

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

професор Павлова С.В.

" " _____ 2022 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО СТУПЕНЯ "БАКАЛАВР"

Тема: "Авіаційний термоелектричний генератор"

Виконав: Сороколетова Оксана Олександрівна

Керівник: Романенко Віктор Григорович

Нормоконтролер Левківський Василь Васильович

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет АЕТ Кафедра Авіоніки

Освітній ступінь "БАКАЛАВР "

Спеціальність 173 «Авіоніка», ОПП «Комплекси пілотажно-навігаційного
(шифр, найменування)
обладнання»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Павлова С.В.

" " 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи студента

Сороколєтова Оксана Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи : Авіаційний термоелектричний генератор затверджена наказом ректора від «06» грудня 2021 р. № 2658/ст
2. Термін виконання роботи (проекту): з 10 січня 2022 р. по 28 лютого 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи (проекту): Розробити авіаційний термоелектричний генератор постійного струму потужністю 5 КВт, для аварійного живлення та розвантаження електросистеми постійного струму під час польоту літака.
4. Зміст пояснювальної записки: Джерела живлення. Загальні відомості. Основи терморушійної сили. Проектування і розрахунок термогенератора із секційних термоелементів.
5. Графічний матеріал: Схема секційного термоелемента. Схема термоелектричного генераторного модуля із секційних віток. Модель генераторного секційного термоелемента. Монтажна схема ТЕБ. Схема розміщення ТЕГ на двигуні Д-436-148. Компоновочна схема розміщення ТЕГ на двигуні Д-436-148. Схема підключення ТЕГ1 і ТЕГ2 до бортової мережі електропостачання. Схема стабілізатора напруги з польовим транзистором.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір і аналіз літератури	20.11.21 – 29.11.21	
2	Джерела живлення. Загальні відомості	30.11.21 – 22.12.21	
3	Основи терморушійної сили	22.12.21 – 10.01.22	
4	Проектування і розрахунок термогенератора із секційних термоелементів	10.01.22 – 15.01.22	
5	Оформлення пояснювальної записки роботи і графічного матеріалу	15.01.22 – 10.02.22	

7. Дата видачі завдання “20” жовтня 2021 р.

Керівник дипломної роботи _____ Романенко В.Г.
(підпис керівника) (ПІБ)

Завдання прийняла до виконання _____ Сороколетова О.О.
(підпис випускника) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра «Авіаційний термоелектричний генератор»: 64 сторінки, 27 рисунків, 8 таблиць, 8 використаних джерел.

ТЕРМОГЕНЕРАТОР, ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА, ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, КОМПОЗИЦІОНА СХЕМА, ТЕРМОПАРА

Об'єкт дослідження – термоелектричні модулі на основі телуриду свинцю і телуриду германію.

Предмет дослідження – параметри термоелектричних модулів, що характеризують їх термоелектричну добротність.

Мета дипломної роботи – розробка реальної моделі термоелектричного генератора постійного струму та його установка і підключення до бортової мережі електропостачання літака Ан – 148 з метою часткового розвантаження основної СЕП при польоті на ешелоні.

Метод дослідження – цифрове математичне моделювання.

Встановлено, що розроблений авіаційний термогенератор є дуже ефективним, має хороші масо-габаритні параметри та вихідну потужність.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців авіаційних конструкторських бюро.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	10
1.1. Джерела первинного електроживлення.....	10
1.1.1. Хімічні джерела струму.....	11
1.1.1.1. Гальванічні елементи й батареї.....	11
1.1.1.2. Акумулятори.....	23
1.2. Термобатареї.....	24
1.3. Термоелектронні перетворювачі.....	24
1.4. Фотоелектричні перетворювачі.....	25
1.5. Паливні елементи.....	25
1.6. Біохімічні джерела струму.....	25
1.7. Атомні елементи.....	26
1.8. Електромашинні генератори.....	27
1.8.1. Типи, основні дані генераторів постійного струму.....	27
1.8.2. Типи, основні дані генераторів змінного струму.....	28
1.8.3. Типи, основні дані безконтактних і комбінованих генераторів змінного струму.....	30
1.9. Джерела вторинного електроживлення.....	32
РОЗДІЛ 2	
ОСНОВИ ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ.....	33
2.1. Природа ТЕРС.....	33
2.2. Термоелектричні явища.....	36
2.2.1. Ефект Зеєбека.....	37
2.2.2. Ефект Пельтьє.....	41
2.2.3. Ефект Томсона.....	43
2.3. Застосування термоелектричних явищ.....	46

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ТЕРМОГЕНЕРАТОРА

ІЗ СЕКЦІЙНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ.....50

3.1. Особливості технології виготовлення генераторних модулів із двосекційних термоелементів.....52

3.2. Проектування та розрахунок генераторних модулів із секційних термоелементів.....53

3.2.1. Обґрунтування вибору вихідних даних для розрахунку ТЕБ....55

3.2.2. Вибір матеріалів для ТЕГ.....55

3.2.3. Розрахунок однокаскадної ТЕБ.....56

3.2.4. Компоновка ТЕГ.....60

3.3. Підключення ТЕГ до бортової мережі електропостачання.....62

ВИСНОВКИ.....63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....64

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

БРН – блок регулювання напруги

ГО - генератор однофазний

ДЖ – джерело живлення

ЕРС – електрорушійна сила

ЕРС – електрорушійна сила

ЗМГ – земний малий газ

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЛА – літальний апарат

МП – польотний максимал

ПМГ – польотний малий газ

ПС – повітряне судно

СГО - літаковий генератор однофазний

СГС - літаковий генератор синхронний

СЕП – система електропостачання

ТВГ – температура вихідних газів

ТЕБ - термоелектробатарей

ТЕГ - термоелектрогенератор

ТЕРС – термоелектрорушійна сила

ТРДД – турбореактивний двохконтурний двигун

ХДС – хімічне джерело струму

ВСТУП

Можливість прямого перетворення теплової енергії в електричну на основі ефектів, що виникають в твердих тілах, вже давно приваблює увагу дослідників і розробників різноманітної апаратури. За останні 20-30 років в області термоелектричного перетворення енергії був досягнутий суттєвий прогрес: розвинута фізика термоелектричних явищ; отримано принципіально нові результати при розробці термоелектричних матеріалів – їх добротність і ККД перетворення пристроїв збільшені більше ніж в десять разів; знайдені нові типи термоелементів; розроблені методи розрахунку і оптимізації термоелектричних приладів.

Термоелектричні явища отримують все більш широке практичне застосування. На їх основі створені унікальні по своїм параметрам термоелектричні генератори, що використовуються в космосі, під водою і в наземній важкодоступній для обслуговування апаратурі; сконструйовані генератори з ядерними джерелами тепла, розробляються проекти таких генераторів потужністю від десяти до кількох тисяч кіловат.

За теперішньої енергетичної кризи використання відпрацьованого тепла для термоелектричного генерування є досить перспективним напрямком.

Даний диплома робота присвячена розв'язанню питання термоелектричного перетворення теплової енергії в електричну на борту повітряного судна. В основу вирішення цього питання закладено цифрове математичне моделювання термоелектричних модулів.

Результати проектування авіаційного термогенератора рекомендується використовувати при проведенні наукових досліджень, у навчальному процесі та в практичній діяльності фахівців авіаційних конструкторських бюро.

РОЗДІЛ 1

ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

Для роботи більшості електронних пристроїв необхідна наявність одного або декількох джерел живлення постійного струму. Всі ДЖ можна розділити на дві групи: джерела первинного електроживлення і джерела вторинного електроживлення. Авіаційне радіоелектронне обладнання може мати у своєму складі:

ДЖ першої групи;

ДЖ другої групи;

ДЖ першої та другої груп одночасно.

1.1. Джерела первинного електроживлення.

До даної групи ДЖ відносяться:

- хімічні джерела струму (гальванічні елементи й акумулятори);
- термобатарей;
- термоелектронної перетворювачі;
- фотоелектричні перетворювачі (сонячні батареї);
- паливні елементи;
- біохімічні джерела струму;
- атомні елементи;
- електромашинні генератори.

Хімічні джерела струму (ХДС) широко використовуються для живлення малопотужних пристроїв та апаратури, що вимагає автономного живлення. Батареї та акумулятори є також допоміжними і (або) резервними джерелами енергії в пристроях, що живляться від мережі змінного струму.

Вихідна напруга таких джерел практично не містить змінної складової (пульсацій), але в значній мірі залежить від величини струму, що віддається в навантаження, і ступеня розряду. Тому в пристроях, критичних до напруги живлення, хімічні джерела струму використовуються спільно із стабілізаторами напруги.

Розглянемо докладно гальванічні батареї і акумулятори, а також їх параметри

1.1.1. Хімічні джерела струму

Як вже зазначалося раніше, хімічні джерела струму (ХДС) поділяються на дві групи:

- гальванічні елементи і батареї;
- акумулятори.

ХДС першої групи, в порівнянні з акумуляторами, мають більшу питому електричну ємність (вимірюється в ампер-годинах або міліампер-годинах) і мають меншу вартість. Основною перевагою акумуляторів є можливість їх багаторазового використання і внаслідок цього значно менша вартість одиниці одержаної енергії. Типові акумулятори, використовувані для автономного живлення малопотужної апаратури, гарантовано витримують від 200 до 1000 циклів заряд-розряд.

При виборі ХДС для живлення конкретної апаратури насамперед звертають увагу на його систему, ціну, енергоємність, довговічність при зберіганні, сталість напруги в плинні розряду, внутрішній опір, максимальне значення струму, діапазон робочих температур і масо-габаритні показники.

1.1.1.1. Гальванічні елементи й батареї

Найбільшого поширення набули елементи і батареї наступних систем: вугільно-цинкові і хлористо-цинкові; лужно-марганцеві (лужні); ртутні (ртутно-цинкові); срібно-цинкові, літєві. На рис.1. представлені криві розряду елементів різних типів (γ -частка витраченої ємності).

Типорозміри циліндричних сухих елементів живлення стандартизується.

Розміри елементів та їх позначення, прийняті міжнародною електротехнічною комісією, в Росії і США (стандарт ANSI) представлені в таблиці 1.

Вугільно-цинкові елементи. Або елементи Лекланше (Le Clanche) є дуже широко поширеними ХДС завдяки їх низькій вартості і задовільним технічним характеристикам. Елементи і батареї цього типу в різних виконаннях роблять багато фірм, наприклад, Union Carbide, Ever Ready, VARTA, Vidor, Yuasa та інші

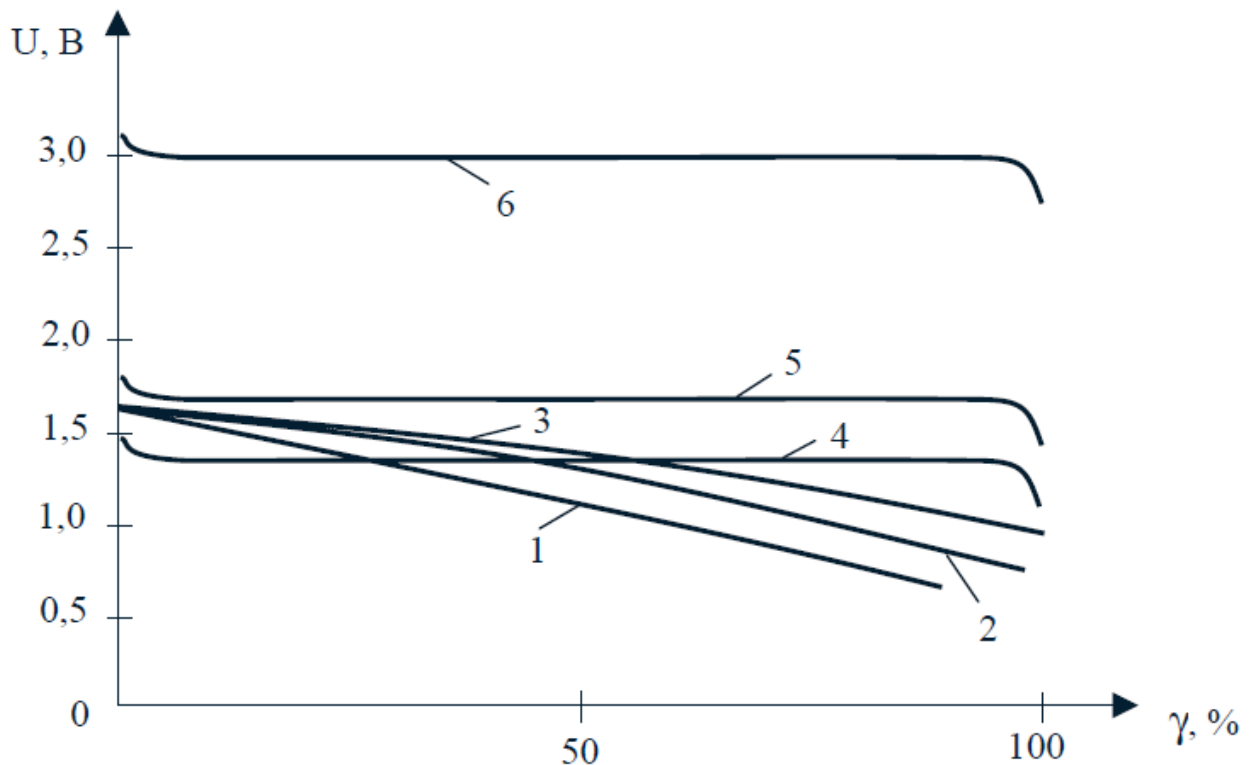


Рис.1. Криві розряду гальванічних елементів

1 - вугільно-цинкові Лекланше; 2 - хлористого-цинкові Лекланше;
3 - лужні; 4 - ртутні; 5 - срібно-цинкові; 6 - літєві.

Таблиця 1.

Уніфіковані розміри циліндричних сухих елементів живлення

Позначення			Розміри	
МЕК	Росія	США	Діаметр, мм	Висота, мм
K08	-	O	10,5	3
K06	283	-	10,5	22
	286	AAA	10,5	44,5
K4	314	R	14,5	38
K6	316	AA	14,5	50,5
K8	326	A	16	50,5

Ш0	332	BR	21,5	37
Ш2	336	B	21,5	60
Ш4	343	C	26,5	50
K20	373	D	34,2	61,5
K22	374	E	34,2	75
K25	376	F	34,2	91
K26	-	G	34	105
K27	-	J	34	150
-	425	-	40	100
-	465	-	51	125

Під навантаженням робоча напруга вугільно-цинкового елемента у міру його розряду поступово зменшується. Чим нижче кінцева напруга (напруга, до якої пристрій зберігає працездатність), тим більше термін служби і час роботи елемента. Типові значення кінцевих напруг для елемента з початковим напругою 1,5 В знаходяться в інтервалі від 0,65 до 1,1 В. Доцільно прагнути до забезпечення меншого значення цієї напруги, щоб найбільшою мірою використовувати енергію, яку може віддати елемент. Для цього, якщо дозволяє пристрій, застосовують батарею з дещо більшою напругою, ніж це необхідно для нормальної роботи пристрою. У цьому випадку зменшується кінцева напруга в розрахунку на один елемент і забезпечується більш ефективне використання ХДС.

Номінальна робоча ємність вугільно-цинкової батарея не є строго визначеною величиною, так як віддана батареєю ємність залежить від умов її розряду (розрядного струму, режиму розряду і кінцевої напруги). Віддана ємність залежить так само від робочої температури і умов зберігання батареї до початку експлуатації.

Коефіцієнт використання активних матеріалів вугільно-цинкової батареї підвищується в міру зменшення щільності струму. З цього при проектуванні пристроїв з живленням від ХДС бажано вибирати батарею можливо більших розмірів.

Ємність що віддається залежить так само від співвідношення тривалостей періодів розряду і відпочинку. Як правило, вугільно-цинкові елементи краще працюють в умовах переривчастого відбору струму. Однак у

окремих випадках вони можуть виявитися ефективними при роботі в умовах безперервного розряду дуже малим струмом.

Вугільно-цинкові елементи і батареї, як правило, призначені для роботи при температурі 21°C . Чим вище температура батареї під-час розряду, тим більше віддача енергії. Однак висока температура призводить до зменшення терміну зберігання, а тривалий вплив температури вище 52°C може призвести до пошкодження батареї.

На рис.2. представлені характеристики розряду вугільно-цинкового елемента типорозміру D, розряджається безперервно на резистор опором 2,25 Ом при різній температурі.

В табл.2. показано як залежно від температури змінюється ємність що віддається вугільно-цинкового елемента типорозміру D при його неперервному розряді на резистор опором 2,25 Ом до кінцевої напруги 0,6 В.

Знижена температура і навіть заморожування не призводить до псування елементів, якщо їх не піддавати багаторазовим циклічним температурним змінам (від найбільш низьких до більш високих температур). При зниженій температурі збільшується термін зберігання елементів. Рекомендована температура зберігання вугільно-цинкових елементів складає $4 - 10^{\circ}\text{C}$.

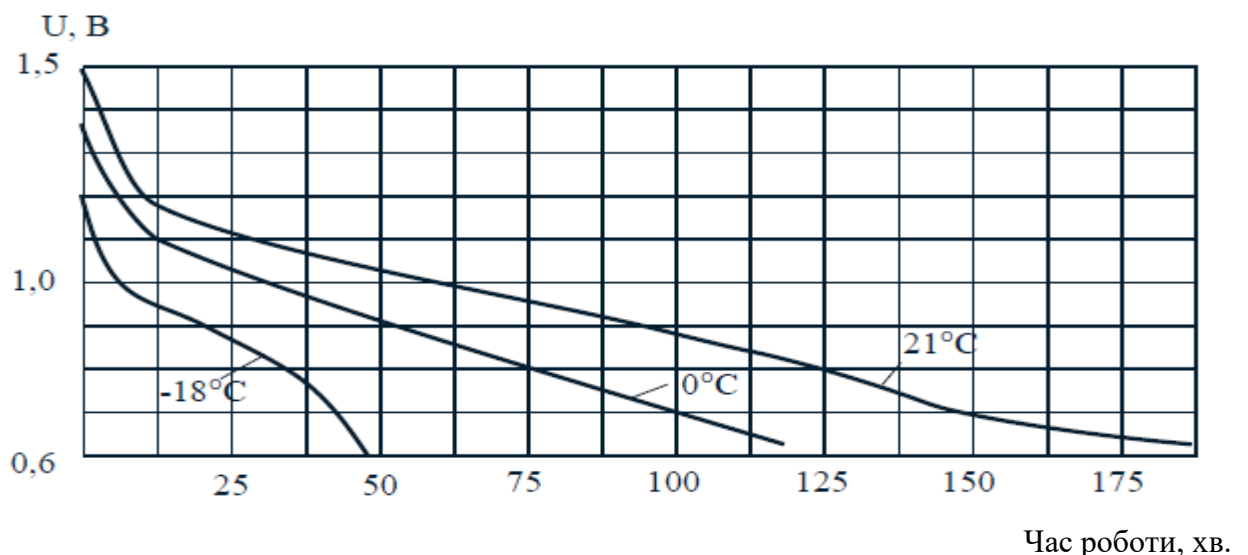


Рис.2. Характеристики розряду вугільно-цинкового елемента типорозміру D, розряджається безперервно при початковому струмі 660 мА.

Таблиця 2.

Вплив температури на ємність що віддається вугільно-цинкового елемента типорозміру D

Температура, °С	Ємність в % від номінального значення при 21 °С
37,8	140
26,7	110
21,1	100
15,6	90
4,4	70
-6,7	45
-17,8	25
-28,9	0

Внутрішній опір елемента або батареї необхідно обов'язково враховувати при виборі ХДС для живлення пристроїв, які споживають великі струми протягом коротких проміжків часу. Внутрішній опір залежить, крім усього іншого, від розмірів елемента. Відповідно, якщо внутрішній опір малогабаритного елемента занадто великий, для того щоб забезпечити необхідний струм можна вибрати елемент великих розмірів. Внутрішній опір «свіжого» вугільно-цинкового елемента досить малий. Однак він помітно зростає при використанні елемента.

Для визначення часу напрацювання або ємності що віддається сухих вугільно-цинкових батарей в конкретному пристрої при заданому режимі розряду (крім відбору дуже малих струмів) доцільно проводити випробування, відтворюючи умови розряду, близькі до тих, в яких буде використовуватися дана батарея. Ємність батареї що віддається, що розряджається заданим струмом по 2 години на день, істотно відрізняється від ємності що віддається цій же батареї, що розряджається таким же струмом по 10 годин на день. Не існує безпосереднього зв'язку між ємністю що віддається при безперервному розряді і ємністю при переривчастому розряді. Тому достатньо важко оцінювати достоїнства різних батарей при роботі в режимі переривчастого розряду, порівнюючи результати їх випробувань в режимі безперервного розряду.

Хлористо-цинковий елемент Лекланше. Є різновидом вугільно-цинкового елемента. Головна відмінність між ними полягає в електроліті. У хлористо-цинковому елементі в якості електроліту використовують тільки

розчин хлористого цинку, тоді як у вугільно-цинкові елементи електроліт поряд з хлористим цинком міститься розчин хлористого амонію. Відмова від використання хлористого амонію покращує електрохімічні властивості елемента, однак, при цьому також ускладнюється конструкція елемента.

Таблиця 3.

Вплив температури на щільність віддається хлористо-цинкового елемента типорозміру D.

Температура, °C	Щільність в % від номінального значення при 21 °C
37,8	115
32,2	110
26,7	105
21,1	100
15,6	95
10,0	90
4,4	85
-1,1	80
-6,7	70
-12,2	60
-17,8	45

Таблиця 4.

Середній час роботи вугільно-цинкових і хлористо-цинкових елементів та батареї типу Eveready фірми Union Carbide при температурі 21 ° C.

Марка елемента (батареї)	Типорозмір згідно стандарту ANSI	Напруга живлення, В	Режим роботи, г/день	Опір навантаження, Ом	Час роботи до кінцевої напруги, годин	
					0,75 В	0,9 В
1215	AA	1,5	4	40	33	31
1215	AA	1,5	4	25	20	18
1235	C	1,5	4	40	97	91
1235	C	1,5	4	25	59	55
1050	D	1,5	4	83,3	440	400
742	F	1,5	2	18,75	490	410
742	F	1,5	2	1,25	23	18
950	D	1,5	2	150	525	475
950	D	1,5	2	5	11	7

HS35	C	1,5	2	600	0,8 B	1,0 B
HS35	C	1,5	2	6	900	800
					3,5	1,5
750	AA	3,0	2	600	1,6 B	2,0 B
750	AA	3,0	2	60	265	240
					14	10
703	B	4,5	2	900	2,4 B	3,6 B
703	B	4,5	2	45	420	250
					14,5	4,5
724	AA	6,0	2	100	3,6 B	4,4 B
744	F	6,0	4	100	17,7	14,5
					155	115
706	F	6,0	2	75	3,6 B	4,0 B
706	F	6,0	2	5	450	410
					20,5	18
773	B	7,5	2	1500	4 B	5 B
773	B	7,5	2	75	420	340
					14,5	9
206	109	9,0	2	750	4,2 B	5,4 B
206	109	9,0	2	560	40	32
					27	21
2356N	117	9,0	4	600	4,8 B	6 B
2356N	117	9,0	4	250	305	290
					125	115
716	F	9,0	2	112,5	6,0 B	7,2 B
716	F	9,0	2	7,5	410	310
					18	6,8

Електроди хлористо-цинкових елементів здатні працювати більш ефективно і, як наслідок, забезпечувати більш високий коефіцієнт використання активних матеріалів (більший корисний вихід по струму), ніж електроди вугільно-цинкових елементів. Тому хлористо-цинкові елементи можуть працювати в режимі з відбором більшого струму протягом більш тривалого часу, ніж вугільно-цинкові елементи тих же розмірів. Крім цього, хлористо-цинкові елементи забезпечують більш високу стабільність напруги під навантаженням. Ці елементи можуть виконуватися з збільшеними габаритами («потужні» сухі елементи). Конструкція таких елементів передбачає спеціальні пристосування для відводу газу, що утворюється при розряді.

Хлористо-цинкові елементи при зниженні температури втрачають менше ємності, ніж вугільно-цинкові при тих же самих умовах розряду (порівняй табл. 2 і 3).

Характеристики деяких вугільно-цинкових і хлористо-цинкових елементів та батарей представлені в табл.4. Дані цієї таблиці наглядно демонструють залежність ємності що віддається від режиму розряду (розрядного струму). Так, наприклад, дев'яти вольтова батарея 716 (F) при розряді з початковим струмом 80 мА (опір навантаження 112,5 Ом) до напруги 7,2 В віддає ємність близько 24,8 А*год. У той же час при розряді струмом 1,2 А (опір навантаження 7,5 Ом) до такої ж напруги вона здатна віддати лише приблизно 8,4 А*год.

Лужні марганцево-цинкові елементи. Основна перевага лужних елементів в порівнянні з елементами системи Лекланше проявляється при використанні їх в якості потужних джерел струму.

Лужні елементи дуже добре працюють в режимах з неперервним відбором струму і з відбором великих струмів і мають явну перевагу перед вугільно-цинковими елементами за таким параметром, як відношення питомої ємності до вартості одиничного елемента.

Стабільність напруги лужних елементів та батарей вище, ніж у ХДС системи Лекланше. Вони залишаються працездатними в інтервалі температур від -20 до +70 ° С, а в певних випадках і при більш високих температурах.

Лужні ХДС можуть зберігатися протягом 30 місяців без значного зменшення початкової ємності. Наприклад, після річного зберігання при 20 °С ці батареї здатні забезпечувати понад 92% першопочатковій ємності. Окремі елементи та батареї цього типу зберігають близько 80% початкового значення ємності після чотирьох років зберігання при 20 ° С.

Як і для ХДС системи Лекланше, так і для лужних ХДС характерно те, що час роботи (в годинах) тим вище, чим нижче кінцев напруга. Доцільно добиватися якомога більш низької кінцевої напруги, для того щоб повністю використовувати високу енергію, що міститься в елементах цього типу. Розрядна ємність залишається відносно постійною при різних графіках

розряду. Зміна величини відбираного струму менше впливає на що віддається ємність, ніж у елементів Лекланше. Елементи й батареї виготовляються з величиною ємності від декількох сотень міліампер-годин до десятків ампер-годин.

Лужні батареї призначені для використання в пристроях, де потрібні джерела живлення великої потужності або джерела, які мають більш тривалий час роботи в порівнянні з вугільно-цинковими батареями. Повний запас енергії лужних батарей приблизно вдвічі перевищує запас енергії вугільно-цинкових батарей тих же розмірів. У звичайних вугільно-цинкових батарей при роботі в режимі з відбором більшого струму або при безперервному розряді у важких режимах коефіцієнт використання активних матеріалів настільки погіршується, що тільки невелика частка запасу енергії що міститься в них може бути використана. Основна перевага лужних батарей полягає саме у високій потужності при розряді в безперервному або важкому режимі, коли ХДС системи Лекланше перестають задовольняти пропонованим до джерела живлення вимогам. При певних умовах лужні ХДС забезпечують в сім разів більшу тривалість роботи, ніж стандартні вугільно-цинкові батареї.

Хоча лужні батареї за своїми технічними характеристиками кращі за вугільно-цинкові в будь-яких режимах роботи, в ряді випадків виявляється, що в економічному відношенні вони не будуть переваг в режимах з відбором малого струму, при переривчастому розряді або в комбінованому режимі. Наприклад, при переривчастому розряді струмами менше 300 мА лужний елемент типорозміру Д, хоча і має дуже хороші технічні характеристики, втрачає економічні переваги перед вугільно-цинковим елементом.

Ртутно-цинкові елементи і батареї. Характеризуються стабільністю напруги при розряді і відсутністю необхідності в перервах між розрядами для «відпочинку». Напруга ртутно-цинкового елемента дорівнює $1,352 \pm 0,002$ В і мало змінюється при зміні температури. Тому ці елементи іноді використовуються в технічних пристроях в якості джерел опорної напруги.

Характерними рисами ртутно-цинкових ХДС є:

- тривалий термін служби;

- велике значення питомої ємності;
- плоска крива розряду;
- порівняно висока напруга під навантаженням;
- відносно постійна ємність що віддається, практично незалежна від умов розряду;
- малий і практично постійний внутрішній опір;
- збереження працездатності при високих температурах;
- висока стійкість до ударів, вібрацій і прискорень;
- стійкість до зниженого і підвищеного тиску в порівнянні з атмосферним.

Робоча ємність ртутно-цинкових ХДС після року зберігання при температурі 21 ° С, як правило, становить більше 90% ємності нової батареї. Рекомендований термін зберігання для ртутно-цинкових ХДС до трьох років. У табл. 5. Представлена залежність напруги ртутно-цинкового елемента від тривалості зберігання.

Таблиця 5.

Залежність ЕРС ртутно-цинкового елемента від часу зберігання при температурі 21 ° С (35 ° С)

Час збереження, міс.	ЕРС, В
0	1,3566 (1,3566)
3	1,3555 (1,3554)
6	1,3536 (1,3510)
9	1,3533 (1,3490)
12	1,3524 (1,3463)

Таблиця 6.

Характеристики ртутно-цинкових елементів та батарей Eveready виробництва фірм Union Carbide при безперервному розряді

Фірмове позначення	Напруга, В	Позначення відповідно з ANSI	Середній термін служби при температурі 21 ° С		
			Опір навантаження, Ом	Кінцеве навантаження, В	Тривалість роботи, год.

325	1,35	WM5	13.000	1,2	540
E400N	1,35	M10	1.250	0,9	75,9
343	1,35	WM10	13.000	0,9	1200
354	1,35	—	6.500	0,9	730
			6.500	1,2	710
313	1,35	WM45	6.500	1,2	1100
E625N	1,35	M20	250	0,9	50,9
EPX640	1,35	M30	1.250	0,9	510
E401N	1,35	M35	100	0,9	68,9
E1N	1,35	M40	60	0,9	52,6
E3	1,35	M60	60	0,9	125
E502	1,35	M55	83	0,9	171
E12N	1,35	M70	32	0,9	100
E42N	1,35	M100	4.4	0,9	54,7
E41E	1,40	M11	1000	0,9	126
E401E	1,40	M35	100	0,9	69,8
EP401E	1,40	—	250	0,9	206
E502E	1,40	M55	83	0,9	174
E12	1,40	M70	32	0,9	100
E42	1,40	M100	4.4	0,9	60
EPX14	2,7	—	2.750	1,8	280
E132N	2,7	—	120	1,8	52,6
E152	2,8	—	500	1,8	75,8
E133N	4,05	—	180	2,7	52,6
E163	4,2	—	375	2,7	50,8
E133	4,2	—	180	2,7	55,5
E233	4,2	—	180	2,7	122
E164N	5,4	—	500	3,6	51
E134N	5,4	—	240	3,6	52,6
EPX32	5,6	—	500	3,6	50,8
			200	3,6	22
E134	5,6	—	240	3,6	55,5
E135N	6,75	—	300	4,5	52,6
E165	7,0	—	625	4,5	50,8
			250	4,5	22
E136N	8,1	—	360	5,4	52,6
E136	8,4	—	360	5,4	55,5
E289	12,6	—	720	0,9	51,5

Срібно-цинкові елементи. Забезпечують більш високу напругу, ніж ртутно-цинкові при збереженні плоскої кривої розряду (Мал.1). Срібно-цинкові ХДС зберігають працездатність при низьких температурах.

Робоча напруга срібного елемента становить 1,5 В. Срібно-цинкові ХДС використовуються в якості джерел живлення в електронних наручних годинниках (з аналоговою і цифровою індикацією), калькуляторах, електронних записних книжках, мініатюрних слухових апаратах, вимірювальних приладах, мініатюрних джерелах світла з автономним живленням (ліхтариках) і цілому ряді інших пристроїв. Також, як і ртутно-цинкові елементи срібні, ХДС застосовуються в якості джерел опорної напруги. Срібно-цинкові елементи добре зберігають працездатність після зберігання 1-2 років (зазвичай зберігаються більше 90% ємності після одного року зберігання при температурі 21 ° С). Елементи срібно-цинкової системи можуть мати як малий, так і великий внутрішній опір. Характеристики деяких срібних хімічних джерел струму приведені в таблиці 7 .

Таблиця 7.

Характеристики срібно-цинкових елементів та батарей серії Eveready фірми Union Carbide при безперервному розряді

Марка елемента (батарей)	Напруга, В	Позначення відповідно з ANSI	Середній термін служби при температурі 35°C		
			Опір навантаження, Ом	Кінцева напруга, В	Час роботи, год.
384	1,5	—	15.000	0,9	370
392	1,5	—	15.000	1,3	370
S312E	1,5	S4	1.500	1,3	38
309	1,5	WS5	15.000	1,3	600
393	1,5	WS5	15.000	1,3	725
SH301	1,5	WS10	150.000	0,9	9800
386	1,5	WS10	6.500	1,3	510
303	1,5	WS16	94.000	0,9	10,920
357	1,5	SR44	6.500	1,3	810

Літієві елементи і батареї. Літієві ХДС забезпечують питому енергію за масою до 330 Вт*ч / кг, що приблизно в три рази вище, ніж у ртутних і срібно-цинкових, і в чотири рази вище ніж у лужних джерел струму. Питома енергія за обсягом у літієвих батареї на 50% вище, ніж у ртутних, і на 100% вище, ніж у лужних. Застосування літієвих ХДС дозволяє зменшити масогабаритні показники РЕА з автономним живленням. Іншою чудовою властивістю літієвих

елементів і батарей є великий термін зберігання, завдяки чому автономність деяких пристроїв з літєвим ХДС досягає 5-10 років і більш. У табл. 8. представлені значення рівноважних напружень основних типів літєвих ХДС.

Таблиця 8.

Рівноважні напруги літєвих елементів різних систем

Матеріал	Напруга, В
Літій-тіонілхлорид (LiSOCl_2)	3,6
Літій-п'ятиокись ванадію (LiV_2O_5)	3,4
Літій-двуокись сірки (LiSO_2)	2,9
Літій-триокись молібдена (LiMoO_3)	2,9
Літій-фторид міді (CuF_2)	3,4
Літій-хромат срібла ($\text{LiAg}_2\text{CrO}_4$)	3,0
Літій-сульфід міді (LiCuS)	2,2

1.1.1.2. Акумулятори

Відповідно до прийнятої в технічній літературі термінологією акумулятори та акумуляторні батареї відносяться до вторинних ХДС, призначених для виробництва електричної енергії. Акумулятори та акумуляторні батареї віддають в зовнішній електричний ланцюг енергію, запасені в процесі заряду. Їх використання для живлення радіоапаратури в ряді випадків більш доцільно, ніж використання гальванічних елементів і батарей.

Акумулятори допускають багаторазовий заряд і розряд. При зарядці акумулятора його позитивний полюс підключається до позитивного полюса зарядного пристрою. Заряд акумулятора здійснюється струмом, що йде у напрямі, зворотному струму розряду.

Найбільш широке поширення одержали наступні типи акумуляторів: кислотні, лужні, срібно-цинкові, герметичні нікель-кадмієві та нікель-металгідридні.

1.2. Термобатареї

Термобатареї складаються з послідовно з'єднаних термопар. Термобатареї використовуються в якості ДЖ малої потужності, наприклад для живлення радіоприймачів. У найпростішому вигляді термоелектричний генератор являє собою батарею термопар, у яких одні кінці спаїв нагріваються,

а інші мають досить низьку температуру, завдяки чому створюється термо-ЕРС і в зовнішній ланцюга протікає струм. Кожна термопара може складатися з двох різнорідних напівпровідників або з провідника і напівпровідника. Велика теплопровідність металевих термопар не дозволяє створювати значну різницю температур спаїв, а отже, надає можливість отримати більшу термо-ЕРС. Кращі результати дає використання в термогенераторах напівпровідникових термопар, або комбінованих, що складаються з провідника та напівпровідника.

У термопарі, що складається з напівпровідників з n - і p -провідностями, при нагріванні спаю кількість електронів в напівпровіднику n -типу і число дірок у напівпровіднику p -типу збільшується. Електроні дірки внаслідок дифузії в напівпровідниках рухаються від гарячогошару термопари до холодного. Переміщення дірок призводить до того, що гарячий кінець напівпровідника p -типу заряджається негативно, а холодний кінець - позитивно. У напівпровіднику n -типу електрони, переходячи від гарячого кінця до холодного, так само як, і в металі, заряджають гарячий кінець позитивно, а холодний кінець - негативно. Термо-ЕРС напівпровідникової термопари значно більше термо-ЕРС металевої пари.

1.3 Термоелектронні перетворювачі

Термоелектронні перетворювачі являють собою вакуумні або газові прилади з твердими нагрівальними катодами. Перетворення теплової енергії в електричну здійснюється за рахунок використання термоелектронної емісії нагрітих тіл. Емітовані катодом Електрони рухаються до анода під дією різниці температур. Для забезпечення цієї різниці температур необхідно охолодження анода. У залежності від температури нагрівання катода термоелектронні перетворювачі діляться на низькотемпературні (1200 – 1600°С) і середньотемпературні (1900 - 2000° С). У середньотемпературних перетворювачів ККД досягає 20%, що більш ніж в 2 рази перевищує ККД термобатарей.

1.4. Фотоелектричні перетворювачі

Фотоелектричні перетворювачі здійснюють перетворення теплової і світлової енергії сонячних променів в електричну. Сонячні батареї являють собою ряд фотоелементів, з'єднаних між собою певним чином. Фотоелектричні перетворювачі використовуються в якості джерела електричної енергії для живлення малопотужної радіоапаратури, а також для живлення радіотехнічної та телеметричної апаратури на супутниках Землі і на автоматичних міжпланетних станціях. Сонячні батареї прості, мають дуже великий термін служби і працюють у великому діапазоні зміни температур.

1.5. Паливні елементи

Паливні елементи здійснюють безпосереднє перетворення енергії хімічних реакцій в електричну енергію. Дія таких елементів заснована на електричному окисненні речовини (палива), яке подібне реакції горіння палива. Однак на відміну від горіння в цих елементах окислення палива і відновлення кисню відбувається на різних електродах. Тому енергія виділяється в навантаженні безпрямісного перетворення в енергію іншого виду, що забезпечує високий ККД перетворювача. У паливних елементах хімічна реакція протікає при взаємодії активних речовин, які в твердому, рідкому або газоподібному стані безперервно надходять до електродів.

1.6. Біохімічні джерела струму

Біохімічні джерела струму можна розглядати як різноманітність паливних елементів, так як в них протікають подібні окисно-відновні процеси. Відмінність біохімічних елементів від паливних полягає в тому, що активні речовини (або одна з них) створюються за допомогою бактерій або ферментів з різних вуглеводів і вуглеців.

1.7. Атомні елементи

Атомні елементи застосовуються для живлення малопотужних пристроїв. Конструкція таких ДЖ різна в залежності від принципу їх дії. В елементах, що використовують β -випромінювання, на внутрішньому електроді розміщується радіоактивний ізотоп стронцію 90. Другим електродом є металева оболонка. Між електродами знаходиться твердий діелектрик або вакуум. Під дією β -променів на електродах створюються

заряди. Напруга в таких елементах може досягати декількох кіловольт, а внутрішній опір дуже великий (близько 10^{13} Ом). Розрядний струм не перевищує одного міліампера. Гідністю таких елементів є дуже великий термін служби. В елементах, що використовують контактну різницю потенціалів, використовуються електроди у вигляді пластинок з різних матеріалів. Одна з пластин покрита двоокисом свинцю, інша виготовлена з алюмінію. Між електродами знаходиться суміш інертного газу і радіоактивного тритію. Під дією випромінювання відбувається утворення іонних пар. Напруга між електродами визначається контактною різницею потенціалів. Під дією цієї напруги позитивно і негативно заряджені іони переміщуються до електродів. В елементах з опромінювати напівпровідниками радіоактивна речовина наноситься на поверхню напівпровідника (кремнію). Випромінювані електрони, що мають велику швидкість, вибивають з атомів напівпровідника велику кількість електронів. В результаті односторонньої провідності між напівпровідником і колектором, привареним до нього, виникає ЕРС величиною декількох десятих часток вольт. Внутрішній опір таких елементів 100 - 1000 Ом, ККД може досягати декількох відсотків. Недоліком є малий термін служби внаслідок руйнування напівпровідника під дією радіації.

1.8. Електромашинні генератори

Електромашинні генератори перетворюють механічну енергію в електричну. Вони діляться на генератори постійного та змінного струму. Машина змінного струму можуть бути як однофазними, так і багатофазними. Найбільш широке застосування знайшли трифазні синхронні і асинхронні генератори, дія яких заснована на використанні обертового магнітного поля. У синхронних машинах процес перетворення енергії відбувається при синхронній частоті, тобто коли частота обертання ротора дорівнює частоті обертання магнітного поля. В асинхронних машинах процес перетворення

енергії відбувається при асинхронній частоті, тобто коли частота обертання ротора відрізняється від частоти обертання магнітного поля.

1.8.1. Типи, основні дані генераторів постійного струму.

Генератори постійного струму застосовуються на малих і середніх літальних апаратах. На великих ЛА вони, як правило, використовуються тільки для живлення споживачів постійного струму. В авіації широке поширення одержали генератори серій ГСР, ГС і ГСК.

Таблиця 9.

Основні дані генераторів постійного струму

Тип	Потужність, кВт	Номинальний струм, А	Питома потужність, Вт/кг	Швидкість обертання, об/хв.	Маса, кг
ГСР-3000	3	10	274	4000-9000	11
ГСР-6000	6	200	326	4000-9000	18
ГСР-18000	18	600	435	4000-9000	41
ГСР-12КИС	12	420	370	4000-9000	32
ГС-12Т	12	400	400	4000-9000	30
ГС-18ТО	18	600	430	4000-9000	42
ГСК-1500	1/1,5	36/54	—	3800-5900	12
ГСР-СТ-12/40	12/40	400	370	4000-9000	32

Сучасні генератори постійного струму мають схему внутрішніх з'єднань із загальним мінусом, тобто таку, в якій один з кінців паралельної обмотки збудження наглухо приєднаний до мінуса генератора, а інший кінець через регульоване опір з'єднується з плюсом генератора.

Застосування схеми із загальним мінусом пов'язано з пристроєм бортової мережі. Якщо генератор буде мати схему внутрішніх з'єднань із загальним плюсом, то при замиканні дроту, що йде від затиску "Ш" до регульованого опору на корпусі, можливі надмірні підвищення напруги бортової мережі, що призведе до порушення роботи окремих споживачів і перегорання ламп розжарювання.

Самозбудження генератора відбувається від основних полюсів. Для того щоб генератор самовозбудиться необхідні наступні умови:

- а) ланцюг збудження повинен бути замкнутий;

б) магнітна система машини повинна володіти залишковим магнетизмом;

в) магнітне поле створюване струмом збудження, повинно посилювати а не послаблювати залишкове намагнічування;

г) опір ланцюга збудження повинно бути менше критичного опору при даній швидкості обертання;

Робота генераторів постійного струму характеризується наступними величинами:

- Напругою U ;
- Струмом навантаження I ;
- Струмом збудження I_v ;
- Частотою обертання n .

Зв'язок між ними аналітично встановити складно із - за кривою намагнічування, тому зазвичай залежність однієї величини від іншої при сталості інших величин зображують графічно.

1.8.2. Типи, основні дані генераторів змінного струму.

В даний час в системах, в яких основним джерелом енергії є генератор змінного струму або в змішаних СЕС застосовуються синхронні генератори. Промисловістю випускається досить велика кількість типів синхронних генераторів, які мають потужність від 7,5 до 120 кВ * А.

В якості джерел однофазного струму змінної частоти застосовуються генератори: СГО-8, СГО-12, СГО-30, СГО-7, 5, ГО-4ПЧ4. Джерелами трифазного струму змінної частоти є генератори: СГС-30В, СГС-7, 5В, СГС-30-8, СГС-4СП. Буквено-числове позначення генераторів означає:

- СГО - літаковий генератор однофазний;
- СГС - літаковий генератор синхронний;
- ГО - генератор однофазний;
- П - продув зустрічним потоком повітря;
- Ч - початкова буква номінальної частоти 400 Гц;
- 4-30 - номінальна потужність в кіловольт-амперах.

Основні дані генераторів змінного струму

Тип	Потужність, кВт	Номинальна напруга, В	Номинальний струм, А	Кількість фаз	Питома потужність, Вт/кг	Швидкість обертання, об/хв.	Маса, кг
СГО-8	8	115	69,5	1	260	4000-9000	31
СГО-12	12	120	100	1	370	3800-9100	33
СГО-30	30	208	144	1	770	7800-8400	39
СГС-7,5Б	7,5	120	36	3	470	4000-9000	16
СГС-30В	30	208	83,5	3	810	5700-6300	35
ГО-4ПЧ4	4	120	33,4	1	260	4000-9000	21,5

Синхронні авіаційні генератори виконуються з незалежним збудженням від бортової мережі постійного струму або від власного збудження. Обмотка збудження розташовується на роторі або статорі.

При розташуванні обмотки збудження на статорі генератори виконуються з явно вираженими полюсами. При розташуванні обмотки збудження на роторі магнітна система може бути як з явно, так і з неявно вираженими полюсами.

Вибір тієї чи іншої магнітної системи в основному визначається потужністю і частотою обертання генератора. У потужних генераторів якірня обмотка розташовується на статорі, так як при розташуванні її на роторі потрібні контактні кільця великих розмірів і зростає площа щіток для знімання великих струмів, що ускладнює конструкцію, зменшує надійність і збільшує розміри генераторів. При розміщенні обмотки збудження на роторі потрібні тільки два контактних кільця. При розміщенні обмотки якоря на статорі поліпшуються умови охолодження.

У генераторах з обмоткою збудження, розташованої на статорі, що мають явно виражені полюси (СГО-8, ГО-4ПЧ4), конструктивні матеріали статорів використовуються краще, тому що корпус генератора виконує функції

магнітопроводу. Такі генератори потужністю до 30 кВА мають масу приблизно на 15% менше, ніж маса генераторів з обмоткою збудження на роторі. У більш потужних генераторів ця перевага зникає через збільшену контактну систему якоря. Для отримання форми кривої напруги генератора змінного струму близької до синусоїдальної полюса якоря виконуються скошеними по поздовжній осі електричної машини.

1.8.3. Типи, основні дані безконтактних і комбінованих генераторів змінного струму.

Останнім часом на літальних апаратах все більше застосування знаходять безконтактні, в тому числі і комбіновані генератори змінного струму, що мають ряд істотних переваг, а саме:

- висока надійність роботи, особливо в розрядженій атмосфері на великих висотах, і менше нагрівання через відсутність контактних кілець і щіткових вузлів;
- можливість застосування статичних магнітних регуляторів напруги, замість малонадійних вугільних регуляторів;
- відсутність радіозавад;
- простота обслуговування та ін.

У РФ розроблені і знаходяться в серійному виробництві безконтактні авіаційні генератори змінного струму потужністю від 8 до 120 кВА типів ГТ і СГК.

Таблиця 11.

Основні ТТД генераторів

Тип	Потужність, кВА	Кількість фаз	Напруга, В	Номинальний струм, А	Частота струму, Гц	Частота обертання, об/хв.	Маса, кг	Примітки
ГТ-40ПЧ8	40	3	208	111	400	8000	47	
ГТ-60ПЧ8	60	3	208	167	400	8000	55	

ГТ-120ПЧ8	120	3	208	334	400	8000	90	
СГК-11/1,5КИ С	11/1,5	1/3	120	92/23,4	400	8000	36	
СГК-30/1,5	30/1,5	3/1	120	48/12,5	400	8000	37,5	
ГТ-120НЖ41 2	120	3	208	333	400	12000	32	ГП-22
ГТ-30НЖ412	30	3	208	83,3	400	12000	12,5	ГП-21
ПГЛ-40	40	3	208	110	400	12000	25	Інтегрального виконання

Таблиця 12.

Безконтактні генератори постійного струму

Тип	Потужність, кВА	Напруга, В	Номінальний струм, А	Частота обертання, об/хв	Маса, кг
ГСБ-18П	18	28,5	600	6900-12000	34
ГСР-20БК	20	28,5	700	4500-7600	33
ГСР-12КИС БК	12	28,5	420	4000-9000	20

1.9 Джерела вторинного електроживлення

Вони являють собою функціональні вузли РЕО або закінчені пристрої, що використовують енергію, одержувану від системи електропостачання або джерел первинного електроживлення і призначені для організації вторинного електроживлення радіоапаратури та пілотажного обладнання.

Висновок до розділу

Дослідивши все різноманіття джерел електроживлення можна зробити висновок що саме акумулятори і електромашинні генератори набули найбільшого поширення на повітряних суднах через свої переваги в експлуатації та якості генерування енергії.

Переваги акумуляторів:

- вони міцні;
- не бояться перевантажень;
- добре працюють в широкому інтервалі температур;
- невимогливі до виробничих умов;
- мають високу номінальну напругу;
- малий внутрішній опір та відносно високий ккд.

Преваги електромашинних генераторів:

- висока надійність роботи, особливо в розрядженій атмосфері на великих висотах, і менше нагрівання через відсутність контактних кілець і щіткових вузлів;
- можливість застосування статичних магнітних регуляторів напруги, замість малонадійних вугільних регуляторів;
- відсутність радіозавад;
- простота обслуговування та ін.

Проте сучасні досягнення в області термоенергетики і термоелектричних елементів дають змогу успішно проектувати й розробляти ефективні ТЕГ, що можуть стати альтернативою уже існуючим ДЖ на борту ПС.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

2.1. Природа термоелектрорушійної сили

Явищем термоелектрорушійної сили (ТЕРС або термо-ерс) називається виникнення різниці потенціалів на кінцях однорідного або неоднорідного (спаяного або зварного) матеріалу при створенні на його кінцях різниці температур.

$$\frac{d\phi_i}{dT} = \alpha \quad (2.1)$$

де $d\phi_i$ - зміна різниці потенціалів при зміні різниці температур на кінцях матеріалу; α - термо-ерс [В / К].

Розрізняють два механізми виникнення ТЕРС - контактний і об'ємний. При контакті двох металів з різною роботою виходу відбувається обмін електронами між цими металами (рис. 1).

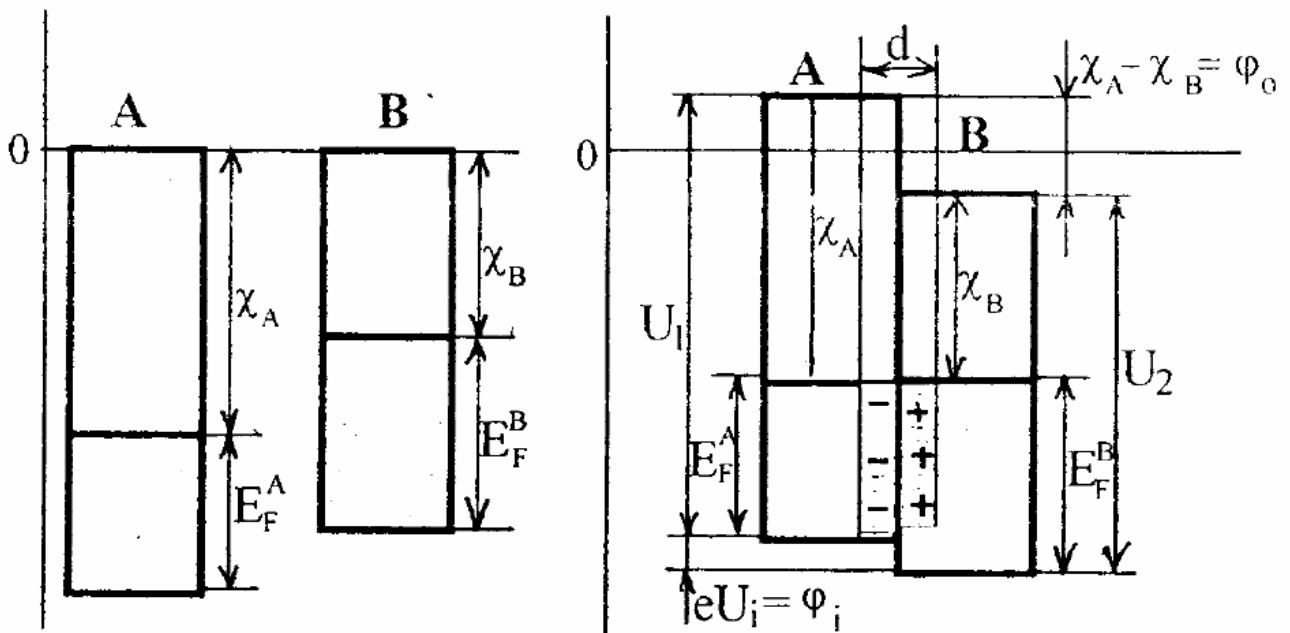


Рис. 2.1 Контакт металів з різною роботою виходу

Електрони з металу з меншою роботою виходу χ_B будуть переходити в метал з більшою роботою виходу χ_A і на межі двох металів виникає різниця потенціалів, зумовлена різницею зарядів у металах «А» і «В».

Між металами виникає електричне поле, локалізоване в шарі $d = 10^{-8}$ см. Спрямований потік електронів припиниться в момент вирівнювання рівнів Фермі.

Контактна різниця потенціалів визначається числом електронів що перейшли з «В» до «А». У свою чергу концентрація електронів в металі пов'язана з положенням рівня Фермі, μ :

$$\mu_0 = \frac{h^2}{2m^*} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \quad (2.2)$$

де n - концентрація електронів, m^* - ефективна маса електронів, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с - постійна Планка.

При зміні температури контакту величина різниці потенціалів на кінцях ланцюга визначається різницею енергій Фермі електронів металів «А» і «В», яка характеризується значенням енергій рівнів Фермі в них.

$$\varphi = \mu_B - \mu_A = \frac{h^2}{2} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \left(\frac{n_B^{2/3}}{m_B^*} - \frac{n_A^{2/3}}{m_A^*} \right) \quad (2.3)$$

Отже, внутрішня контактна різниця потенціалів на контакті двох металів визначається концентрацією електронів в ізольованих металах і їх ефективними масами. Для металів $d\varphi_1 \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ мВ. Значення α залежать від природи дотичних провідників і для будь-якої пари металів або металу і напівпровідника по різному.

Значення ТЕДС для більшості пар металів постійні у широкому діапазоні температур, що робить контакт металів, так звану термопару, зручним засобом вимірювання температури.

$$\Delta T = \frac{\Delta\varphi}{\alpha} \quad (2.4)$$

Так як такий контакт показує зміна різниці потенціалів при зміні температури від якоїсь початкової величини, наприклад кімнатної,

то для визначення температури необхідно до T додавати величину початкової температури (кімнатної).

$$T = T_k \frac{\Delta\varphi_i}{\alpha} \quad (2.5)$$

Найбільш поширена термопара мідь-константан (Cu-(Cu-Ni)) має термоЕРС $\alpha = 40$ мкВ / К.

У напівпровіднику мають місце контактна і об'ємна різниці потенціалів, обумовлені різницею температур на кінцях ланцюга. В однорідному напівпровіднику градієнт температури викликає появу як градієнта концентрації носіїв, так і градієнта їх середньої енергії, що є причиною руху зарядів, тобто електричного струму. У розімкнутому ланцюгу в стаціонарному стані щільність струму в усіх точках дорівнює нулю, що в даному випадку можливе лише при появі електричного поля, яке в кожній точці напівпровідника викликає струм, компенсуючий рух зарядів, обумовлений градієнтом температури. На зразку виникає електрорушійна сила, яку називають термоЕРС.

При вимірюванні ТЕРС на межах напівпровідника і вимірювальних металевих електродів існують контактні різниці потенціалів, які не дорівнюють один одному, внаслідок існуючого температурного градієнта. Вимірювальний прилад в цьому випадку фіксує ЕРС, рівну ТЕРС і різниці контактних потенціалів вимірювальних електродів.

Незалежно від характеру провідності (власна, домішкова або змішана) при невеликих концентраціях вільних носіїв з умови електронейтральності ($j = 0$) напівпровідника вираз для концентрації носіїв заряду має вигляд:

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{2/3} e^{-\Delta E/kT} \quad (2.6)$$

$\Delta E = (E_c - F)$ - енергетичний інтервал від рівня Фермі (F) до дна зони провідності E_c .

Предекспоненціальний член позначається N_c і є ефективною щільністю станів в зоні провідності. Для концентрації дірок

$$p = N_v e^{-(F-E_v)/kT} \quad (2.7)$$

Для невироджених і власних напівпровідників концентрація носіїв залежить від температури. При неоднаковому нагріванні в різних точках напівпровідника концентрації в зоні провідності будуть неоднаковими, зокрема на кінцях напівпровідника. Вільні електрони, надлишок яких утворюється на гарячому кінці зразка, будуть дифундувати з цієї області в область з меншою концентрацією - до холодного кінця. Для діркового напівпровідника явище зворотне, на гарячому кінці надлишок позитивних зарядів. В результаті дифузії зарядів гарячий кінець електронного напівпровідника заряджається позитивно. Таким чином, якщо напівпровідник домішковий, то напрямок внутрішнього електричного поля і полярність термоЕРС визначаються знаком носіїв заряду, як наслідок, за знаком термоЕРС можна визначити тип домішкової провідності досліджуваного зразка.

Електричне поле, що виникає в результаті дифузії носіїв між різнотемпературними кінцями напівпровідника, перешкоджає подальшій дифузії, і при динамічній рівновазі його величина і визначає ТЕРС.

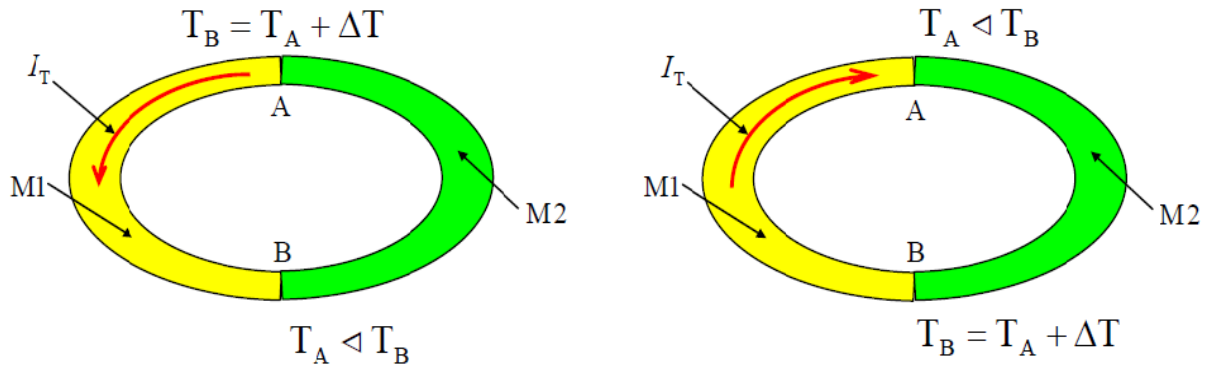
2.2. Термоелектричні явища

Всі термоелектричні явища відносяться до явищ переносу і обумовлені електричними або тепловими потоками, що виникають в середовищі при наявності електричних і теплових полів. Причиною всіх термоелектричних явищ є те, що середня енергія носіїв у потоці відрізняється від середньої енергії в стані рівноваги.

Так як в електричних схемах і приладах завжди є спаї і контакти різних провідників, то при коливаннях температури в місцях контактів виникають термоЕРС, які необхідно враховувати при точних вимірюваннях. До термоелектричним явищ відносяться ефекти **Зеебека**, **Пельтьє** та **Томсона**.

2.2.1. Ефект Зеебека

Ефект Зеебека - виникнення ЕРС (термоЕРС) в електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників M_1 і M_2 , якщо місця контактів (А, В) підтримуються при різних температурах. Якщо ланцюг замкнутий, то в ньому тече електричний струм (так званий термострум I_T), причому зміна знака у різниці температур спаїв супроводжується зміною напрямку термоструму (рис. 2.2).



Ланцюг, складений з двох різних провідників (M_1 , M_2), називається термоелементом або термопарою, а його гілки - термоелектродами.

Величина термоЕРС (\mathcal{E}_T) залежить від абсолютних значень температур спаїв (T_A , T_B), різниці цих температур ΔT і від природи матеріалів, що становлять термоелемент.

ТермоЕРС контуру визначається формулами:

$$d\mathcal{E}_T = \alpha_{12}dT \quad (2.8)$$

$$\mathcal{E}_T = \int_{T_B}^{T_A} \alpha_{12} dT \quad (2.9)$$

Тут α_{12} - коефіцієнт термоЕРС металу 1 по відношенню до металу 2, який є характеристикою обох металів термопари. На практиці це створює певні незручності. Тому умовилися величину α_{12} вимірювати по відношенню до одного і того ж металу, за який зручно прийняти свинець, тому для свинцю різниця потенціалів між його нагрітим і холодним кінцями дорівнює 0 (при низьких температурах, при середніх і високих температурах застосовується платина).

Значення коефіцієнтів термоЕРС металів M_1 і M_2 по відношенню до свинцю позначають відповідно α_1 і α_2 і називають абсолютними коефіцієнтами термоЕРС. Тоді $\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$.

У невеликому інтервалі температур (у всякому разі, для інтервалу порядку $0^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$):

$$\varepsilon_T = \alpha_{12}(T_A - T_B) = \alpha_{12}\Delta T \quad (2.10)$$

Напрямок термоструму визначається наступним чином: в більш нагрітому спаї струм тече від металу з меншим значенням α до металу, у якого коефіцієнт термоЕРС більше. Наприклад, для термопари залізо (M_1) - константан (M_2) абсолютні коефіцієнти термоЕРС відповідно рівні: $\alpha_1 = +15.0$ мкВ/К (для заліза) і $\alpha_2 = -38.0$ мкВ/К (для константану). Отже, струм в більш гарячому спаї спрямований від константану до заліза (від M_2 до M_1). Саме ця ситуація (коли $\alpha_2 < \alpha_1$) ілюструється для електричного кола, зображеного на рис. 3.

Коефіцієнт термоЕРС визначається фізичними характеристиками провідників, складових термоелемент: концентрацією, енергетичним спектром, механізмами розсіювання носіїв заряду, а також інтервалом температур. У деяких випадках при зміні температури відбувається навіть зміна знака α .

ТермоЕРС зумовлена трьома причинами:

- 1) температурної залежністю найвищого енергетичного рівня, зайнятого електронами, що призводить до появи контактної складової термоЕРС;
- 2) дифузією носіїв заряду від гарячого кінця до холодного, визначальною об'ємну частину термоЕРС;
- 3) впливом на електрони звукової хвилі, що розповсюджується в кристалі.

Розглянемо **першу причину**. Незважаючи на те, що в провідниках властивості електронного газу істотним чином відрізняються від класичних, для розуміння термоелектричних явищ ця залежність має принципіальне значення. Якщо обидва спаї термоелемента знаходяться при одній і тій же температурі, то контактні різниці потенціалів рівні і спрямовані в протилежні сторони, тобто компенсують один одного. Якщо ж температура спаїв різна, то

будуть неоднакові і внутрішні контактні різниці потенціалів. Це веде до порушення електричного рівноваги і виникненню контактної термоЕРС:

$$\varepsilon_{12}^k = \int_{T_B}^{T_A} \alpha_{12}^k dT = \int_{T_B}^{T_A} (\alpha_1^k - \alpha_2^k) dT \quad (2.11)$$

$$\alpha^k = -\frac{1}{e} \frac{\delta E_F}{\delta T} \quad (2.12)$$

де E_F - найвищий енергетичний рівень, зайнятий електронами; k - постійна Больцмана; e - заряд електрона.

Для вільних електронів α^k лінійно змінюється з температурою.

Друга причина обумовлює об'ємну складову термоЕРС, пов'язану з неоднорідним розподілом температури в провіднику. Якщо градієнт температури підтримується постійним, то через провідник буде йти постійний потік тепла. У металах перенесення тепла здійснюється в основному рухом електронів провідності. Виникає дифузійний потік електронів, спрямований проти градієнта температури. В результаті, концентрація електронів на гарячому кінці зменшиться, а на холодному збільшиться. В середині провідника виникне електричне поле E_T , спрямоване проти градієнта температури, яке перешкоджає подальшому поділу зарядів (рис. 4).

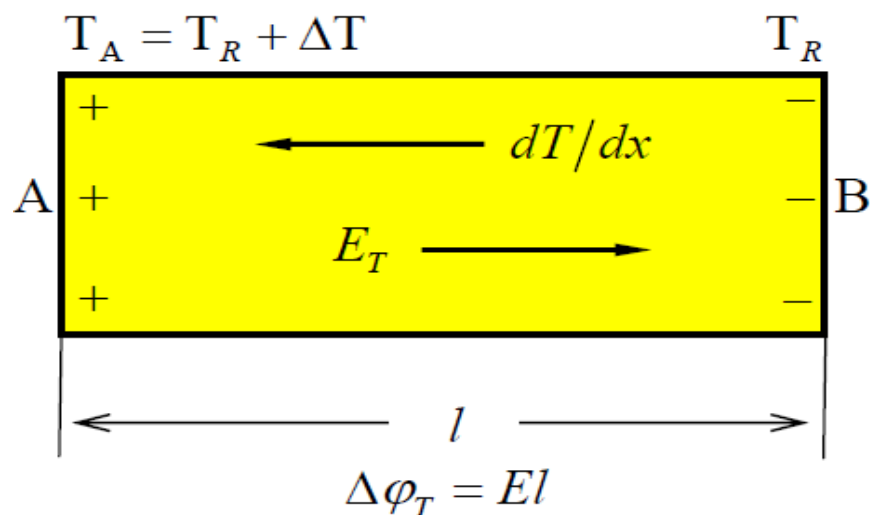


Рис.2.3 Виникнення термоЕРС в однорідному матеріалі внаслідок просторової неоднорідності температури

Напруженість утворюваного термоелектричного поля визначається градієнтом температури уздовж зразка ($E_T = \alpha \cdot dT / dx$), а різниця потенціалів (термоЕРС) - різницею температур ($\Delta\phi_T = \alpha \cdot \Delta T$).

Таким чином, в рівноважному стані наявність градієнта температури вздовж зразка створює постійну різницю потенціалів на його кінцях. Це і є дифузійна (або об'ємна) складова термоЕРС, яка визначається температурною залежністю концентрації носіїв заряду і їх рухливістю. Електричне поле виникає в цьому випадку в об'ємі металу, а не на самих контактах.

У разі позитивних носіїв заряду (дірки) нагрітий кінець зарядиться негативно, а холодний позитивно, що призведе до зміни знака термоЕРС. В провідниках змішаного типу від гарячого кінця до холодного дифундують одночасно і електрони, і дірки, збуджуючи електричні поля в протилежних напрямках. У деяких випадках ці поля компенсують один одного, і ніякої різниці потенціалів між кінцями не виникає. Саме такий випадок має місце у свинці.

Третє джерело термоЕРС - вплив на електрони звукової хвилі, що розповсюджується в кристалі. При наявності градієнта температури вздовж провідника виникає звукова хвиля, що розповсюджується від гарячого кінця до холодного і передаючи енергію електронам. В результаті, поблизу холодного кінця зразка буде накопичуватися негативний заряд (а на гарячому - позитивний) до тих пір, поки виникша різниця потенціалів не врівноважить цей ефект. Ця різниця потенціалів і являє собою додаткову складову термоЕРС, внесок якої при низьких температурах стає визначальним.

Необхідно відзначити, що другий і третій доданки термоЕРС мають один і той же знак, у той час як контактна термоЕРС, як правило, протилежна їм по знаку.

Математичні виклади для строгого опису термоЕРС досить складні. Взагалі, причина всіх термоелектричних явищ – порушення теплової рівноваги в потоці.

Якщо вважати, що залежність провідності металів (σ) від енергії (E) досить слабка, то для вільних електронів виходить формула:

$$\alpha = \frac{\pi^2 k^2 T}{3eE_F} \quad (2.13)$$

Абсолютні значення всіх термоелектричних коефіцієнтів зростають із зменшенням концентрації носіїв. У металах концентрації вільних електронів дуже великі і не залежать від температури. Тому термоЕРС "класичних" металів дуже мала (порядку декількох мкВ/К). Для напівпровідників α може перевищувати 1000мкВ/К. У таблиці 2.1 наведені значення α деяких металів (по відношенню до свинцю) для інтервалу температур $0^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}$ (позитивний знак α приписаний тим металам, до яких тече струм через нагрітий спай).

Таблиця 2.1

Значення α деяких металів по відношенню до свинцю

Метал	α , мкВ/К
Платина	-4.4
Олово	-0.2
Свинець	0.0
Срібло	+2.7
Мідь	+3.2
Сурьма	+4.3

2.2.2. Ефект Пельтьє

Ефект Пельтьє - термоелектричне явище, зворотне ефекту Зеебека: при пропусканні електричного струму I через контакт двох різних провідників або напівпровідників на контакті, крім джоульового тепла, відбувається виділення додаткового тепла Пельтьє Q_P при одному напрямі струму і його поглинання при зворотному напрямку.

Величина випромінюваного тепла Q_P і його знак залежать від виду контактуючих речовин, сили струму і часу його проходження:

$$dQ_P = \pi_{12} I dt \quad (2.14)$$

Тут $\pi_{12} = \pi_1 - \pi_2$ - коефіцієнт Пельтьє для даного контакту, зв'язаний з абсолютними коефіцієнтами Пельтьє π_1 і π_2 контактуючих матеріалів. При цьому вважається, що струм йде від першого зразка до другого. При виділенні тепла Пельтьє маємо: $Q_p > 0, \pi_{12} > 0, \pi_1 > \pi_2$. При поглинанні тепла Пельтьє воно вважається негативним і відповідно: $Q_p < 0, \pi_{12} < 0, \pi_1 < \pi_2$. Очевидно, що $\pi_{12} = -\pi_{21}$. Розмірність коефіцієнта Пельтьє $[\pi]_{\text{СИ}} = \text{Дж/Кл} = \text{В}$. Замість тепла Пельтьє часто використовують потужність тепловиділення, обумовлену тепловою енергією, що миттєво виділяється на контакті одиничної площі за одиницю часу:

$$q_p = \pi_{12} j \quad (2.15)$$

де $j = I/S$ - щільність струму; S - площа контакту; розмірність цієї величини $[q_p]_{\text{СИ}} = \text{Вт/м}^2$.

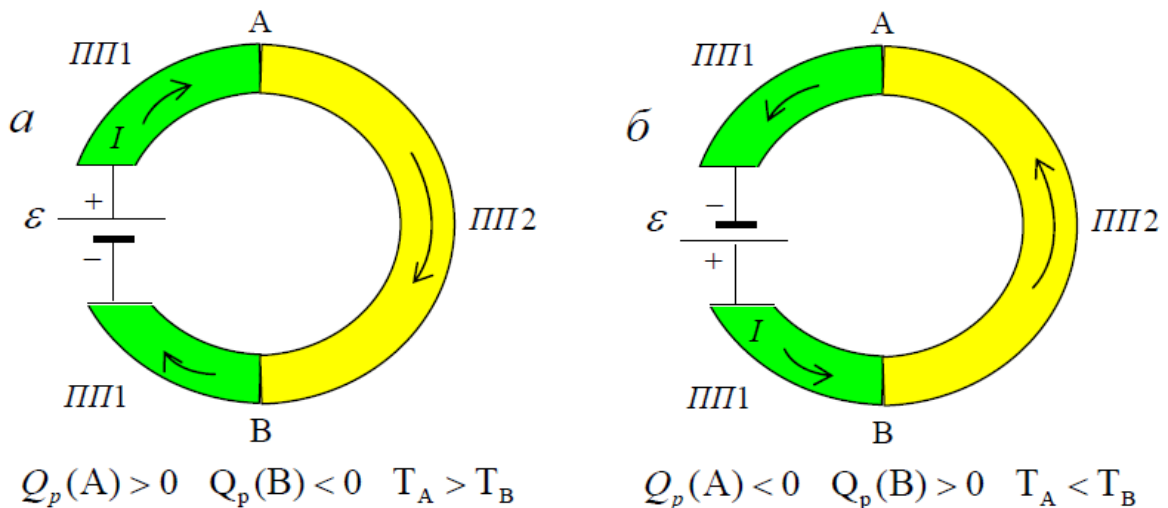


Рис.2.4. Виділення і поглинання тепла Пельтьє (контакт А)

Розглянемо замкнутий ланцюг, складений з двох різних напівпровідників ПП₁ і ПП₂ з контактами А і В.

Через ланцюг тече струм I , створений зовнішнім джерелом ε . Рис. 2.4а ілюструє ситуацію, коли на контакті А (струм тече від ПП₁ до ПП₂) відбувається виділення тепла Пельтьє $Q_p(A) > 0$, а на контакті В (струм направлений від ПП₂ до ПП₁) його поглинання - $Q_p(B) < 0$. У результаті відбувається зміна температур спаїв: $T_A > T_B$.

На рис. 2.4 б зміна знака джерела змінює напрямок струму на протилежне: від ПП₂ до ПП₁ на контакті А і від ПП₁ до ПП₂ на контакті В. Відповідно змінюється знак тепла Пельтьє і співвідношення між температурами контактів: $Q_P(A) < 0$, $Q_P(B) > 0$, $T_A < T_B$.

Ефект Пельтьє виникає на контакті двох металевих провідників або напівпровідників. Носії струму по різні боки спаю мають різну середню енергію, яка залежить від багатьох причин: енергетичного спектру, концентрації, механізму розсіювання носіїв заряду. Якщо носії, пройшовши через спай, потрапляють в область з меншою енергією, вони передають надлишок енергії кристалічній решітці, в результаті чого поблизу контакту відбувається виділення теплоти Пельтьє ($Q_P > 0$) і температура контакту підвищується. При цьому на іншому спаї носії, переходячи в область з більшою енергією, запозичують відсутню енергію від решітки, відбувається поглинання теплоти Пельтьє ($Q_P < 0$) і зниження температури.

2.2.3. Ефект Томсона

Ефект Томсона полягає в наступному: при пропусканні електричного струму через провідник, уздовж котрого існує градієнт температури, в провіднику, крім джоульового тепла, в залежності від напрямку струму буде виділятися або поглинатися додаткова кількість тепла.

Нерівномірне нагрівання спочатку однорідного провідника змінює його властивості, роблячи провідник неоднорідним. Тому явище Томсона це, по суті, своєрідне явище Пельтьє з тією різницею, що неоднорідності викликана не відмінністю хімічного складу провідника, а неоднаковістю температури.

Теоретичні розрахунки показують, що явище Томсона підпорядковується наступному закону, записаному в диференціальній формі:

$$Q_{\tau}^S = \tau * j * \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

де Q_{τ}^S - тепло Томсона, що виділяється (або поглинається) за одиницю часу в одиниці об'єму провідника (питома теплова потужність);

τ - коефіцієнт Томсона, залежний від природи металу та його температури.

Для відрізка провідника x , вздовж якого тече струм I і є деякий перепад температур:

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} \Delta x \quad (2.17)$$

Закон Томсона в інтегральній формі визначає повну кількість тепла Томсона Q , що виділилася (або поглинулася) у всьому розглянутому об'ємі провідника ($\Delta V = S \cdot \Delta x$) за час t :

$$Q_\tau = Q_\tau^S \Delta V * t \quad (2.18)$$

При цьому ефект Томсона вважається позитивним, якщо електричний струм, поточний в напрямку градієнта температури (dT/dx), викликає нагрівання провідника ($Q_\tau > 0$), і негативним, якщо при тому ж напрямку струму відбувається охолодження провідника ($Q_\tau < 0$).

$$Q_\tau = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t \quad (2.19)$$

Для пояснення ефекту Томсона необхідно розглянути вплив двох факторів. Перший фактор враховує зміну середньої енергії електронів вздовж провідника через його нерівномірне нагрівання (див. рис. 2.5а і 2.5б).

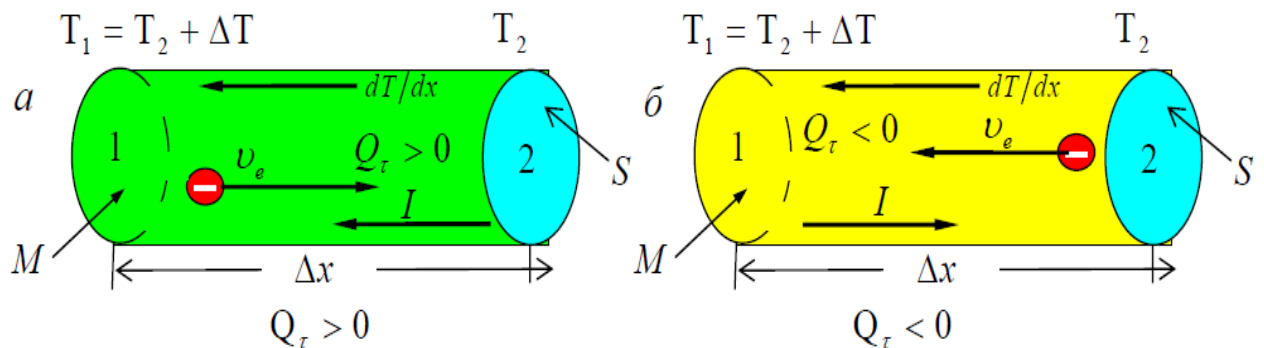


Рис 2.5. Виділення тепла Томсона при паралельності (а) і антипаралельності (б) струму і градієнта температури в зразку

Нехай $T_1 > T_2$, тобто градієнт температури направлений від точки 2 до точки 1. У більш нагрітій частині провідника (1) середня енергія електронів більше, ніж у менш нагрітій (2). Тому, якщо напрямок струму в металі (М) відповідає руху електронів від гарячого кінця до холодного (рис. 2.5а), то електрони передають свою надлишкову енергію кристалічній решітці, в результаті чого відбувається виділення теплоти Томсона ($Q_\tau > 0$).

При зворотному напрямі струму (рис. 2.5б) електрони, рухаючись від холодного кінця (2) до нагрітого (1), будуть поповняти свою енергію за рахунок решітки, що призведе до поглинання відповідної кількості теплоти ($Q_T < 0$).

Для більш точного опису явища необхідно врахувати другий фактор, який пов'язаний з електричним полем термоЕРС, що виникає в умовах неоднорідності температури (рис. 2.6а та 2.6б).

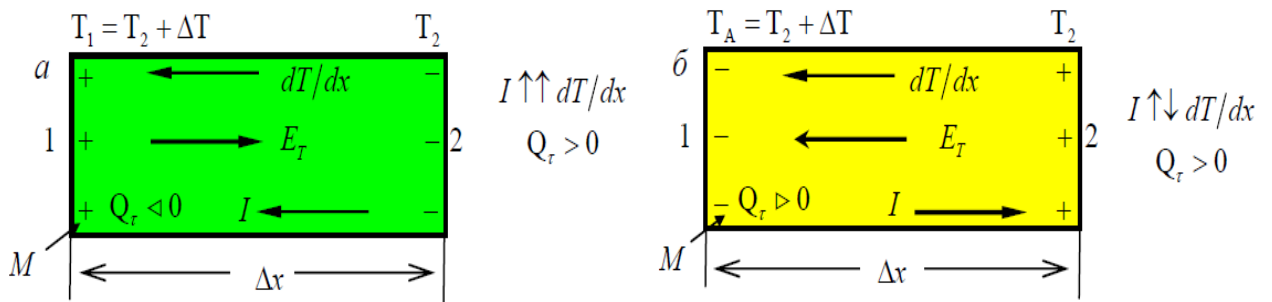


Рис.2.6. Охолодження (нагрівання) провідника при гальмуванні (прискоренні) електронів дифузійним електричним полем просторового заряду

Якщо градієнт температури підтримується постійним, то через провідник буде йти постійний потік тепла. У металах перенесення тепла здійснюється в основному рухом електронів провідності (e). Виникає дифузійний потік електронів, спрямований проти градієнта температури (від 1 до 2). У результаті концентрація електронів на гарячому кінці зменшиться, а на холодному збільшиться. Всередині провідника виникне електричне поле E_T , спрямоване від 1 до 2, тобто проти градієнта температури, яке перешкоджає подальшому поділу зарядів. Якщо тепер через провідник пропустити струм I від зовнішнього джерела в напрямку градієнта температури (Рис. 2.5а і рис. 2.6а), то електричне поле E_T (пов'язане з термоЕРС) буде гальмувати електрони, що призводить до охолодження ділянки 1-2 ($Q_T < 0$).

На рис. 2.6б зображена зворотна ситуація: електричне поле термоЕРС E_T прискорює електрони провідності, внаслідок чого на ділянці провідника 1-2 відбувається виділення тепла Томсона ($Q_T > 0$).

Таким чином, порівняння малюнків 2.5а – 2.6а та 2.5б – 2.6б показує, що розглянуті фактори діють у протилежних напрямках, визначаючи не лише

величину, а й знак τ і $Q\tau$. Величина коефіцієнта Томсона для більшості металів досить мала і не перевищує $\tau \approx 10^{-5}$ В/К.

2.3. Застосування термоелектричних явищ

Найбільш важливою технічною реалізацією ефекту Зеебека в металах є термопара – термочутливий елемент в пристроях для вимірювання температури. Термопара складається з двох послідовно з'єднаних пайкою або зварюванням різнорідних металевих провідників M_1 і M_2 . У поєднанні з електровимірювальними приладами термопара утворює термоелектричний термометр, шкала якого градується безпосередньо в К або С.

У місцях підключення провідників термопари до вимірювальної системи виникають додаткові термоЕРС. В результаті їх дії на вхід вимірювальної системи фактично надходить сума сигналів від робочої термопари і від "термопар", що виникли в місцях підключення T_B (рис. 2.7).

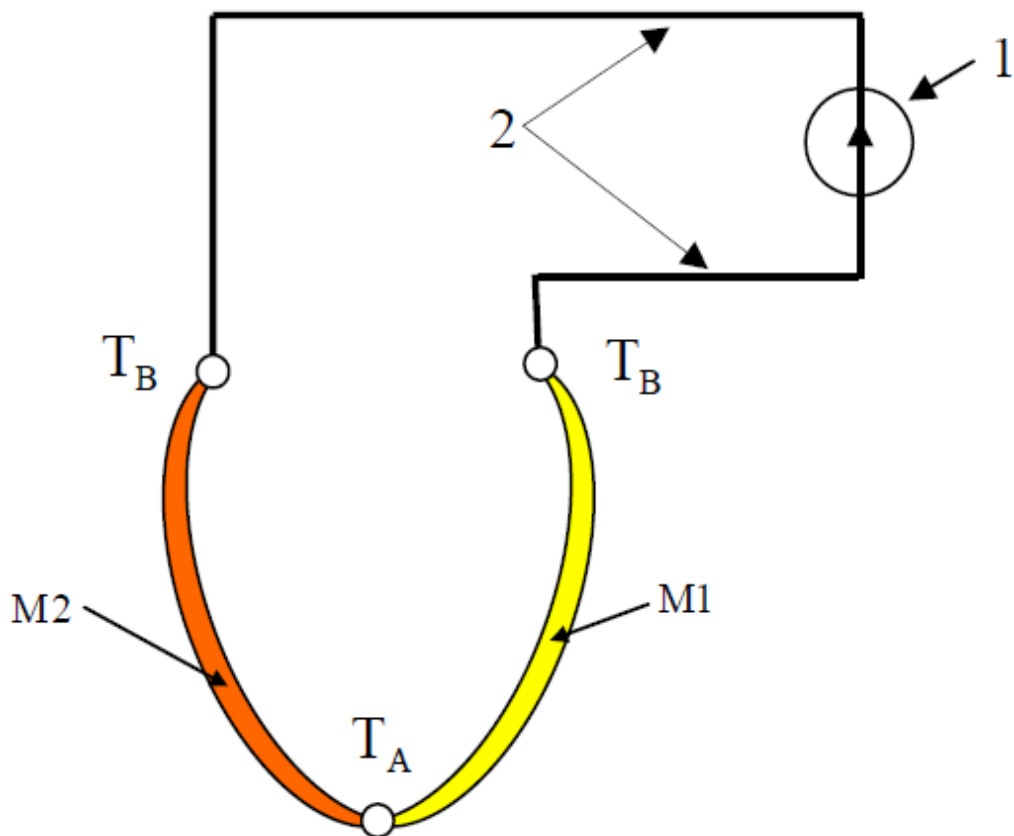


Рис. 2.7. Схема підключення термопар

Компенсувати їх вплив можна, з'єднавши три металевих провідника M_1 , M_2 , M_3 і підтримуючи температуру одного спаю постійною (зазвичай при 273К - за допомогою танучого льоду) (рис. 2.8а). ТермоЕРС контактів підключення компенсують один-одного, так як контакти складаються з

однакових матеріалів і знаходяться при однаковій температурі. На жаль, цей спосіб не завжди зручний на практиці.

Зараз в промислових системах широко використовується техніка "компенсації холодного спаю". Цей метод полягає в тому, що температура холодного спаю вимірюється іншим датчиком температури, а потім величина термоЕРС холодного спаю програмно або апаратно віднімається з сигналу термопари (рис. 2.8 б).

Місця підключення термопари до вимірювальної системи повинні мати однакову температуру, тобто знаходиться в ізотермальній зоні. Крім того, у схемі з компенсацією холодного спаю в цій же зоні повинен знаходитись і датчик температури холодного спаю.

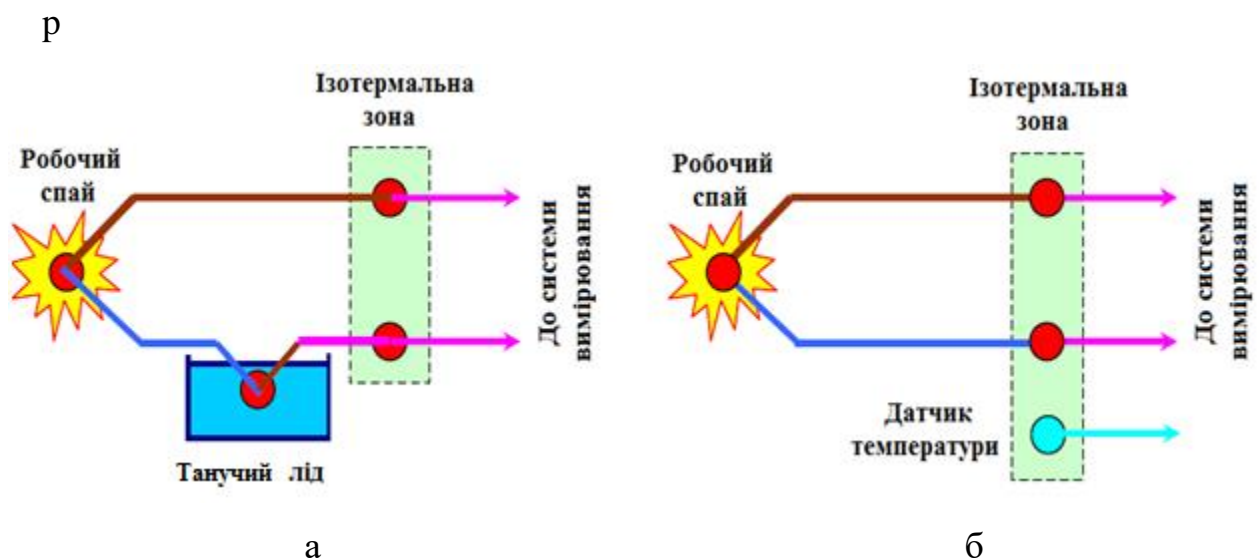


Рис. 2.8 Способи підключення термопар

Діапазон температури, вимірюваних за допомогою термопар, дуже великий: від гелієвих, до декількох тисяч градусів. У таблиці 2.2 наведено основні характеристики використовуваних термопар.

Із законів термодинаміки випливає, що коефіцієнт Пельтьє і коефіцієнт термоЕРС α_{12} пов'язані співвідношенням:

$$\pi = \alpha_{12} \cdot T \quad (2.20)$$

де T - абсолютна температура контакту.

Коефіцієнт Пельтьє, є важливою технічною характеристикою матеріалів, як правило, не вимірюється, а обчислюється за коефіцієнтом термоЕРС.

Коефіцієнт Пельтьє, що визначає кількість тепла Пельтьє, що виділяється на контакті, залежить від природи контактують речовин і температури контакту: $\pi_{12} = \alpha_{12} * T = (\alpha_1 - \alpha_2) * T$, де α_1 і α_2 - абсолютні коефіцієнти термоЕРС контактуючих речовин. Якщо для більшості пар металів коефіцієнт термоЕРС має порядок $10^{-5} \div 10^{-4}$ В/К, то для напівпровідників він може виявитися набагато більше (до $1.5 \cdot 10^{-3}$ В/К).

Основні напрямки практичного використання ефекту Пельтьє в напівпровідниках: отримання холоду для створення термоелектричних охолоджуючих пристроїв, підігрів з метою опалення, термостатування, управління процесом кристалізації в умовах постійної температури.

Термоелектричний метод охолодження має переваги в порівнянні з іншими методами охолодження. Термоелектричні пристрої відрізняються простотою управління, можливістю тонкого регулювання температури, безшумністю, високою надійністю роботи. Основний недолік термоелектричних пристроїв - мала величина ефективності, що не дозволяє їх використовувати для промислового отримання «холоду».

Термоелектричні охолоджуючі пристрої застосовуються в побутових і транспортних холодильниках, термостатах, для охолодження і термостатування термочутливих елементів радіоелектронної й оптичної апаратури, для управління процесом кристалізації, в медико-біологічних приладах і т.д.

Основним технологічним вузлом усіх термоелектричних охолоджуючих пристроїв є термоелектрична батарея, набрана з послідовно з'єднаних термоелементів. Так як металеві провідники мають слабкі термоелектричні властивості, термоелементи робляться з напівпровідників, причому одна з гілок термоелемента повинна складатися з чисто діркового (р-тип), а інша з чисто електронного (n-тип) напівпровідника. Якщо вибрати такий напрямок

струму, при якому на контактах, розташованих усередині холодильника тепло Пельтьє буде поглинатися, а на зовнішніх контактах виділятися в навколишній простір, то температура всередині холодильника буде знижуватися, а простір поза холодильником нагріватися.

Сучасні термоелектричні охолоджуючі пристрої забезпечують зниження температури від +20°C до 200°C; їх холодопродуктивність, як правило, не більше 100 Вт.

У комп'ютерній техніці термоелектричні охолоджуючі пристрої мають жаргонна назва "кулери" (від англійського cooler - охолоджувач).

Коефіцієнт Томсона пов'язаний з коефіцієнтами Пельтьє π і термоЕРС α співвідношенням Томсона:

$$\tau = -\frac{\partial \pi}{\partial T} + \alpha = -T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (2.21)$$

З вимірювань коефіцієнта Томсона можна визначити коефіцієнт термоЕРС одного матеріалу, а не різницю коефіцієнтів двох матеріалів, як при безпосередньому вимірі α і π . Це дозволяє, вимірявши τ і визначивши з нього α в одному з металів, отримати абсолютну термоелектричну шкалу. Ефект Томсона не має технічного застосування, однак його необхідно враховувати в точних розрахунках термоелектричних пристроїв.

Висновок до розділу

Система термоелектричного генерування заснована на прямому перетворенні теплової енергії в електричну, причому частина тепла від гарячого джерела в системі перетворюється в електрику, а решта тепла відводиться в навколишнє середовище. Характеристики системи визначаються головним чином температурами гарячої й холодної поверхонь термоелектричного модуля, які у свою чергу залежать від температур джерела й стоку тепла, від теплових опорів між термоелектричним модулем і джерелом тепла, а також модулем і стоком тепла.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ТЕРМОГЕНЕРАТОРА ІЗ СЕКЦІЙНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Система термоелектричного генерування заснована на прямому перетворенні теплової енергії в електричну, причому частина тепла від гарячого джерела в системі перетворюється в електрику, а решта тепла відводиться в навколишнє середовище. Характеристики системи визначаються головним чином температурами гарячої й холодної поверхонь термоелектричного модуля, які у свою чергу залежать від температур джерела й стоку тепла, від теплових опорів між термоелектричним модулем і джерелом тепла, а також модулем і стоком тепла.

За теперішньої енергетичної кризи використання відпрацьованого тепла для термоелектричного генерування є досить перспективним напрямком. Певна незручність такого застосування обумовлена низькою температурою теплового джерела, що знижує ККД. До того ж необхідно знати теплові опори теплообмінників, розміщених на холодній і гарячій поверхнях.

Сучасні термоелектричні матеріали мають максимальне значення добротності в порівняно вузькому інтервалі температур. Ці інтервали значно менші за робочий діапазон, у якому можуть працювати термоелектричні генератори. Тому однокаскадні модулі з однорідних матеріалів ефективно працюють лише за умов невеликих перепадів температур (100-300 К), що обмежує їх ККД.

ККД генераторів можна підвищити, використовуючи термоелементи з дискретнонеоднорідних матеріалів.

Вітки такого термоелемента складаються з окремих секцій.

Секції можуть бути виготовлені з однакового термоелектричного матеріалу, але з різною концентрацією домішок, яка є оптимальною для

робочого діапазону температур кожної окремої секції. Такі дискретно-неоднорідні термоелементи називаються концентраційними.

Значно ширші можливості підвищення ефективності перетворення енергії мають термоелементи, у яких секції виготовлені з різних термоелектричних матеріалів. Для кожної секції можна підібрати матеріал відповідно до інтервалу температур таким чином, щоб забезпечити максимальну добротність. Основні вимоги для створення таких термоелементів - подолання технологічних труднощів, пов'язаних з хімічною й термічною сумісністю матеріалів.

Однак, крім цих технологічних труднощів, з розробкою секційних термоелементів виникає проблема електричної узгодженості секцій. Струм, який проходить у секціях віток термоелементів, має бути однаковим, інакше виникатимуть паразитні втрати електричної потужності на внутрішніх опорах секцій з малою термоЕРС і більшим опором. У той же час величина струму має бути близькою до її оптимального значення в кожній секції. Тому оптимізація на етапі проектування генераторних модулів із секційних термоелементів, яка включає вибір термоелектричних матеріалів для секцій, їх оптимальних геометричних розмірів і робочих інтервалів температур, має враховувати електричну узгодженість секцій. Це складна задача, яку не можна розв'язати аналітичними методами. Для її розв'язання використовувались лише наближені методи. Застосуванням наближених методів проектування можна якоюсь мірою пояснити той факт, що експериментальні дослідження перших варіантів, розроблених генераторних модулів із секційних термоелементів, показали значно гірші характеристики, ніж теоретично передбачалось .

З цим актуальним завданням пов'язані й застосування реалістичної моделі для проектування й оптимізації генераторних модулів із секційних термоелементів.

Мета цього розділу - розробка методу проектування генераторних модулів із секційних термоелементів, удосконалення технології

виготовлення таких модулів з матеріалів на основі *Bi-Te*, а також теоретичне й експериментальне дослідження їх характеристик.

Метод дає можливість проектувати оптимальні секційні термоелементи як з різних матеріалів, так і концентраційні термоелементи. Якщо використовуються різні матеріали, то їх характеристики мають узгоджуватися відповідно до умови:

$$s = \frac{Z_i}{(1 + \sqrt{1 + Z_i \bar{T}_i}) \alpha_i} = \text{const},$$

(1)

де \bar{T}_i , α_i , Z_i - середня температура, коефіцієнт Зеєбека й добротність матеріалу i -ої секції, s - фактор узгодженості матеріалів секцій.

У випадку проектування концентраційних термоелементів метод дає можливість визначити для кожної секції оптимальні концентрації домішок, які узгоджуються з оптимальними геометричними розмірами й робочими інтервалами температур сегментів.

3.1. Особливості технології виготовлення генераторних модулів із двосекційних термоелементів

Схеми секційного термоелемента й генераторного модуля показано на рис. 3.1, рис. 3.2.

Секційні вітки виготовляються методом пайки двох дисків, вирізаних з матеріалів для „гарячого" і „холодного" сегментів, з подальшим нарізуванням їх на окремі вітки. Досягнення максимального значення ККД можливе за умови якісного й надійного контакту між сегментами, який здійснюється за допомогою припою. Отже, вибір припою є важливим технологічним моментом.

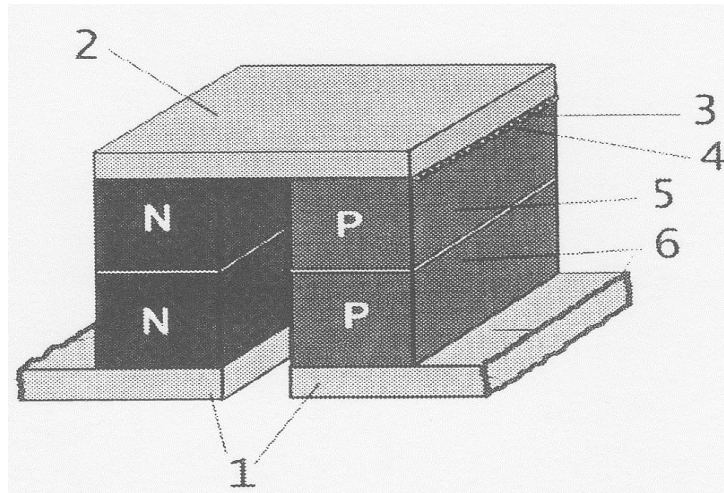


Рис. 3.1 Схема секційного термоелемента: 1 — комутація „холодної“ поверхні; 2 — комутація „гарячої“ поверхні; 3 — нікель; 4 - вольфрамовий провідник; 5 — гарячий сегмент вітки; 6 — холодний сегмент вішки.

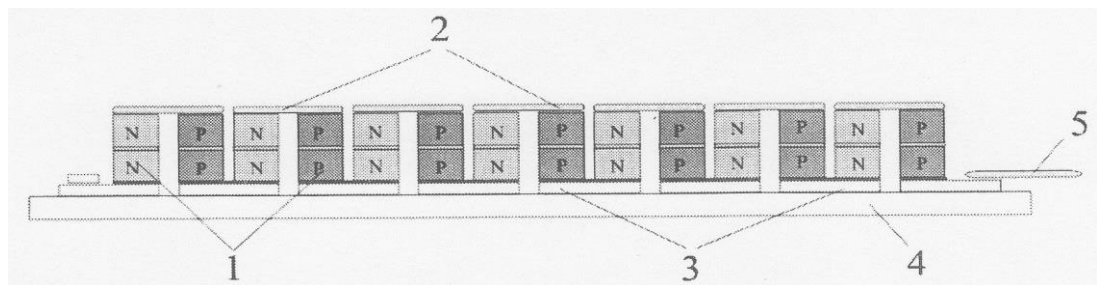


Рис. 3.2 Схема термоелектричного генераторного модуля із секційних віток; 1 — секційні вітки р- і n-типу провідності; 2 — комутація на гарячій поверхні; 3 - комутація на холодній поверхні; 4 — керамічна пластина; 5 — електричні виводи.

3.2. Проектування та розрахунок генераторних модулів із секційних термоелементів

Фізичну модель секційного термоелемента, яка використовується для проектування, показано на рис. 3.3.

Вітки n- і р-типу провідності складаються з N_n і N_p секцій відповідно. У загальному випадку секції можуть бути виготовлені з різних термоелектричних матеріалів. Температури на тепловиділяючих і теплопоглинальних поверхнях термоелемента фіксовані, бічна поверхня адіабатично ізольована. Модель урахує наявність контактних опорів r_n і r_p

поблизу тепловиділяючих і теплопоглинальних спаїв і на границях між секціями.

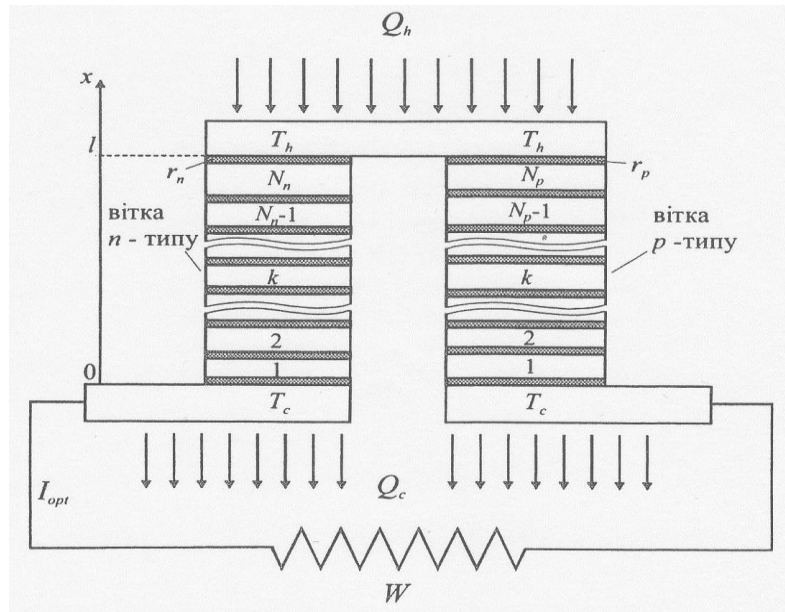


Рис. 3.3 Модель генераторного секційного термоелемента.

Система рівнянь, яка описує теплові й електричні процеси, що відбуваються в нескінченно малій частині dx кожної k -ої секції віток n - і p -типів провідності, має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha_k i}{k_k} T - \frac{i}{k_k} q, \\ \frac{dq}{dx} &= -\frac{\alpha_k^2 i}{k_k} T + \frac{\alpha_k i}{k_k} q + \frac{i}{\sigma_k} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} k=1, \dots, N_{n,p} \\ n,p \quad x_{k-1} \leq x \leq x_k \end{array} \quad (2)$$

Питомі потоки тепла q і густина електричного струму i визначаються співвідношеннями:

$$q = \frac{Q}{l}, \quad i_{n,p} = \frac{I}{S_{n,p}} \quad (3)$$

де Q — потужність теплового потоку, що проходить через вітку термоелемента, I - величина генерованого струму, $S_{n,p}$ - площа поперечного перерізу n - і p -віток термоелемента. Необхідні для розв'язку (3) багатоточкові крайові умови для кожної вітки записуються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} T_{n,p}(0) &= T_0, & T_{n,p}(l) &= T_h, \\ T_{n,p}(x_k^+) &= T_{n,p}(x_k^-), & q_{n,p}(x_k^+) &= q_{n,p}(x_k^-) + (r_{n,p}/S_{n,p})I \end{aligned} \quad (4)$$

де індекси "-" і "+" відносяться до значень функцій безпосередньо ліворуч і праворуч від границі сусідніх секцій x_k , l - висота віток термоелемента.

3.2.1. Обґрунтування вибору вихідних даних для розрахунку ТЕБ

Розроблюваний ТЕГ планується впроваджувати у вихідне сопло (сопло Лавалю) двигуна Д-436, а отже дані по температурах холодного і гарячого споїв потрібно брати опираючись на ТВГ за турбіною двигуна на різних режимах польоту:

- максимальний надзвичайний.....701⁰С;
- злітний.....670⁰С;
- максимальний тривалий.....632⁰С;
- максимальний крейсерський.....609⁰С;
- режим 0,7МП.....538⁰С;
- режим 0,2МП.....451⁰С;
- польотний малий газ(ПМГ).....402⁰С;
- земний малий газ(ЗМГ).....386⁰С;
- максимальний реверс.....632⁰С;

Для стабільної роботи проектного ТЕГ оптимальним буде максимальний крейсерський режим двигуна при польоті на ешелоні так як температура вихідних газів - 609⁰С, а температура повітря навколишнього середовища на висоті крейсерського польоту (тропопауза) складає - 50⁰С.

3.2.2. Вибір матеріалів для ТЕГ

Для реалізації авіаційного термогенератора доцільно взяти телурид свинцю та телурид германію.

Телурид свинцю PbTe має n-провідність. Термоелектричні властивості PbTe покращуються легуванням або створенням на його основі твердих розчинів. Донорною домішкою, що створює n-провідність, можуть бути галогени, котрі вводяться зазвичай в вигляді солей PbCl₂ і т.п. При цьому концентрація електронів в телуриді свинцю може бути збільшена до $2 \cdot 10^{20}$ 1/см³. В якості донорних домішок використовуються також вісмут,

сурма, мідь, цинк, алюміній та ін. Основні властивості PbTe наступні (в оптимальному інтервалі температур $T=500-800^{\circ}\text{C}$):

ширина забороненої зони $\varepsilon_q = 0,36$ eВ і мало змінюється зі зміною температури;

коефіцієнт Зеєбека $\alpha = 200-300$ мкВ/град;

питомий опір $\rho = 5 \cdot 10^{-3}$ Ом/см;

коефіцієнт теплопровідності $\chi_n = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/см град;

добротність $z = 1,2 \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Телурид германія GeTe має р-провідність. Термоелектричні властивості GeTe помітно змінюються із зміною температури. Оптимальною температурою для телуриду германія є $500-700^{\circ}\text{C}$. В цьому діапазоні температур термоелектричні властивості наступні:

добротність $z = 1,7 \cdot 10^{-3}$ 1/град;

коефіцієнт Зеєбека $\alpha = 200$ мкВ/град;

електропровідність $\sigma = 2 \cdot 10^3$ 1/Ом см;

коефіцієнт теплопровідності $\chi_p = 1,8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см град;

концентрація дірок $n_p = 9 \cdot 10^{20}$ 1/см³;

ширина забороненої зони $\varepsilon_q = 0,14$ eВ;

рухливість носіїв $U_{n,p} = 50$ см²/В с.

3.2.3. Розрахунок однокаскадної ТЕБ

Вихідні параметри для розрахунку:

T_1 – температура гарячого спаю, $^{\circ}\text{C}$;

T_0 – температура холодного спаю, $^{\circ}\text{C}$;

Q – тепловий потік, Вт;

U – номінальна напруга, В;

l – висота ТЕБ по термоелектричному матеріалу, см;

Термоелектричні властивості матеріалів р- і n-типів провідності:

α_p, α_n – середньоінтегральні коефіцієнти термоЕРС, В/К;

χ_p, χ_n – середньоінтегральні коефіцієнти теплопровідності, Вт/см*К;

ρ_p, ρ_n – середньоінтегральні питомі опори, Ом*см;

ε_χ – коефіцієнт, що враховує втрати тепла по захисним покриттям і елементам конструкції;

ε_ρ – коефіцієнт, що враховує електричний опір перехідних шарів, комутуючих шин та контактів.

Порядок розрахунку:

Вихідні дані для розрахунку:

$$T_1 = 600^{\circ}\text{C}; \quad T_0 = 5^{\circ}\text{C}; \quad Q = 10640 \text{ Вт}; \quad U = 28,5 \text{ В}; \quad l = 2 \text{ см};$$

$$\alpha_p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ В}/^{\circ}\text{C}; \quad \alpha_n = 3 \cdot 10^{-3} \text{ В}/^{\circ}\text{C};$$

$$\chi_p = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

$$\chi_n = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^{\circ}\text{C});$$

$$\rho_p = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$\rho_n = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см};$$

$$\varepsilon_\chi = 5 \cdot 10^{-2}; \quad \varepsilon_\rho = 6 \cdot 10^{-2}.$$

Розрахунок параметрів ТЕБ:

1. Водношення площ поперечного розрізу віток n- і p-типів:

$$\psi = \sqrt{\frac{\rho_n \chi_p}{\rho_p \chi_n}} = 2.148$$

2. Середній коефіцієнт термоЕРС:

$$\alpha = \frac{\alpha_p + \alpha_n}{2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}/^{\circ}\text{C}$$

3. Середній коефіцієнт теплопровідності:

$$\chi = \frac{\chi_p + \psi \chi_n}{1 + \psi} = 0,016 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

4. Середній питомий опір:

$$\rho = \frac{1 + \psi}{4} \left(\rho_p + \frac{1}{\psi} \rho_n \right) = 2.855 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

5. Добротність:

$$z = \frac{\alpha^2}{\chi \rho (1 + \varepsilon_\chi)(1 + \varepsilon_\rho)} = 3.12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

6. Середня температура:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_0}{2} = 302,5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

7. Перепад температури:

$$\Delta T = T_1 - T_0 = 595 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$M = \sqrt{1 + zT_{cp}} = 1,0047$$

8. ККД:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{M-1}{M+\frac{T_0}{T_1}} * 100\% = 4,63\%$$

9. Вихідна потужність:

$$W=Q*\eta = 493,377 \text{ Вт.}$$

10. Номінальний струм:

$$J=W/U=17,3 \text{ А}$$

11. Кількість термоелементів (пар віток) в одній ТЕБ:

$$N = \frac{U}{2\alpha\Delta T} \frac{M+1}{M} = 19,155 \approx 20$$

12. Площа поперечного розрізу вітки р-типу:

$$S_p = \frac{Ql}{\chi(1+\psi)\Delta TN} \frac{1}{M} \frac{1-\frac{\eta}{2}}{1+\epsilon_\chi} = 0,345 \text{ см}^2$$

13. Площа поперечного перерізу вітки n-типу:

$$S_n = \psi S_p = 0,73 \text{ см}^2$$

14. Загальна площа однієї ТЕБ:

$$S=(S_n+S_p)*N=21,5 \text{ см}^2$$

15. Розрахунок маси однієї ТЕБ:

1) Об'єм вітки n-типу: $V_n=l*S_n=2*0,73=1,46 \text{ см}^3$

Об'єм вітки р-типу: $V_p=l*S_p=2*0,345=0,69 \text{ см}^3$

2) Густина елемента n-типу PbTe: $\rho_n=11,35 \text{ г/см}^3$

Густина елемента р-типу GeTe: $\rho_p=5,323 \text{ г/см}^3$

Маса елемента n-типу PbTe: $M_n=\rho_n*V_n=16,571 \text{ г.}$

Маса елемента р-типу GeTe: $M_p=\rho_p*V_p=3,673 \text{ г.}$

3) Загальна маса ТЕБ:

$$M_3=(M_n+ M_p)N+M_k$$

$$M_k - \text{ маса припою і каркасу ТЕБ} \approx 100 \text{ г.}$$

$$M_3=(M_n+ M_p)N+M_k= 504,88 \text{ г.}$$

Отримані дані занесемо до таблиці 3.1

Таблиця 3.1

№ п/п	Назва параметра	Розраховане значення
1	Відношення площ поперечного розрізу віток n- і p-типів	$\psi = 2,148$
2	Середній коефіцієнт термоЕРС	$\alpha = 2,5 \cdot 10^{-3}$
3	Середній коефіцієнт теплопровідності	$\chi = 0,016 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})$
4	Середній питомий опір	$\rho = 2,855 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
5	Добротність	$z = 3,12 \cdot 10^{*6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
6	Середня температура	$T_{\text{cp}} = 302,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
7	Перепад температури	$\Delta T = 595 \text{ } ^\circ\text{C}$
8	ККД	$\eta = 4,63 \%$
9	Вихідна потужність	$W = 493,377 \text{ Вт}$
10	Номинальний струм	$J = 17,3 \text{ А}$
11	Кількість термоелементів (пар віток) в одній ТЕБ	$N \approx 20$
12	Площа поперечного розрізу вітки p-типу	$S_p = 0,345 \text{ см}^2$
13	Площа поперечного перерізу вітки n-типу	$S_n = 0,73 \text{ см}^2$
14	Загальна площа однієї ТЕБ	$S = 21,5 \text{ см}^2$
15	Загальна маса ТЕБ	$M_3 = 504,88 \text{ г}$

3.2.4. Компоновка ТЕГ

Для отримання ТЕГ потужністю 5 кВт потрібно в вихідному соплі двигуна зробити 10 вирізів та установити 10 ТЕБ. Для забезпечення достатнього охолодження холодного спою необхідно також додатково установити на кожну ТЕБ радіатор повітряного охолодження.

Монтажна схема ТЕБ на рис. 3.4, компоновочна схема розміщення ТЕГ зображена на рис. 3.5(а, б).

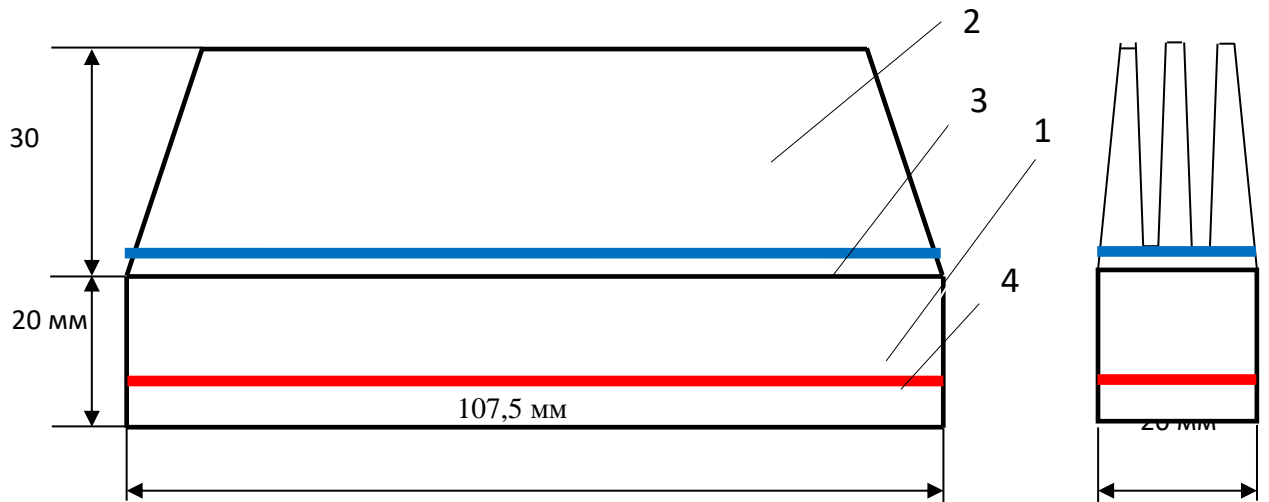


Рис. 3.4 Монтажна схема ТЕБ

1 – ТЕБ; 2 – повітряний радіатор.

A - A

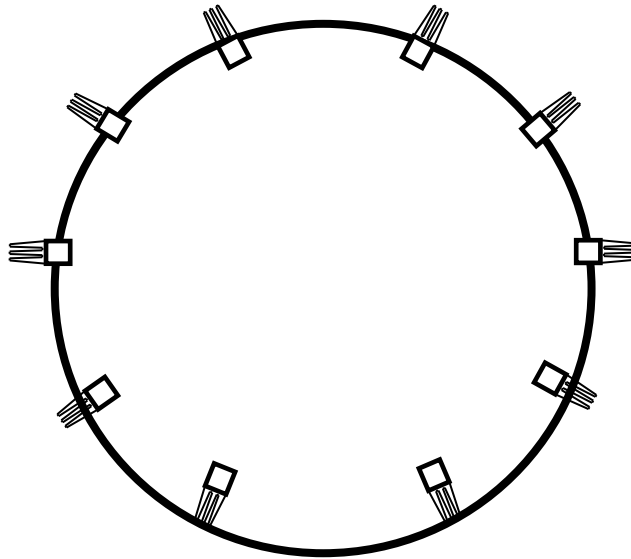


Рис. 3.5а Компоновочна схема розміщення ТЕГ (розріз А-А).

3.3 Підключення ТЕГ до бортової мережі електропостачання

Схема підключення ТЕГ до бортової мережі електропостачання зображена на рис. 3.6.

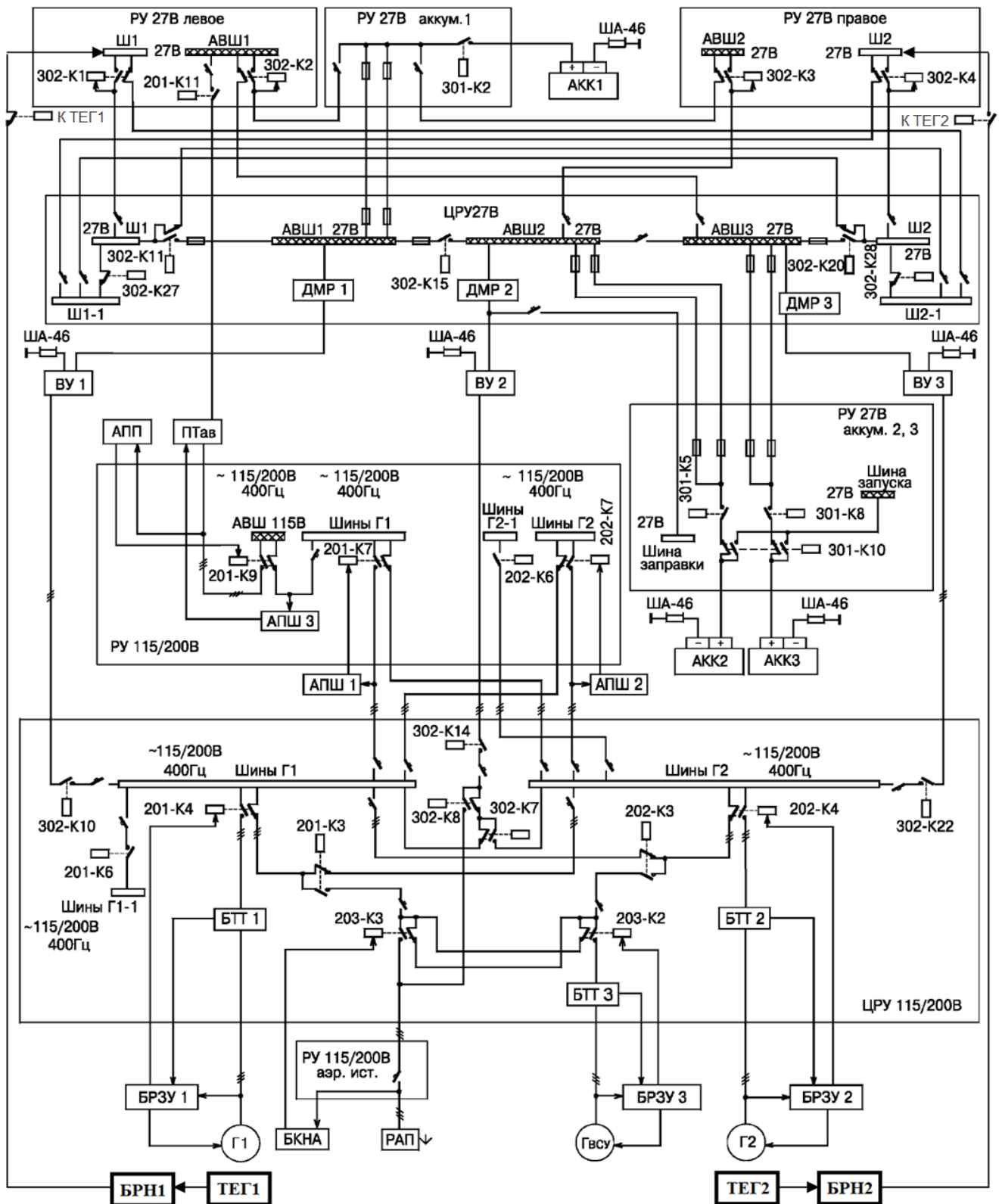


Рис. 3.6 Схема підключення ТЕГ1 і ТЕГ2 до бортової мережі електропостачання

Для стабілізації вихідної напруги підключення ТЕГ1 і ТЕГ2 до бортової мережі електропостачання здійснюється через БРН1 і БРН2.

На рисунку 3.7 зображена схема стабілізатора напруги з польовим транзистором.

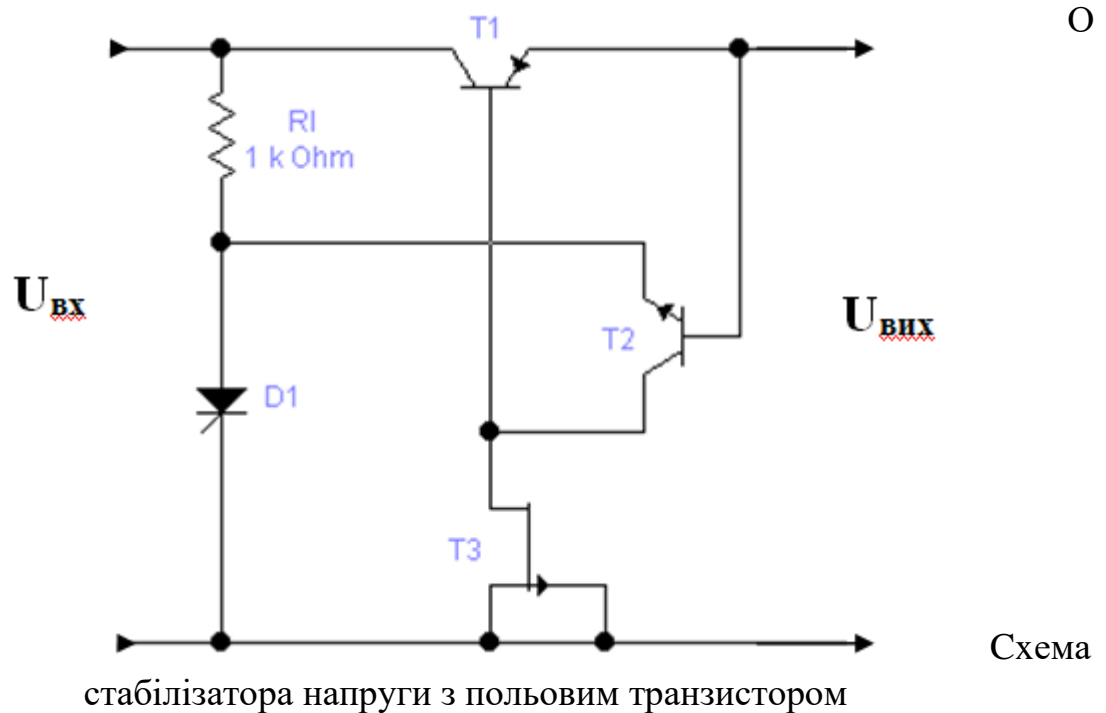


Рис. 3.7

стабілізатора напруги з польовим транзистором

Схема

Особливістю цього транзисторного компенсаційного стабілізатора напруги є застосування в ланцюзі зворотного зв'язку польового транзистора $T3$ який виконує роль динамічного навантаження для транзистора $T2$. При збільшенні струму каналу транзистора $T3$ опір каналу зростає, а при зменшенні струму понижається. Як наслідок коефіцієнт напруги стабілізації збільшується.

Висновок до розділу

В цьому розділі був проведений аналіз технології виготовлення генераторних модулів із секційних термоелементів. В залежності від режимів роботи двигуна Д-436-148 було обрано термоелементи для ТЕБ - телурид свинцю $PbTe$ та телурид германія $GeTe$, які задовольняють умови експлуатації – температурний режим. З розрахунку однієї ТЕБ були отримані її основні дані для подальшої компоновки термоелектрогенератора.

Маса, площа та потужність одного термоелектричного модуля є дуже хорошими і якщо розмістити на кожному двигуні Д-436-148 регіонального літака Ан-148-100 по 10 ТЕБ, то можна отримати сумарну потужність з кожного двигуна майже 5 кВт за умови зміни маси літака на +10,1 кг.

Розроблена схема підключення термогенераторів до СЕП літака Ан-148 та схема блока регулювання напруги постійного струму.

ВИСНОВОК

В дипломній роботі були розглянуті джерела електроживлення та визначено, що саме акумулятори і електромашинні генератори набули найбільшого поширення на повітряних суднах через свої переваги в експлуатації та якості генерування енергії.

Проте сучасні досягнення в області термоенергетики і термоелектричних елементів дають змогу успішно проектувати й розробляти ефективні ТЕГ, що можуть стати альтернативою уже існуючим ДЖ на борту ПС.

Система термоелектричного генерування заснована на прямому перетворенні теплової енергії в електричну, причому частина тепла від гарячого джерела в системі перетворюється в електрику, а решта тепла відводиться в навколишнє середовище. Характеристики системи визначаються головним чином температурами гарячої й холодної поверхонь термоелектричного модуля, які у свою чергу залежать від температур джерела й стоку тепла, від теплових опорів між термоелектричним модулем і джерелом тепла, а також модулем і стоком тепла.

В ході виконання роботи був проведений аналіз технології виготовлення генераторних модулів із секційних термоелементів. В залежності від режимів роботи двигуна Д-436-148 було обрано термоелементи для ТЕБ - телурид свинцю PbTe та телурид германія GeTe, які задовольняють умови експлуатації – температурний режим. З розрахунку однієї ТЕБ були отримані її основні дані для подальшої компоновки термоелектрогенератора.

Маса, площа та потужність одного термоелектричного модуля є дуже хорошими і якщо розмістити на кожному двигуні Д-436-148 регіонального літака Ан-148-100 по 10 ТЕБ, то можна отримати сумарну потужність з кожного двигуна майже 5 кВт за умови зміни маси літака на +10,1 кг.

Розроблена схема підключення термогенераторів до СЕП літака Ан-148 та схема блока регулювання напруги постійного струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество, Т.1. Физика термоэлектричества// Прут, Киев: Черновцы.-1998.-376с.
2. Ковалевский В.В. Выбор параметров и расчет термоэлектрических преобразователей энергии (учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию)// Харьков. - 1982. - 98с.
3. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник /Л.И. Анатычук. - Киев: Наук. думка, 1979. – 768с.
4. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. Пособие для вузов / В.Е. Китаев, А.А. Бокуняев, М.Ф. Калканов; Под ред. А.А. Бокуняева. –М.: Радио и связь, 1993. – 232 с.
5. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника: Учеб. Пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1991. – 622 с.
6. Багодский В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. – М.:Энергоиздат, 1981.– 360 с
7. Трехвальный ТРДД Д-436-148. Руководство по технической эксплуатации. 6370040000 РЭ (в трех книгах). Книга 1. ГП «Ивченко-Прогресс», 2006.
8. Положення про дипломні роботи (проекти) випускників національного авіаційного університету. Київ. Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ-друк» 2011.