декількох джерел шуму з однаковим рівнем інтенсивності, загальний рівень шуму, для шести системних блоків ПК, визначають за формулою:

$$L_{\text{сер}} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i} = 10 \log(10^{5,0} + 10^{3,0}) = 50 \text{ дБ}, \quad (5.1)$$

де  $L_i$  – рівень звукового тиску  $i$ -го джерел шуму,

$n$  – кількість джерел шуму.

$$L = L_{\text{сер}} + 10 \log n = 50 + 10 \log 6 = 58 \text{ дБ}; \quad (5.2)$$

Рівень шуму, що виникає від декількох некогерентних джерел, що працюють одночасно, розраховуємо по формулі:

$$L_{\text{сер}} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_i} = 10 \cdot \log(10^{5,8} + 10^{3,0} + 10^{5,4} + 10^{6,2}) = 64 \text{ дБ}, \quad (5.3)$$

По отриманим результатам можна зробити висновок, що фактичний рівень шуму складає 64 дБ, що перевищує допустиме значення рівня шуму 50 дБ.

### 5.3.2. Аналіз мікроклімату робочої зони

Державні санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» регламентують вимоги мікроклімату виробничих приміщень. Для робочої зони виробничих приміщень встановлюються оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови з урахуванням важкості виконуваної роботи та періоду року. Робота інженера-проектувальника належить до Іа категорії легких фізичних робіт, що виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження.

В табл. 5.1 наведені оптимальні та допустимі значення параметрів мікроклімату для різних періодів року відповідно до Іа категорії роботи. Фактичні значення отримують шляхом вимірювання параметрів на робочому місці на висоті 0,5 – 1,0 м від підлоги – при роботі сидячи.

Таблиця 5.1

Значення	Температура повітря, ° С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Холодний період року			
Оптимальні	22-24	60-40	0,1
Допустимі	21-25	75	Не більше 0,1
Фактичні	20	78	0,2
Теплий період року			
Оптимальні	23-25	60-40	0,1
Допустимі	22-28	55 при 28° С	0,2-0,1
Фактичні	29	35	0,2

Відділ розробок електроенергетичних установок, де розміщена комп'ютерна техніка та периферія, обладнані системою кондиціонування повітря, вентиляцією та системою опалення. За допомогою цих засобів здійснюється регулювання і підтримання параметрів мікроклімату приміщення.

Система кондиціонування включає в себе кондиціонер, з функціями іонізації, підігріву, осушення, охолодження, очистки повітря та ефективною площею роботи  $40 \text{ м}^2$ , що дає змогу контролювати мікроклімат всієї площі приміщення.

В даному приміщенні теплове опромінення працюючих, що надходить від освітлювальних приладів не перевищує  $35 \text{ Вт/м}^2$  при опроміненні 50% і більше поверхні тіла,  $70 \text{ Вт/м}^2$  при опроміненні від 25 до 50% поверхні тіла і  $100 \text{ Вт/м}^2$  – при опроміненні до 25% поверхні тіла людини.

### **5.3.3. Аналіз впливу електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону**

ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів» встановлюють вимоги до умов праці працівників, що займаються розробкою та проектуванням, на яких мають вплив електромагнітні випромінювання (ЕМВ) радіочастотного діапазону.

Джерелами електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону в відділі розробок електроенергетичних установок є системні блоки персональних комп'ютерів, безпроводні миші та клавіатури ПК, радіотелефон, принтер і БФП з функцією безпроводного зв'язку та мережеві Wi-Fi маршрутизатори.

Граничнодопустимі рівні неіонізуючого випромінювання радіочастотного діапазону при восьми годинному робочому дні наведені в табл. 5.2.  $E_{гд}$  і  $H_{гд}$  – граничнодопустимі значення напруженості електричного (В/м) та магнітного (А/м) полів.  $EHE_{гд}$  і  $EH_{гд}$  – граничнодопустимі значення енергетичного навантаження протягом робочого дня  $(\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$  та  $(\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$ .

Таблиця 5.2

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот		
	0,6 – 3 МГц	3 – 30 МГц	30-300 МГц
$E_{гд}$ , В/м	500	300	80

$E_{гд}, (В/м)^2 \cdot год$	20000	7000	800
$H_{гд}, А/м$	50	-	3,0
$E H_{гд}, (А/м)^2 \cdot год$	200	-	0,72
$E_{гд}$ для 8 годинного робочого дня, В/м	50	30	10
$H_{гд}, А/м$	5,0	-	0,30

Фактичними значеннями електромагнітного випромінювання радіочастото діапазону 0,6 – 3 МГц для  $E_{гд}$  становлять 41,3 В/м для восьми годинного робочого дня. Рівень напруженості магнітного поля  $H_{гд}$  складає 4,3 А/м. Фактичні значення в діапазоні 30-300 МГц становлять  $E_{гд}$  – 0,4 В/м і  $H_{гд}$  – 0,02 А/м.

Отримані нами значення є близькі до гранично допустимих, а отже, електромагнітне випромінювання і напруженість електромагнітного поля на робочому місці може викликати у працівника захворювання або відхилення у стані здоров'я при щоденній роботі. Для зменшення рівня випромінювання необхідно використовувати інженерно-технічні заходи, а саме екранування джерела випромінювання радіопоглинальними або радіовідбивними матеріалами.

#### **5.4. Розробка заходів з охорони праці**

Основними заходами боротьби з шумом є ослаблення або усунення джерела шуму та зменшення шуму на шляху його поширення. Такі заходи реалізуються шляхом раціонального проектування виробничих приміщень та робочих місць працівників, застосування малозумних технологічних процесів та устаткування, використання звукопоглинаючих засобів та екранів, розміщення комп'ютерної периферії та друкувальних пристроїв в інших спеціальних приміщеннях.

Зменшення виробничого шуму в самому джерелі – найбільш радикальний засіб боротьби з шумом, що створюється устаткуванням. В нашому випадку раціонально створення окремого приміщення – серверної, де будуть розміщені системні блоки ПК, а їх управління буде здійснюватися шляхом реалізації

дистанційних засобів і методів управління. Такі приміщення слід забезпечити звукопоглинаючим облицюванням, або звукопоглинаючими екранами.

Якщо здійснення такого роду засобів є неможливими, потрібно використовувати в процесі праці більш сучасні ПК, з пасивним, водяним та іншими типами охолодженням, що дає змогу на порядок зменшити рівень виробничого шуму. Усунення шуму від принтерів досягається шляхом використання сучасних лазерних принтерів з функцією пониження шуму при печатанні, а також принтерів колективного користування, які розміщуються на відстані від робочих місць.

### **5.5. Пожежна безпека**

НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні» встановлюють загальні вимоги з пожежної безпеки для виробничих приміщень.

Основними причинами виникнення пожежі в відділі проектування електроенергетичних установок є:

1. Несправності або коротке замикання електричної проводки.
2. Електричні елементи персональних комп'ютерів.

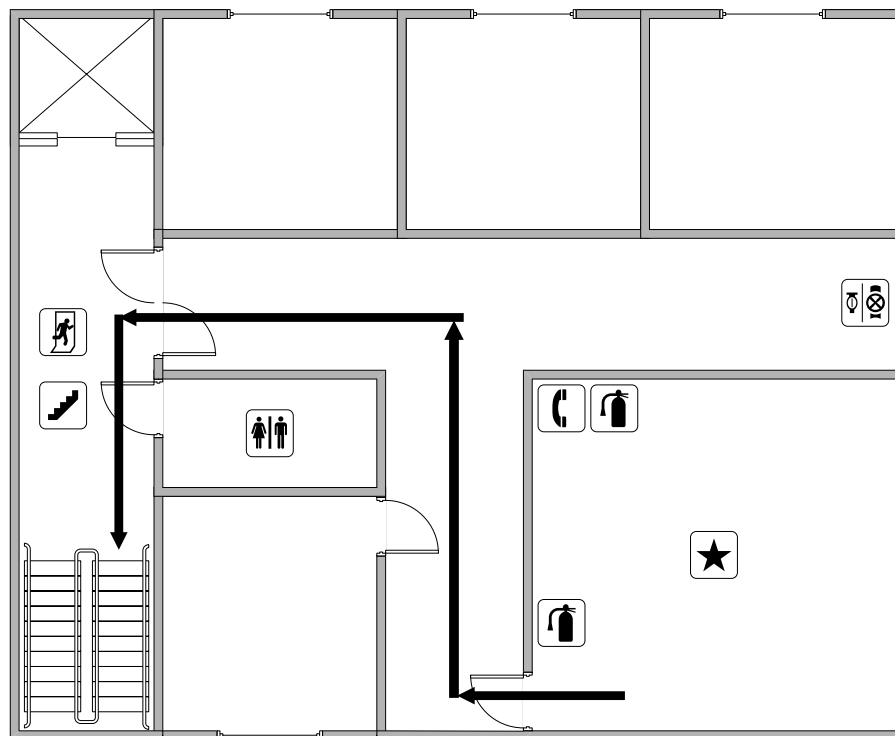
Дане приміщення відноситься до категорії “В” за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Приміщення оснащено системою автоматичної пожежної сигналізації з двома димовими сповіщувачами типу СПД-3.2, двома переносним вуглекислотним вогнегасником типу ВКК-2, з розрахунком один вогнегасник на три ЕОМ.

Димові сповіщувачі типу СПД-3.2 призначені для виявлення займань в закритих приміщеннях різних будівель і споруд, що супроводжуються появою диму і передачі на пульт сигналу “ПОЖЕЖА”. Датчики розміщуються на стелі, з розрахунком радіусу дії кожного 20 м<sup>2</sup>.

Згідно з НАПБ А.01.001-2004 “Правила пожежної безпеки в Україні” у приміщеннях встановлюються надійні засоби попереднього сповіщення небезпеки виникнення пожежі, засоби пожежогасіння та розміщуються схеми евакуації (рис. 5.2).

При виникненні пожежі, відповідно до плану евакуації, що зображений на рис. 5.2, відстань від робочого місця до сходової клітки становить 18 м. Евакуація здійснюється через вхідні двері, далі необхідно повернути на право і рухатися до кінця коридору. У кінці коридору потрібно повернути на ліво, пройти ще 5 м і повернути знову на ліво до виходу на сходову клітку. Спустившись сходами на перший поверх, необхідно рухатися до найближчого виходу з корпусу конструкторського бюро.

## ПЛАН ЕВАКУАЦІЇ НА ВИПАДОК ПОЖЕЖІ 2 (поверх)



### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

	- Вогнегасник ВКК-2		- Вихід
	- Пожежний кран		- Сходи
	- Ви знаходитесь тут		- Туалет
	- Телефон		- Евакуаційний шлях

Рис. 5.2. План евакуації з приміщення у випадку пожежі

### 5.6. Розрахунок звукоізоляційної перегородки

Оскільки принтер та БФП є джерелами з найбільшим рівнем шуму – 54 дБ і 62 дБ відповідно, доцільно зробити розрахунок для звукоізоляційної перегородки, яка буде розміщена в приміщенні відділу електроенергетичних установок, з шаром звукопоглинального матеріалу (ЗПМ).

Розрахунок проводиться у восьми октавних смугах частот. Загальна звукоізоляція перегородки з шаром звукопоглинального матеріалу (ЗПМ)  $R_c$  визначається за наступною формулою:

$$R_c = R + \Delta R, \quad (5.4)$$

де,  $R$  – звукоізоляція перегородки;

$\Delta R$  – додаткова звукоізоляція за рахунок шару ЗПМ, дБ визначається за формулою:

$$\Delta R = 8,7 \cdot \beta \cdot \delta + 20 \log \frac{m_n + m_{nc}}{m_n}, \quad (5.5)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт затухання, 1/м;

$\delta$  – товщина шару ЗПМ, м;

$m_n$  – поверхнева густина матеріалу перегородки, кг/м<sup>2</sup>;

$m_{nc}$  – поверхнева густина шару ЗПМ, кг/м<sup>2</sup> знаходиться за формулою:

$$m_{nc} = \rho \cdot \delta, \quad (5.6)$$

де  $\rho$  – об'ємна густина ЗПМ,  $\rho = 20$  кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  – товщина шару ЗПМ, м.

### Хід розрахунку

Розрахуємо поверхневу густина шару ЗПМ, взявши полотно із супертонкого скловолокна. Товщина шару складає 40 мм. Маємо наступне:

$$m_{nc} = 20 \cdot 0,04 = 0,8 \text{ (кг/м}^2\text{)}; \quad (5.7)$$

Знаходимо додаткову звукоізоляцію за рахунок шару ЗПМ, знаючи, що коефіцієнт затухання для полотна із супертонкого скловолокна складає 10 1/м, товщина 40 мм, поверхнева густина матеріалу перегородки (ДСП) – 15 кг/м<sup>2</sup>, а поверхнева густина шару ЗПМ складає 0,8 кг/м<sup>2</sup>:

$$\Delta R = 8,7 \cdot 10 \cdot 0,04 + 20 \lg \left( \frac{15 + 0,8}{15} \right) = 3,931 \text{ (дБ)}; \quad (5.8)$$

Розрахуємо загальну звукоізоляцію ДСП з шаром полотна із супертонкого скловолокна, якщо звукоізоляція перегородки (ДСП) дорівнює 25 дБ:

$$R_c = 25 + 3,931 = 28,931 \text{ (дБ)}; \quad (5.9)$$

Отже, загальна звукоізоляція ДСП з шаром полотна із супертонкого скловолокна складає 28,931 дБ.

### **Висновок**

Проаналізувавши робоче місце інженера-проектувальника, було виявлено ряд шкідливих та небезпечних факторів які діють на нього, а також запропоновано шляхи зменшення або усунення впливу цих факторів на нього.

Основним шкідливим фактором виявився шум, джерелами якого є принтер, БФП, системний блок персонального комп'ютера та внутрішній блок кондиціонера. Засоби по усунення джерел шуму були запропоновані шляхом використання звукоізоляційної перегородки ДСП з шаром звукопоглинального матеріалу, яка відмежовує принтер та БФУ від робочих місць інженерів-проектувальників. Застосування такої перегородки дала змогу знизити рівень шуму від принтера до 23 дБ, а рівень шуму від БФП до 33 дБ. Такий рівень шуму є значно нижче допустимого рівня шуму для конструкторських бюро, який складає 50 дБ.

## **РОЗДІЛ 6**

### **ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

#### **Вступ**

Застосування авіаційної техніки має суттєвий вплив на екологічну ситуацію, а саме на навколишнє середовище. Метою системи охорони навколишнього

середовища є забезпечення зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів, які виникають в процесі експлуатації авіаційної техніки та авіаційної діяльності в цілому.

Завдання даного розділу дипломного проекту полягає у визначенні небезпечних та шкідливих факторів в процесі експлуатації авіаційної техніки, а також розробки заходів та засобів, які зменшують чи усувають вплив цих факторів на навколишнє середовище.

Об'єктом даного розділу є привід-генераторний агрегат, а також радіолокаційне і радіонавігаційне обладнання. Система генерування електричної енергії ПС, її споживачі, радіонавігаційне та радіолокаційне обладнання являються джерелами неіонізуючих електромагнітних полів і випромінювання.

### **6.1. Електромагнітне випромінювання та його вплив на навколишнє природне середовище**

Інтенсивне використання електромагнітної та електричної енергії почалося з другої третини XX століття і сформувало новий суттєвий фактор забруднення навколишнього середовища – електромагнітний. Швидкий розвиток мікро- та нанотехнологій, сучасних технологій передачі інформації та енергії, поява нових видів технологічних процесів, призвели до виникнення такого роду забруднення. Серед джерел електромагнітних полів (ЕМП) розрізняють природні і штучні.

Останні, на думку світової громадськості, є важливим екологічним фактором з високою біологічною активністю.

Штучні джерела або антропогенні виникли в процесі науково-технічного розвитку людства. Сюди можна віднести: радіо-, телевізійні та радіолокаційні станції, прилади радіонавігації, повітряні високовольтні лінії електропередач, електричні підстанції, до яких входять розподільчі пристрої, перетворювачі

електроенергії, трансформатори, випрямлячі, електротранспорт, промислові установки височастотного нагрівання металів, персональні електронно-обчислювальні машини, стільникові телефони, побутові електроприлади.

На сьогодні в аеропортах і на літаках цивільної авіації (ЦА) широке застосування для зв'язку, радіонавігації, телекерування, телесигналізації і радіолокації одержала радіоапаратура, яка працює в діапазоні високих (ВЧ), ультрависоких (УВЧ) і надвисоких частот (НВЧ). Найбільше застосування в ЦА знаходять радіоапаратура і радіосистеми, що працюють у діапазоні УВЧ і НВЧ. До них відносяться:

- системи інструментальної посадки літаків – курсові і глісадні маяки; системи ближньої навігації;
- радіолокаційні станції (РЛС) – далекого і ближнього виявлення, посадкові, огляду льотного поля (діапазон міліметрових довжин хвиль), літакові оглядові, метеонавігаційні;
- передавальні станції КВ і УКВ діапазону – системи автоматичного і напівавтоматичного керування і контролю за повітряним рухом, радіостанції літака та ін.

Першоджерелом електромагнітних коливань у радіотехнічних пристроях є генератори ВЧ і НВЧ. Електромагнітна енергія випромінюється в навколишній простір, у першу чергу, антенним пристроєм. Також, джерелами електромагнітних полів (ЕМП) у робочих приміщеннях радіолокаційних станцій, радіотехнічних майстерень, лабораторій і радіоцентрів можуть бути окремі вузли НВЧ генераторів (магнетрони, лампи біжучої хвилі, клістри), з'єднані елементи модуляторів з генераторами, лінії передач від генератора до антени, катодні виводи магнетронів, вентиляційні щілини, щілини у хвилеводних трактах і коаксіальних лініях та ін. В процесі експлуатації і ремонту установок з генераторами електромагнітної енергії можливий вплив ЕМП на обслуговуючий персонал, а також на працівників інших об'єктів, що знаходяться в зоні випромінювання спрямованих антен радіолокаційних станцій. На робочих місцях інтенсивність ЕМП залежить від потужності джерела випромінювання і відстані від джерела випромінювання до

робочого місця. У табл. 6.1 приведений розподіл радіохвиль за діапазонами, який є прийнятий на сьогодні. Біля джерел електромагнітного випромінювання на відстані близько  $1/6$  довжини хвилі переважають поля індукції, що прийнято називати зоною індукції, а за її межами переважають поля випромінювання, і цей простір вважається зоною випромінювання. Безумовно, що коли робоче місце розташоване в зоні індукції, працівник піддається впливу електричних і магнітних полів, що періодично змінюються.

Таблиця 6.1

Радіолокація			Радіозв'язок, телебачення			
Надвисокі частоти			Ультрависокі частоти		Високі частоти	
Мілі-метрові хвилі 1–10 мм	Сантиметрові хвилі 1–10 см	Дециметрові хвилі 0,1–1 м	Ультракороткі хвилі 1–10 м	Короткі хвилі 10–100 м	Середні хвилі 0,1–1 км	Довгі хвилі 1–3 км
Від 300 ГГц до 30 ТГц	Від 30 ГГц до 3 ТГц	Від 3 ГГц до 300 МГц	Від 300 МГц до 30 ТГц	Від 30 МГц до 3 ТГц	Від 3 МГц до 300 КГц	Від 300 КГц до 30 МГц

Також, одним із джерел електромагнітного випромінювання є авіаційні генератори та системи живлення і розподілення електроенергії. Оскільки робота системи генерування на борту ПС здійснюється в більшості випадків у повітрі, тому електромагнітне випромінювання немає суттєвого впливу на навколишнє середовище і на обслуговуючий персонал.

Ступінь опромінення обслуговуючого персоналу, а також пасажирів залежить від кількості працюючого обладнання – джерел ЕМВ, їх потужності, ступеня екранування, розміщення окремих блоків в салоні ПС або поза його межами.

Впливу енергії НВЧ-діапазону працівники зазнають при регулюванні, настроюванні та випробовуванні радіолокаційних станцій (РЛС) метеонавігаційної системи, у ангарах або аеродромах. Основним джерелом випромінювання на борту ПС є відкриті антенні системи. Під час випробовування РЛС на полігонах або їх експлуатації в цивільній авіації використовують захисні екрани, що дають змогу на порядок зменшити вплив електромагнітного випромінювання.

В умовах експлуатації електромагнітне випромінювання характеризується різноманітністю режимів генерації. Випромінювання може бути:

- ізольоване – від одного джерела ЕМП;
- поєднане – від кількох джерел ЕМП одного частотного діапазону;
- змішане – від кількох джерел ЕМП різних частотних діапазонів;
- комбіноване (коли одночасно діє інший несприятливий фактор).

Дія ЕМП може бути постійною або переривчастою. Остання, у свою чергу, може бути періодичною та аперіодичною. Для прикладу, переривчаста періодична дія ЕМП є випромінювання від антен РЛС, які працюють у режимі кругового огляду або сканування.

## **6.2. Методи і засоби захисту навколишнього середовища від електромагнітного випромінювання привід-генераторного агрегату та авіаційного обладнання**

Відповідно до Статті 83 “Захист навколишнього природного середовища від шкідливого впливу польотів цивільних повітряних суден” та Статті 84 “Захист населення від шкідливого впливу викидів (емісії) забруднюючих речовин, шуму, електромагнітного випромінювання, ризику авіаційних подій під час експлуатації повітряних суден” Повітряного кодексу України, суб’єкти авіаційної діяльності зобов’язані під час експлуатації повітряних суден на землі та в повітрі дотримуватися встановлених нормативів вмісту забруднюючих речовин у відпрацьованих газах та впливу фізичних факторів і вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів (емісії) забруднюючих речовин і зменшення рівня шуму, електромагнітного та радіаційного випромінювання. При цьому

максимальний допустимий рівень шуму під час експлуатації повітряного судна, емісії авіаційних двигунів та електромагнітного випромінювання об'єктів авіаційної діяльності не повинен перевищувати гранично допустимого рівня, встановленого авіаційними правилами України.

Основними шляхами при розробці засобів захисту від впливу ВЧ і НВЧ полів є зменшення щільності потоку енергії (ЩПЕ) випромінювання безпосередньо від самого джерела, екранування джерела випромінювання, екранування робочого місця чи віддалення його від джерела випромінювання, застосування засобів індивідуального захисту.

На практиці застосовують не лише один з методів захисту, а одночасно декілька. Засоби захисту повинні відповідати наступним вимогам:

- не спотворювати ЕМП;
- не знижувати якість технічного обслуговування і ремонту – одного з найважливіших факторів забезпечення безпеки польотів ПС;
- не знижувати продуктивність праці.

Залежно від умов експлуатації обладнання, діапазону частот випромінювання, розташування робочого місця, а також рівня випромінювання застосовують такі методи захисту (рис. 6.1):

1. Захист від ЕМП часом та відстанню.
2. Зменшення випромінювання джерела.
3. Екранування джерела випромінювання ЕМП.
4. Екранування робочих місць обслуговуючого персоналу.
5. Раціональне розташування в приміщенні установок – джерел електромагнітного випромінювання.
6. Застосування засобів індивідуального захисту.
7. Раціоналізація режимів експлуатації джерел випромінювання та роботи персоналу з експлуатації та обслуговування.



Рис. 6.1. Класифікація засобів захисту від електромагнітного випромінювання

Захист часом полягає в обмеженні або зменшенні часу перебування обслуговуючого персоналу в зоні опромінення, якщо останнє перевищує встановлені гранично-допустимі норми. Цей метод застосовується для обслуговуючого персоналу, який працює з обладнанням, а частота випромінювання якого становить 300 МГц – 300 ГГц і зниження інтенсивності ЕМВ неможливе.

Захист відстанню передбачає збільшення відстані між джерелом випромінювання та обслуговуючим персоналом, при цьому неможливо послабити інтенсивність випромінювання.

Виділення зон випромінювання полягає в огороженні та маркуванні зон, де є перевищення гранично-допустимих норм випромінювання. В таких зонах можливе короточасне перебування обслуговуючого персоналу із застосуванням індивідуальних засобів захисту.

Зменшення ЩПЕ безпосередньо джерела випромінювання є найефективнішим засобом захисту обслуговуючого персоналу, що регулює, настраює й проводить іспит передавачів радіолокаційних станцій і генераторів НВЧ, а також іншого обладнання електромагнітного випромінювання. Для цього замість антени підключають погоджене з вихідним каскадом передавача навантаження – еквівалент антени (поглинач потужності). В еквіваленті антени

генеруюча енергія цілком поглинається, не порушуючи режиму роботи генератора НВЧ. Для зменшення відбиття електромагнітної енергії поглинаючі елементи еквівалентів антен виконують клинчастої, східчастої або конусоподібної форми. Випромінювання НВЧ енергії в простір при застосуванні еквівалентів антен зменшується більш ніж на 50 дБ, тобто в 100000 разів в порівнянні з випромінюванням за допомогою антени.

Віддалення робочого місця від джерела випромінювання є одним із засобів зниження інтенсивності опромінення обслуговуючого персоналу на підприємствах технічного обслуговування чи аеропортах цивільної авіації. З одного боку, такий метод реалізується завдяки дистанційному керуванню й автоматизованому контролю за роботою радіолокаційних станцій, з іншого – установкою радіолокаційних станцій віддалено від робочих приміщень і на визначеній відстані, в залежності від потужності РЛС. Для потужних РЛС доцільно встановлювати антени на естакадах висотою не менше 10 м для розширення “мертвої” зони випромінювання (зона, де відсутній прямий промінь від спрямованої антени РЛС). Віддалення робочого місця від джерела випромінювання реалізовується роздільним розташуванням приміщень, у яких ремонтуються, налагоджуються, випробуються НВЧ генератори, від загальних виробничих приміщень, де робота не пов'язана з опроміненням НВЧ. Інтенсивність ЕМП у робочій зоні може знижуватися шляхом екранування джерел випромінювання металевими суцільними і сітчастими екранами.

Інтенсивність випромінювання може бути знижена також за допомогою поглинаючих покриттів або екранів. Основна характеристика екрана – ступінь послаблення електромагнітного поля, який залежить від глибини проникнення високочастотного струму в товщину екрана. Чим більша магнітна проникність екрана і чим вища частота екранового поля, тим менша глибина проникнення і товщина екрана. Товщину суцільного металевого екрана вибирають з конструктивних міркувань, тому що глибина проникнення електромагнітної ВЧ і НВЧ енергії невелика. Екран товщиною 0,01 мм послабляє енергію поля на 50 дБ (у 100000 разів). Саме тому як матеріал екрана застосовують фольгу. Генератори

НВЧ енергії можуть екрануватися цілком (замкнутий екран) чи частково (незамкнутий екран). Якщо біля джерела випромінювання є ненаправлене паразитне випромінювання невеликої інтенсивності, наприклад, витік через нещільності фланцевих сполук хвилеводних трактів, вентиляційні щілини й інше, то екранують джерело випромінювання цілком.

Якщо ж випромінювання гостронаправлене, наприклад, при випробуванні літальних РЛС на підприємствах технічного обслуговування цивільної авіації або аеропортах при виконанні ремонтних, налагоджувальних і регламентних робіт у радіо-лабораторіях, то застосовуються незамкнені екрани, у яких енергія НВЧ поглинається в покритті, не проникаючи за бічні і задню стінку екрана.

Поглинаючі екрани (покриття) застосовуються у випадках, коли відбита електромагнітна енергія від внутрішніх поверхонь суцільних металевих екранів може істотно порушити режим роботи НВЧ генератора. Тому поглинаючі покриття повинні цілком поглинати енергію. Це досягається відповідним підбором діелектричної і магнітної проникностей поглинаючого матеріалу. Як поглинаючі покриття застосовують:

1. Гумові килими з конічними шипами В2Ф-2, В2Ф-1, що поглинають електромагнітну енергію в діапазоні 0,8-4 см.
2. Магнітоелектричні пластини ХВ-0,8, ХВ-2,0, ХВ-3,2, ХВ-10,6 – діапазон хвиль, що поглинаються, 0,8-10,6 см.
3. Поглинаючі покриття на основі поролону ВРПМ, поглинаючі магнітну енергію в діапазоні 0,8-3 см.

При технічному обслуговуванні літальних РЛС безпосередньо на літаку, при перевірці їхньої працездатності виникає потреба включати високу напругу передавача, при цьому НВЧ енергія випромінюється антеною в простір. Для того, щоб уникнути опромінення інженерно-технічного персоналу, що знаходиться поблизу літака, в зоні стоянки, в ангарі, виконують ряд профілактичних заходів:

1. Орієнтують, по можливості, вісь літака й антену РЛС в бік, де немає людей.
2. Видаляють інженерно-технічний склад із зони можливого опромінення.

3. Високу напругу включають тільки короткочасно і тільки в положенні перемикача потужності РЛС на 25% чи 50%.

4. Установлюють замість обтічника антени екрануючий кожух, з поглинаючим покриттям.

Для послаблення щільності потоку потужності НВЧ випромінювання на 20-30 дБ (100-1000 разів) застосовують сітчасті металеві екрани. Стики між металевими листами повинні електрично надійно з'єднуватися пайкою чи зварюванням по всьому периметру, а частини екранів – двері, оглядові вікна, які є рухомими, повинні мати електричний контакт із нерухомою частиною екрана.

Екранування робочого місця застосовують у тих випадках, коли зниження інтенсивності випромінювання безпосередньо біля джерела не можливе, або його екранування зумовлюють технічні ускладнення. Екранування робочого місця виконують у вигляді незамкненого екрана чи спеціальної кабіни, звідки керують роботою чи здійснюють налаштування обладнання та установок.

Як індивідуальні засоби захисту від ЕМП НВЧ використовують спеціальний одяг – комбінезони, халати, каптури. Матеріалом для цього одягу служить бавовняна тканина з тонкими металевими нитками, що утворюють сітку. Така тканина здатна послабляти потужність випромінювання в діапазоні 0,8-10 см на 20-38 дБ. Для захисту очей застосовують захисні окуляри.

### **6.3. Розрахунок екрану для захисту від електромагнітного випромінювання МНРЛС**

Оскільки робота ПГА полягає в генеруванні електроенергії для споживачів під час польоту ПС, електромагнітне випромінювання генератора при його обслуговуванні на землі відсутнє. В польоті його ЕМВ немає суттєвого впливу на навколишнє середовище.

Доцільно зробити розрахунок екрану для споживачів електроенергії, а саме метеонавігаційних радіолокаційних станцій (МНРЛС), які є невід'ємною складовою бортового обладнання ПС, а також потужними джерелами електромагнітного випромінювання. Хоча принцип роботи їх полягає в

застосуванні імпульсного випромінювання, що зменшує на порядок рівень електромагнітного забруднення, але великі потужності передавачів і великі коефіцієнти підсилення антен зумовлюють випромінювання доволі потужних ЕМП.

1. Вихідні дані для розрахунку: МНРЛС працює на частоті 9 ГГц, тривалість імпульсу складає 2,5 мкс, частота повторення імпульсів 400 Гц, імпульсна потужність випромінювання складає 20 кВт, коефіцієнт підсилення антени 1000.

2. Знаходимо довжину електромагнітної хвилі по формулі:

$$\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 9 \cdot 10^9 = 3,3 \text{ см}, \quad (6.1)$$

де  $c$  – швидкість світла в вакуумі ( $c = 3 \cdot 10^8$ ),

$f$  – частота імпульсу.

3. Знаходимо гранично-допустиму густину потоку енергії відповідно до Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітного випромінювання. Для частот діапазону 3 ГГц – 30 ГГц:

$$W_{\text{дод}} = 60 \text{ мкВт/см}^2. \quad (6.2)$$

4. Середня потужність випромінювання обчислюється по формулі:

$$P = P_i \cdot \tau \cdot F = 20000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 20 \text{ Вт}, \quad (6.3)$$

де  $P_i$  – імпульсна потужність випромінювання складає,

$\tau$  – тривалість імпульсу складає,

$F$  – частота повторення імпульсів.

5. Розраховуємо максимальну густину потоку потужності  $W_{\text{макс}}$  на відстані  $r = 2$  м від антени РМНРЛС по формулі:

$$W_{\text{макс}} = \frac{P \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{20 \cdot 1000}{4 \cdot 3,14 \cdot 2^2} = 39808 \frac{\text{мкВ}}{\text{см}^2}, \quad (6.4)$$

де  $G$  – коефіцієнт підсилення антени,

6. Необхідне послаблення радіохвиль розраховується по формулі:

$$L_1 = 10 \cdot \log W_{\text{макс}}/W_{\text{дод}} = 10 \cdot \log 39808 / 60 = 28 \text{ дБ}. \quad (6.5)$$

7. Знаходимо товщину металічного листа, який здатний забезпечити необхідний рівень послаблення:

$$\delta = \frac{|L_1|}{15,4 \cdot \sqrt{f \cdot \mu \cdot \sigma}} = \frac{32}{15,4 \cdot \sqrt{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 3,82 \cdot 10^7}} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad (6.6)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність екрану,

$\sigma$  – провідність екрану ( $\sigma = 3,82 \cdot 10^7$ ).

8. Для алюмінієвого екрану магнітна проникність  $\mu$  дорівнює:

$$\mu = \mu \cdot \mu_0 = 1,000023 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \quad (6.7)$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму ( $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ ).

Оскільки екран такої товщини не буде міцним і зручним в експлуатації, тому доцільно вибрати екран, який буде підходити більш конструктивно, а саме товщиною 0,3-0,5 мм.

Додатково, для зниження відбитої складової електромагнітних хвиль, на зовнішній частині захисного екрану використовуємо поглинаючі покриття із матеріалів марок: ХВ-3 (магнітоелектричні пластини товщиною 1-3 мм) або В2Ф3 (резинові килими, товщиною 11-14 мм з шипами), які забезпечують поглинання 98% падаючого електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі 3,3 см.

## **Висновок**

Аналіз проблем охорони навколишнього середовища при здійсненні авіаційної діяльності дає змогу стверджувати, що електромагнітне забруднення навколишнього середовища залишається актуальною проблемою і потребує особливої уваги. Збільшення кількості джерел електромагнітного випромінювання на борту ПС призводить до збільшення його інтенсивності і впливу не лише на екологію, але і на людину також.

Зробивши розрахунок та стислий аналіз джерел електромагнітного випромінювання можна сказати, що одним із ефективних способів зменшення або усунення ЕМП є застосування поглинаючих екранів або кожухів. Такий метод є найактуальнішим і найбільш реалізованим в даний час.

В ході розгляду питань розділу було запропоновано електромагнітний поглинаючий екран (кожух) для захисту навколишнього середовища, персоналу та працівників, що здійснюють обслуговування ПГА, від бортового обладнання літака та устаткування МНРЛС та РЛС, які є джерелами електромагнітного випромінювання. Розрахований захисний екран забезпечує поглинання електромагнітного випромінювання МНРЛС до рівня встановленого санітарно-гігієнічними нормами та авіаційними правилами України.

Також, один із ефективних методів і засобів зменшення електромагнітного випромінювання є використання обслуговуючим персоналом індивідуальних засобів захисту.

## **ВИСНОВКИ**

На основі аналізу технічних характеристик літака Boeing 737-500 і його системи електропостачання було доведено, що вдосконалення існуючої системи електропостачання можливе шляхом заміни гідромеханічного приводу постійних обертів на електромеханічний привід постійної частоти обертання.

Аналіз системи електропостачання літака виявив недоліки гідромеханічного приводу постійних обертів, а саме:

- 1) конструктивна складність;
- 2) значні маса та габарити;
- 3) невеликий ресурс роботи;
- 4) необхідність експлуатації ПГА спеціалістами різних спеціальностей.

Ці недоліки пропонується усунути шляхом заміни гідромеханічного ППО на ППЧО електромеханічного типу.

В даній дипломній роботі було розроблено структурну схему існуючої і вдосконаленої систем електропостачання, принципову електричну схему ПГА, а також було розраховано частотні характеристики шестиступеневого ПГА.

Аналіз частотних характеристик і діаграми робочих частот обертання авіадвигуна і привід-генераторного агрегату дає змогу стверджувати, що для забезпечення якісної електроенергії достатньо триступеневого ПГА з механічним редуктором на вході.

Згідно з розрахунками, запропонований ПГА не поступається гідромеханічному приводу, причому конструктивна маса і габарити електромеханічного ППЧО менші чим гідромеханічного.

Виконано розрахунок частот перемикавання ППЧО з однієї ступені на іншу в залежності від відношення пар полюсів АП і ЕМК. Розрахункове значення ККД на основних режимах роботи складає 0,76-0,83.

Враховуючи всі переваги вдосконаленої СЕП, можна зробити висновок, що застосування електромеханічних ППЧО є можливе не тільки на існуючих літаках, але і на нових типах літальних апаратів. Це дає змогу суттєво підвищити експлуатаційні показники літака і покращити якість електроенергії бортових систем електропостачання.

При розробці САК ПГА особливу увагу було приділено основному функціональному елементу – ЕСУП, що є основою всієї системи керування. Використання такого типу САК, в основі якої лежить принцип керування мікроконтролером, дає можливість вирішити деякі нюанси керування і отримати ряд переваг, таких як багатofункціональність схеми, можливість реалізації діагностики та резервування системи, а також універсальність. Остання забезпечує

використання ЕСУП з різними функціональними елементами САК. До прикладу сюди можна віднести застосування іншого типу тахогенератора, з подальшою прошивкою лише мікроконтролера, при чому заміна будь-яких інших елементів не потрібна.

В системі автоматичного керування застосовано в якості джерел живлення регулюючі автотрансформатори. Перевагами такого типу джерел живлення є якісна вихідна форма синусоїди напруги, можливість регулювання рівня напруги в широкому діапазоні. Джерела живлення в САК застосовуються для живлення АП та регулятора напруги РН, який також живить АП, але трифазною напругою. Один із варіантів для регулювання напруги живлення АП, є застосування тиристорних систем керування або системи керування на транзисторах.

Застосування в САК сучасної бази електронних компонентів, дає змогу отримати більш високі показники надійності та безвідмовної роботи. Забезпечення цих критеріїв має велике значення при генеруванні ЕЕ, оскільки така система, як СЕП, є однією із найголовніших систем на літаку, і надійна роботи її окремих функціональних складових впливає на роботу всієї системи в цілому, а отже – і на роботу її споживачів.

Проаналізувавши отримані результати і розроблені структурні електричні схеми, можна стверджувати, що розроблений електромеханічний ППЧО і система керування САК відповідають усім існуючим нормам і стандартам, і дають можливість забезпечити надійну і безвідмовну роботу ПГА. Реалізація такої функції як контроль та діагностика, дає змогу передбачати виникнення аварійних ситуацій на борту літака.

Застосування такого типу ПГА на існуючих та нових типах ПС є доцільним, це підтверджують результати проведених розрахунків та розроблені структурні схеми, а також наведені переваги та недоліки застосування певних типів конструктивних елементів ПГА. Підтвердженням доцільності застосування електромеханічних приводів є світова тенденція переходу на нові методи керування механізмами та конструктивними елементами. Така тенденція

притаманна не лише авіаційній сфері, а й в автомобільній, морській та в інших сферах, де застосування отримали привід-генераторні агрегати.

У дипломній роботі розглянуто також важливі питання з охорони праці та охорони навколишнього середовища. Аналіз шкідливих чинників в сфері охорони праці, які впливають на інженера-конструктора при проектуванні та подальшій розробці ПГА, показав, що такі чинники здійснюють безпосередній вплив на працюючого. Застосування запропонованих методів і засобів для усунення або зменшення впливу шкідливих чинників дає змогу більш ефективно виконувати покладені завдання та цілі в процесі праці, а також зменшує вплив таких чинників на здоров'я та працездатність особи. При розгляді питань, які стосуються сфери охорони навколишнього середовища, проаналізовано основні чинники, які виникають внаслідок авіаційної діяльності, роботи бортових систем та системи електропостачання, а також запропоновано ефективні методи і засоби їх усунення або зменшення впливу на навколишнє середовище.

Результати дипломної роботи можуть бути використані при розробці нових ПГА чи вдосконаленні існуючих на літальних апаратах як закордонного так і вітчизняного виробництва.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Інструкція по технічному обслуговуванню і ремонту літака BOEING 737
2. Лужбин В.Н. Теория и расчёт авиационных электромеханических привод-генераторных агрегатов переменного тока постоянной частоты. – Х.: ХВВАИКУ, 1981. – 82 с.
3. Лужбин В.Н. Анализ авиационных привод-генераторных агрегатов переменного тока постоянной частоты. – Х.: ХВВАИКУ, 1982.
4. Скрипеч А.В. Дипломне проектування: навчально-методичний посібник / О.І. Варченко, В.М. Грібов. – К.: НАУ, 2002.

5. Красношапка М.М. Плавнорегулируемые трансформаторы, асинхронные и бесконтактные синхронные машины / Г.А. Коваленко, Д.М. Красношапка. – М.: Радио и связь, 1992. – 184 с.
6. Красношапка М.М. Теория и расчёт электродинамических редукторов с регулируемым передаточным отношением. – К.: КВИАВУ ВСС, 1976.
7. Красношапка М.М. Электроснабжение и энергетические системы ЛА. – К.: КВИАВУ ВСС, 1976.
8. Власов Г.Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
9. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
10. Красношапка М.М. Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты. – К.: Техника, 1974. – 168 с.
11. Бойко В.І. Схемотехніка електронних систем: у 3 кн. Кн. 3. Мікропроцесори та мікроконтролери: Підручник / Гуржій А.М., Жуйков В.Я. та інші. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища школа, 2004. – 399 с.
12. Грібов В.М. Теорія надійності систем авіоніки: навч. посіб.: у 2-х ч. Ч. 1. Визначення, показники, моделі відмов, методи розрахунку / Грищенко Ю.В., Скрипець А.В., Стрельніков В.П. – К.: НАУ, 2006 – 324 с.
13. Русаловський А.В. Правові та організаційні питання охорони праці: навч. посіб. для студ. ВНЗ. – 6-те вид., доповн. та перероб. – К.: Ун-т “Україна”, 2013, – 283 с.
14. Франчук Г.М. Екологія, авіація і космос: навч. посібник / Ісаєнко В.М. – К.: НАУ, 2004. – 456 с.
15. Ісаєнко В.С. Екологія та охорона навколишнього середовища: Дипломне проектування: навч. посібник для студ. вищих навч. закл. / Криворотька В.М., Франчук Г.М. – К.: НАУ, 2005. – 192 с.
16. Синдеев И. М. Электроснабжение летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1982. – 271 с.
17. Грузков С. А., Сугробов А. М. Проектирование систем электроснабжения

летательных аппаратов. М.: МЭИ, 1991. – 90 с.

18. Гидравлические привода летательных аппаратов / Под ред. В. И. Карева. М.: Машиностроение, 1992. – 368 с.

19. Брускин Д. Э., Зубакин С. И. Самолёты с полностью электрифицированным оборудованием // Итоги науки и техники. ВИННИТИ. Сер. Электрооборудование транспорта. 1986. – Т. 6. – 34 с.

20. Бертинов А. И. Перспективы развития автономных систем генерирования переменного тока стабильной частоты / А. И. Бертинов, С. Р. Мюзин, В. В. Бочаров, С. Б. Резников // Электричество. 1988.- № 10. – 28-31 с.

21. Волокитина Е.В., Головизнин С.Б. Полностью электрифицированный самолет от концепции до реализации // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №1. – с. 2-5.

22. Грузкова С.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Том 2. Элементы и системы электрооборудования приемники электрической энергии. - М.: Изд-во МЭИ. – 2008. – 552 с.

23. Коняхин С.Ф. Элементная база перспективных бортовых систем генерирования электроэнергии // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. – №5. – с.26-29.