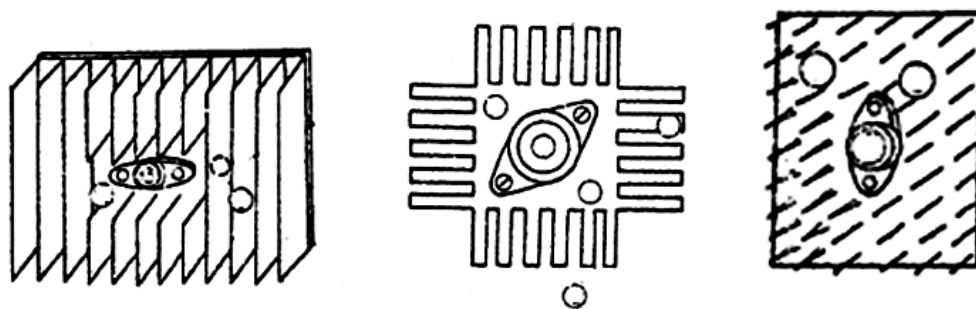


**А.В. Шарков, В.А. Кораблев, В.В. Герасютенко,
Ю.П. Заричняк**

**СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ**



Санкт-Петербург
2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.В. Шарков, В.А. Кораблев, В.В. Герасютенко,
Ю.П. Заричняк**

**СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлениям подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и
теплофизика и 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы
жизнеобеспечения

в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата и магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Санкт-Петербург
2021**

Шарков А.В., Кораблев В.А., Герасютенко В.В., Заричняк Ю.П. Системы охлаждения и термостатирования– СПб: Университет ИТМО, 2021. – 89 с.

Рецензент(ы):

Цветков Олег Борисович, доктор технических наук, профессор, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета энергетики и экотехнологий, Университета ИТМО.

Учебно-методическое пособие включает в себя методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Системы охлаждения и термостатирования», «Тепловые процессы машин и аппаратов», «Термостатирование и управление тепловыми процессами», «Системы обеспечения тепловых режимов». Приводятся основные теоретические положения, задания на лабораторные работы, а также рекомендации по выполнению.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Шарков А.В., Кораблев В.А., Герасютенко В.В., Заричняк Ю.П., 2021

Содержание

Список основных условных обозначений.....	4
Лабораторная работа №1. Тепловой режим осветителя твердотельного лазера, работающего в импульсном режиме.....	6
Лабораторная работа №2. Жидкостное охлаждение силового полупроводникового прибора.....	16
Лабораторная работа №3. Сравнение способов охлаждения РЭА кассетной конструкции.....	30
Лабораторная работа № 4. Термоэлектрическая и жидкостная системы охлаждения тепловыделяющих элементов.....	40
Лабораторная работа №5. Измерение и расчет контактных термических сопротивлений в механических соединениях.....	50
Лабораторная работа №6. Исследование эффективности радиаторов.....	57
Лабораторная работа №7. Определение внутренних тепловых сопротивлений силового полупроводникового прибора.....	68

Список основных условных обозначений

Лабораторная работа №1:

$J_0(\mu_n), J_1(\mu_n)$ – функции Бесселя,
 μ_n - корни функции $J_0(\mu_n)$ и $J_1(\mu_n)$,
 τ_n - длительность накачки, время действия импульса,
 C_i – полная теплоемкость i -го элемента,
 P_i – внутренний источник теплоты,
 t_c – температура среды, °С
 σ_{ij} - тепловые проводимости между элементами i и j ,
 k – спектральный коэффициент поглощения активного элемента,
 n – относительный показатель преломления,
 R – френелевский коэффициент отражения,
 r_0 – радиус активного элемента,
 l - длина активного элемента, м
 W - внутренний источник теплоты,
 Δt – перепад температуры,
 φ_0 – расходимость излучения,
 L - длина резонатора,
 Δh_{max} - максимальная разность оптических длин между центром и боковой поверхностью активного элемента,
 $AЭ$ - активный элемент.

Лабораторная работа №2:

CO - система охлаждения,
 $ТА$ - теплообменный аппарат,
 $PЭА$ - радиоэлектронная аппаратура,
 G – расход,
 ε - эффективность теплообменного аппарата (эффективность передачи теплоты в теплообменнике),
 W - массовый расход,
 C - теплоемкость горячего теплоносителя,
 $ЛАТР$ - лабораторный автотрансформатор.

Лабораторная работа № 3:

P – мощность, рассеиваемая аппаратом,
 $НЗ$ - нагретая зона,
 λ - теплопроводность, Вт/м·К
 $TЭДС$ - термоэлектродвижущая сила.

Лабораторная работа №4:

α – коэффициент Зеебека,
 σ_T – коэффициент Томсона,
 σ_1, σ_2 – тепловые проводимости.

Лабораторная работа №5:

KTC, R_k - контактное термическое сопротивление,
 α_m, α_c – коэффициенты теплоотдачи через места фактического контакта и межконтактную среду,
 λ_m - приведенная теплопроводность,
 $\delta_{экв}$ - эквивалентная толщина прослойки,
 m_h - коэффициент заполнения профиля неровностей.

Лабораторная работа №6:

L_1, L_2 - размеры основания (прямоугольное основание),
 δ - толщина основания,
 H (или h) – высота,
 d – толщина ребра или штыря,
 Nu – критерий Нуссельта,
 Re – критерий Рейнольдса,
 Gr – критерий Грасгофа,
 Pr – критерий Прандтля,
 g – ускорение свободного падения,
 $ППП$ - полупроводниковые приборы.

Лабораторная работа №7:

$СПП$ - силовые полупроводниковые приборы таблеточного типа,
 $ВТС$ - внутренние тепловые сопротивления силового полупроводникового прибора.

Лабораторная работа №1

Тепловой режим осветителя твердотельного лазера, работающего в импульсном режиме

Цель работы: изучение влияния режима накачки твердотельного лазера на величину тепловой линзы. Освоение методов экспериментального определения и аналитического расчета величины тепловой линзы.

Программа работы

1. Ознакомиться с описанием и конструкцией экспериментальной установки.
2. Ознакомиться с методом расчета величины тепловой линзы в твердотельных лазерах.
3. Измерить параметры тепловой линзы и время восстановления показателя преломления в активном элементе.
4. По результатам измерений построить графики зависимостей фокусного расстояния тепловой линзы от времени при заданной энергии накачки.
5. Рассчитать и построить температурное поле активного элемента в момент окончания импульса накачки.
6. Определить минимальную частоту следования импульсов в лазере в зависимости от энергии накачки.
7. Рассчитать минимальное фокусное расстояние тепловой линзы, возникающей в активном элементе, в момент окончания импульса накачки τ_n .
8. Определить расходимость излучения во время τ_n .
9. Сопоставить результаты расчетов и экспериментов.
10. В отчете поместить оптическую схему экспериментальной установки, результаты расчетов и экспериментов и их сопоставление.

Методика расчета теплового режима осветителя твердотельного лазера

Важной причиной, вызывающей оптическую неоднородность активных элементов, является эффективное преобразование энергии накачки в тепло.

В свою очередь, оптическая неоднородность приводит к появлению тепловой линзы, двулучепреломлению, расходимости излучения. Поэтому расчет этих параметров является одной из основных задач, возникающих при создании осветителей.

Конструкция излучателя твердотельного лазера схематично представлена на рис. 1. Основными элементами конструкции излучателя являются активный элемент 1, две лампы накачки 2, осветитель 3, корпус 4.

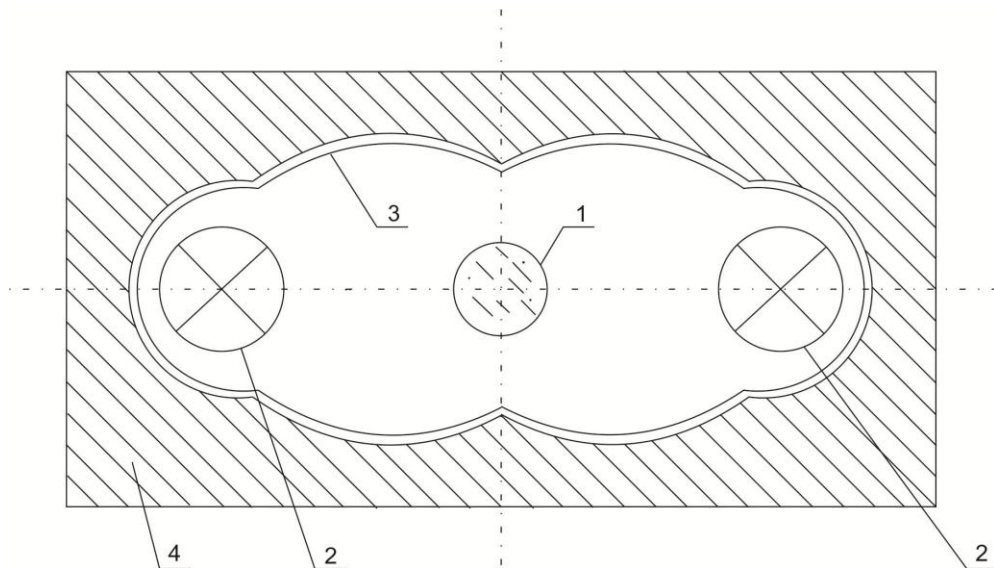


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции осветителя.

Активный элемент, представляющий собой цилиндр диаметром 15 мм и длиной 260 мм, выполненный из стекла ГЛС-4, крепится в корпусе 4 с помощью двух кронштейнов. Осветитель 1 имеет поверхность, состоящую из двух софокусных эллиптических цилиндров, выполненных из латунного листа. На внутреннюю поверхность осветителя нанесено серебряное отражающее покрытие. Осветитель крепится с помощью четырех винтов.

В качестве ламп накачки используются две лампы ИФП-8000, которые питаются от батареи конденсаторов. Длительность импульсов накачки 1-2 мс. Емкость батареи конденсаторов $C = 600$ мкФ, напряжение $U = 5$ мВ.

Корпус выполнен из двух частей - верхней и нижней.

С целью создания тепловой модели осветителя сделаем упрощения в конструкции, а также примем некоторые допущения, идеализирующие характер протекающих теплофизических явлений.

Перечислим основные из этих допущений:

1. Рассматриваем объем, ограниченный корпусом. В этом случае в тепловую модель войдут области, указанные на рис.1: активный элемент 1, лампа накачки 2, отражатель 3, корпус 4.

2. Выделение тепловой энергии в элементах осветителя за счет поглощения энергии излучения плазмы рассматриваем как результат действия в них внутренних источников тепла.

3. На первом этапе расчета считаем, что внутренние источники теплоты распределены равномерно, температурные поля отдельных элементов также равномерны.

4. Теплофизические параметры постоянны и не зависят от температуры.

5. Теплообмен между отдельными элементами осветителя характеризуем средними в пределах каждой поверхности значениями коэффициентов

теплообмена.

Рассмотрим теплофизические процессы, происходящие в элементах осветителя. Температурное поле активного элемента в момент накачки определяется известным соотношением (1):

$$t(\rho, F_o) = t_c + \frac{qR^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot \rho) \left(1 - e^{-\mu_n^2 \cdot F_o}\right), \quad (1)$$

$$\text{где } A_n = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n^3 [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} = \frac{2Bi}{\mu_n^3 [\mu_n^3 + Bi^2] J_0(\mu_n)},$$

μ_n - корни функции $J_0(\mu_n)$ и $J_1(\mu_n)$.

При длительностях накачки τ_n , удовлетворяющих условию $\mu_1^2 F_o_n \ll 1$, расчет температурного поля активного элемента можно проводить в приближении адиабатического нагрева. В этом случае температура i -го элемента определяется мощностью внутренних источников теплоты и теплоемкостью вещества и не зависит от теплопроводности вещества и интенсивности теплообмена с окружающими элементами:

$$t_i = t_c + \frac{P_i \tau_n}{C_i}, \quad (2)$$

где C_i – полная теплоемкость i -го элемента, P_i – внутренний источник тепла, t_c – температура среды, τ_n – время действия импульса.

Формула (1) предполагает, что источник теплоты постоянен во время действия импульса. Внутренние источники теплоты в отдельных элементах можно определить на основе численного интегрирования спектров излучения и поглощения по методике, изложенной в [3].

Для данной конструкции осветителя значения этих источников оказались равными:

$P_1=0,07 P_{эл}$; $P_2=0,3 P_{эл}$; $P_3=0,35 P_{эл}$, где $P_{эл}$ – энергия, подаваемая на одну лампу накачки. Зная внутренние источники тепла и полные теплоемкости элементов, по формуле (1) определим средние значения температур всех элементов к концу импульса накачки: $t_1=34^\circ \text{C}$, $t_2=131^\circ \text{C}$, $t_3=80^\circ \text{C}$.

После окончания импульса тепловой режим элементов осветителя описывается системой уравнений (3):

$$\begin{cases} C_i \frac{dt_i}{d\tau} + \sum_{j=1, i \neq j}^4 \sigma_{ij} (t_i - t_j) = 0 \\ i = 1, 2, 3, 4 \end{cases}, \quad (3)$$

где σ_{ij} - тепловые проводимости между элементами i и j ; t_i и t_j – средние температуры указанных элементов $P_i=0$, поскольку действие импульса закончилось.

Для рассматриваемой системы процесс теплообмена между отдельными элементами характеризуется конвективно-кондуктивными, кондуктивными и

лучистыми тепловыми проводимостями. Эти проводимости могут быть определены по известным соотношениям, приведенным в [4]- [6].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (2) может быть решена либо численно на ЭВМ, либо приближенным аналитическим методом, разработанным в [7].

В результате расчета получены нестационарные значения средних температур элементов осветителя (1 - активный элемент; 2 - лампа накачки; 3 - отражатель; 4 - корпус) после окончания импульса накачки.

На следующем этапе расчета более подробно исследуем температурное поле активного элемента.

Для этого снимем допущение 3 с равномерности температурного поля и внутреннего источника тепла в активном элементе. Неравномерность распределения внутреннего источника тепла вызвана ослаблением излучения в активной среде, а также фокусирующим свойством цилиндрической поверхности. Расчет неравномерности распределения проведем по формулам (4):

$$q(\rho) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{n^3}{\pi} \int_0^{\pi} d\varphi \int_0^{\xi_{np}} \frac{(1-R)\cos i}{L^2} \exp(-kr_0L) d\xi, \quad \rho < \frac{1}{n} \\ \frac{n^3}{\pi} \left\{ \int_0^{\varphi_1} d\varphi \int_0^{\xi_{np}} \frac{(1-R)\cos i}{L^2} \exp(-kr_0L) d\xi + \int_{\varphi_2}^{\pi} d\varphi \int_0^{\xi_{np}} \frac{(1-R)\cos i}{L^2} \exp(-kr_0L) d\xi \right\} \\ \rho < \frac{1}{n} \end{array} \right\},$$

$$L^2 = L'^2 + \xi^2, \quad L'^2 = 1 + \rho^2 - 2\rho \cos\varphi, \quad \cos i = (1 - \rho \cos\varphi)L^{-1} \quad (4)$$

$$\xi_{np} = \sqrt{\frac{(1 - \rho \cos\varphi)^2}{\cos^2 i'_{np} - L'^2}}, \quad \cos i'_{np} = \sqrt{1 - n^{-2}}$$

$$\varphi_{1,2} = \arccos \frac{1 \pm \sqrt{(n^2 - 1)(n^2 \rho^2 - 1)}}{n^2 \rho}, \quad \xi = \frac{l}{r_0}$$

где k – спектральный коэффициент поглощения активного элемента, n – относительный показатель преломления, R – френелевский коэффициент отражения, $\rho = r/r_0$ – относительное расстояние, r_0 – радиус активного элемента.

Формулы (4) справедливы лишь для монохроматической составляющей излучения. Однако обычно активные элементы освещаются излучением широкого спектрального диапазона, а материал активного элемента имеет селективные поглощающие свойства. Поэтому сначала необходимо определить относительную

неравномерность внутреннего источника теплоты для каждой монохроматической составляющей, а после этого провести интегрирование по всему спектру излучения.

Зная характер неравномерности внутреннего источника теплоты, а также полную энергию, поглощенную активным элементом, можно определить абсолютные значения внутренних источников по формулам (5):

$$W(\rho) = F' \cdot q(\rho), \quad (5)$$

$$F' = \frac{P_1}{2\pi l r_0^2 \int_0^1 q(\rho) \rho d\rho},$$

где l - длина активного элемента.

Результаты расчета неравномерного внутреннего источника теплоты в активном элементе приведены на рис. 2.

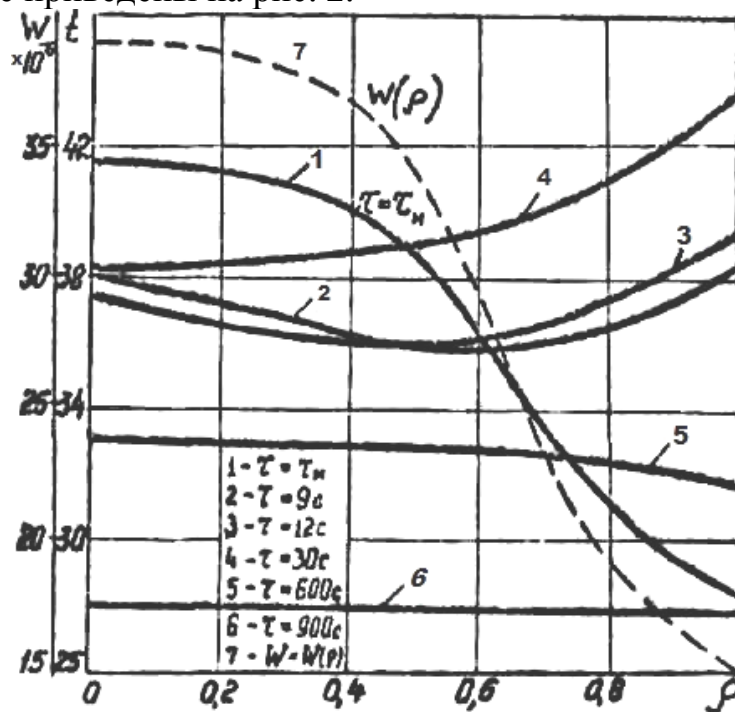


Рис.2 Температурное поле активного элемента в различные моменты времени и распределение мощности внутреннего источника тепла в активном элементе.

Таким образом, у нас есть необходимая информация для определения температурного поля активного элемента во время импульса накачки [2]:

$$t(\rho, \tau) = t_0 + \frac{\pi \cdot l \cdot r_0^2}{C_1} \int_0^{\tau_n} W(\rho, \tau) d\tau, \quad (6)$$

где τ_n - время действия импульса накачки; $W(\rho, \tau) = W(\rho)$, т.е. считаем источник тепла постоянным во время импульса. На рис. 2 представлено температурное поле активного элемента во время импульса.

Теперь исследуем температурное поле в активном элементе после окончания импульса. Поскольку длина активного элемента значительно превосходит диаметр и теплообмен с торцов незначителен, то для расчета нестационарного температурного поля активного элемента можно использовать следующее уравнение:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (7)$$

с начальными $t(r,0)=t(r)|_{\tau=\tau_n}$ и граничными $-\lambda \frac{\partial(r,t)}{\partial r} + q'(\tau)|_{r=r_0} = 0, \quad \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial r} = 0$

условиями.

В качестве начальных условий принимается температурное поле активного элемента в момент окончания импульса ($\tau = \tau_n$, рис.2). Тепловой поток на поверхности активного элемента в граничных условиях определяется по формуле (8):

$$q'(\tau) = \{2\sigma_{1,2}[t_2(\tau) - t_1(\tau)] + \sigma_{1,3}[t_3(\tau) - t_1(\tau)] + \sigma_{1,4}[t_4(\tau) - t_1(\tau)]\}S_1^{-1}, \quad (8)$$

где $\sigma_{1,2}$ – тепловая проводимость между активным элементом и баллоном лампы, $\sigma_{1,3}$ – тепловая проводимость между активным элементом и отражателем, $\sigma_{1,4}$ – активным элементом и корпусом.

В качестве температур $t_i(\tau)$ берутся значения, полученные из решения системы (2).

Таким образом, тепловое взаимодействие активного элемента с другими телами системы учитывается в граничных условиях. Результаты расчета температурного поля активного элемента в различные моменты времени представлены на рис. 2.

Рассмотрим термооптические искажения, вносимые в резонатор активным элементом. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что под действием радиального градиента температур активный элемент превращается в линзу с двумя фокусными расстояниями, которые определяются по следующим формулам (9):

$$f = \frac{1}{n_0 \cdot l \cdot b_2}, \quad b_2 = \frac{2(P \pm 0,5Q)}{n_0 r_0^2} \Delta t, \quad (9)$$

$$P = 25 + 0,17t_0, \quad Q = 6 + 0,03t_0$$

где n_0 – показатель преломления активного элемента, Δt – перепад температуры между центром и боковой поверхностью, t_0 – температура центра активного элемента, знак «+» соответственно — для радиальной и тангенциальной поляризации.

Поскольку перепад температуры Δt является функцией времени, фокусное расстояние тепловой линзы будет зависеть от времени. Результаты расчета зависимости оптической силы линзы от времени приведены на рис.3.

В момент импульса в активном элементе образуется положительная линза; оптическая сила линзы возрастает в течение действия импульса накачки (рис.3,б). После окончания импульса оптическая сила тепловой линзы убывает пропорционально градиенту температур Δt , и уже к девятой секунде знак линзы меняется на противоположный. Далее, по мере охлаждения всех элементов осветителя, линза опять становится положительной (рис.3,а).

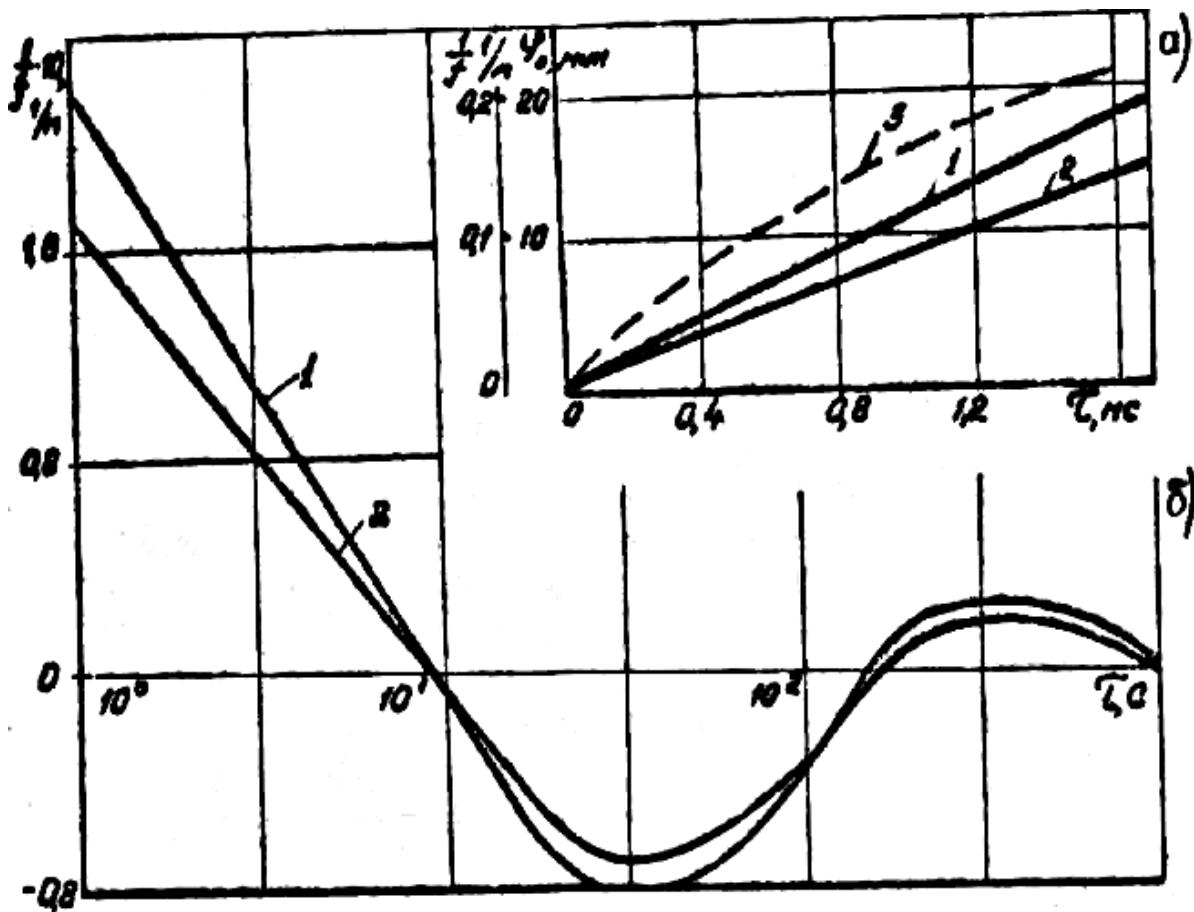


Рис. 3. Зависимость термооптических искажений в активном элементе от времени:
 а – оптическая сила тепловой линзы после окончания импульса накачки,
 б – оптическая сила тепловой линзы и расходимость излучения во время импульса накачки. 1 – радиальная поляризация; 2 – тангенциальная поляризация; 3 – зависимость $\varphi_0(\tau)$.

Наличие линзы внутри плоского резонатора приводит к увеличению расходимости излучения. Величина расходимости вычисляется по формуле (10):

$$\varphi_0 = \sqrt{\frac{2\Delta h_{\max}}{L}} = \sqrt{\frac{2l}{L}(P + 0,5Q)\Delta t}, \quad (10)$$

где L - длина резонатора, Δh_{\max} - максимальная разность оптических длин между центром и боковой поверхностью активного элемента.

Для проверки справедливости разработанной последовательности расчета были проведены экспериментальные исследования по определению фокусного расстояния тепловой линзы в активном элементе после окончания импульса накачки. Результаты этой проверки показали удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Предложенная методика расчета дает возможность уже на этапе проектирования определить допустимые уровни температур отдельных элементов, выработать вид и параметры системы охлаждения, исследовать термооптические искажения в активном элементе, выработать пути компенсации этих искажений, проанализировать влияние отдельных факторов, определить допустимую частоту следования импульсов.

Описание лабораторной установки

Принципиальная оптическая схема установки показана на рис. 4.

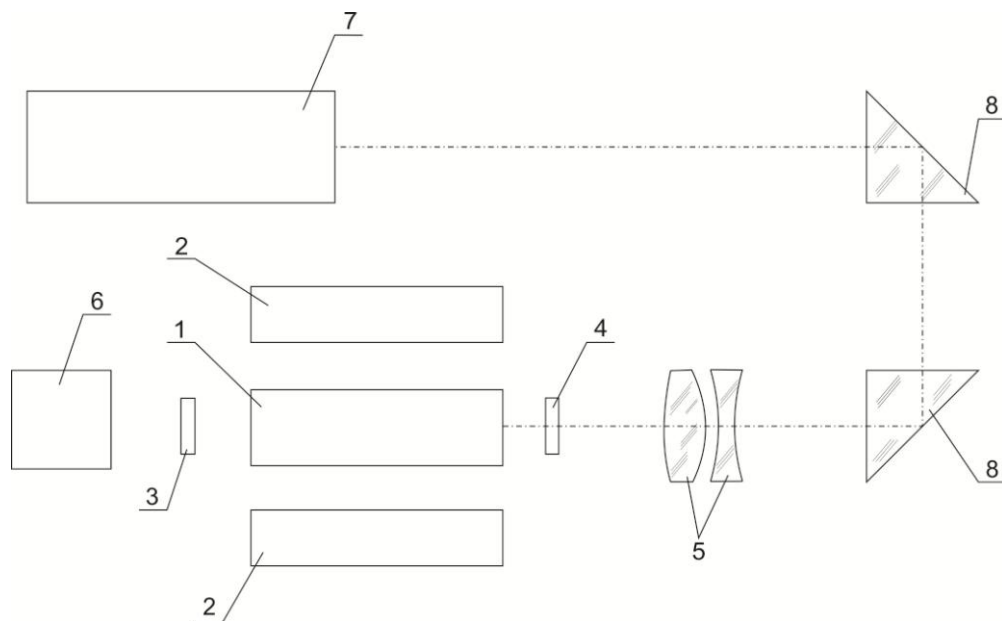


Рис. 4. Оптическая схема установки: 1 – активный элемент (АЭ); 2 – лампа накачки; 3,4 – зеркала резонатора; 5 – объектив; 6 – телекамера; 7 – газовый лазер; 8 – поворотная призма.

Исследуемый объект - активный элемент (АЭ) твердотельного лазера представляет собой стержень размером 15 x 260 мм с плоскопараллельными торцами и матированной образующей. Активный элемент изготовлен из стекла с ионами *Nd* и помещен в камеру из двух софокусных эллиптических цилиндров.

Накачка активного элемента осуществляется световым импульсом двух ламп типа ИФП-8000, питающихся от емкостного накопителя энергии. В качестве котировочного лазера (ЕЛ) используется газовый лазер на смеси гелия и неона, работающий на длине волны 0,63 мкм в непрерывном режиме. Телескоп (Т) типа телескопа Галилея служит для увеличения размеров пучка и его фокусировки.

Излучение проходит активный элемент и с помощью зеркал направляется на фотокатод видикона (передающая телевизионная трубка с накоплением заряда, действие которой основано на внутреннем фотоэффекте) в передающей телевизионной камере (ХТП). Для определения параметра тепловой линзы, возникающей в активном элементе под действием излучения лампы накачки, необходимо определить размер светового пятна в плоскости фотокатода видикона. Для определения времени восстановления распределения показателя преломления в активном элементе, необходимо измерить время восстановления изображения на телеэкране КТП.

Порядок проведения эксперимента

1. Провести юстировку оптической схемы путем совмещения пучка газового лазера с оптической осью активного элемента и сфокусировать пучок котировочного лазера на фотокатод КТП.

2. По заданной энергии накачки рассчитать напряжение накачки. Зарядить накопитель энергии до этого напряжения.

3. Произвести поджиг лампы накачки.

4. Зарегистрировать динамику изменения размеров пятна на фотокатоде КТП. Для этого следует:

– определить качественную картину изменения размеров пятна во времени;

– отметить максимальные размеры пятна;

– найти время восстановления изображения на телеэкране КТП.

5. Повторить измерения для различных энергий накачки (по указанию преподавателя).

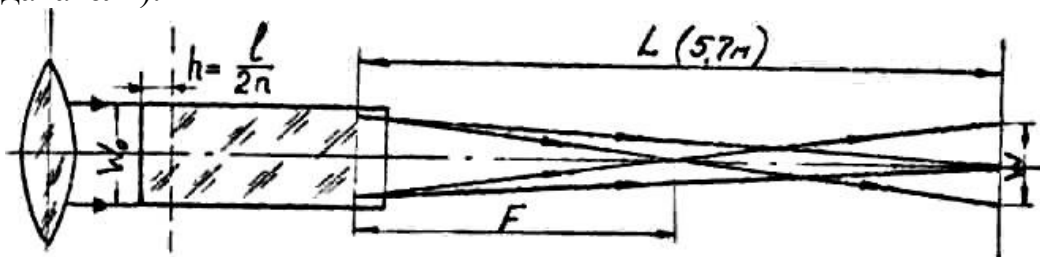


Рис. 5. Оптическая схема тепловой линзы.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}, \quad \frac{W_0}{W} = \frac{F}{L \cdot F} \quad f_2 = \frac{W_0 L (f_1 - d)}{(W_0 + W) f_1 - W_0 L}$$

Контрольные вопросы

1. Каковы основные причины возникновения тепловой линзы в активном элементе твердотельного лазера?
2. Как влияет тепловая линза на параметры лазера?
3. Какие основные параметры характеризуют тепловую линзу?
4. Каким образом можно частично компенсировать тепловую линзу?

5. В чем причина изменения знака тепловой линзы во времени?
6. Почему процессы теплопроводности и теплообмена не влияют на температурное поле активного элемента лазера во время действия импульса накачки?
7. От чего зависит характер распределения внутренних источников тепла в активном элементе?
8. От чего зависит время восстановления температурного поля в активном элементе до первоначальных значений?
9. Какой метод лежит в основе измерения параметров тепловой линзы в рассматриваемой экспериментальной установке?
10. Как выбирается расстояние от объектива до фотокатода видикона в экспериментальной установке?

Литература

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности,- М.: Высшая школа, 1967.
2. Белостоцкий Б. Р., Рубанов А. С. Тепловой режим твердотельных ОКГ.- М.: Энергия, 1973.
3. Савинцева Л. А., Шарков А. В., Частый З. Л.- Изв. вузов СССР.- Приборостроение, 1973, т. 21, № 3, с. 102.
4. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э. М, Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах.- Л.: Энергия, 1968.
5. Уонг Х., Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров.- М.: Атомиздат, 1979..
6. Кутателадзе С. П., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче.- М. : ГЭИ, 1959.
7. Дульнев Г. Н., Потягайло А. Ю. Расчет температурных полей твердых тел и систем.- Тр./ Лен. Ин-т точн. механики и оптики, 1976, вып. 86,
8. Методы расчета оптических квантовых генераторов /Под ред. Б. У.. Степанова - Минск: Наука и техника, 1968, т. 2.
9. Митькин В. М., Савельев О.С., Бункина М.И. - Журнал прикладной спектроскопии, 1975, т.23, № 2, с. 218.

Лабораторная работа №2

Жидкостное охлаждение силового полупроводникового прибора

Цель работы: исследование теплового режима силовых полупроводниковых приборов, элементов и параметров жидкостных систем охлаждения.

Программа работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и методикой измерения.
2. Провести исследования теплового режима тиристора и системы охлаждения в режиме аккумуляции теплоты.
3. Провести исследования теплового режима тиристора и системы охлаждения в стационарном режиме работы.
4. Рассчитать основные параметры системы охлаждения и охлаждаемого прибора на основании данных, полученных в результате измерений.
5. Составить отчет по проделанной работе.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется для объектов, у которых плотность тепловых потоков на теплоотводящих поверхностях превышает 10^4 Вт/м².

Для охлаждения объектов, работающих продолжительное время и с большими перерывами, целесообразно применять **теплоаккумулирующие системы охлаждения (СО)**. Они включают блок с теплоносителем, насос, систему каналов и трубопроводов, замкнутых в циркуляционный контур. Теплота, выделяющаяся в элементы, передается теплоносителю, который постепенно нагревается. Когда температура теплоносителя достигнет предельно допустимой величины, тепловыделения в объекте прекращаются.

Системы охлаждения, содержащие теплообменный аппарат (ТА), где теплоноситель передает теплоту в окружающее пространство, например, в воздух или другому теплоносителю (например, водопроводной воде), применяются для охлаждения элементов, в которых тепловыделения могут происходить на протяжении длительного времени.

В данной работе исследуется СО, обеспечивающая нормальный тепловой режим силового полупроводникового прибора - **тиристора**.

Тиристорами называют полупроводниковые приборы на основе многослойной *p-n-p-n* структуры. Они используются в качестве преобразовательных элементов в радиоэлектронной аппаратуре, электротехнических устройствах и других областях техники для коммутации электрического тока.

В последние годы общей тенденцией развития силовых полупроводниковых приборов является непрерывное повышение мощности, преобразуемой единичным прибором. При работе такого прибора мощность

тепловыделений в нем превышает 1,5 кВт, поэтому отвод теплоты представляет собой сложную задачу.

Для решения этой задачи используется **воздушное, принудительное жидкостное и испарительное охлаждение.**

В **воздушных СО** в качестве теплоносителя используется воздух; при этом различают свободное воздушное охлаждение, внутреннее перемешивание воздуха в корпусе аппарата, свободную и принудительную вентиляцию.

На рис. 6а схематически представлено **свободное воздушное охлаждение**, а на рис. 6б показана **свободная вентиляция**. Свободная вентиляция осуществляется вследствие разности плотностей воздуха холодного снаружи и нагретого внутри аппарата, при этом в корпусе аппарата имеются специальные вентиляционные отверстия.

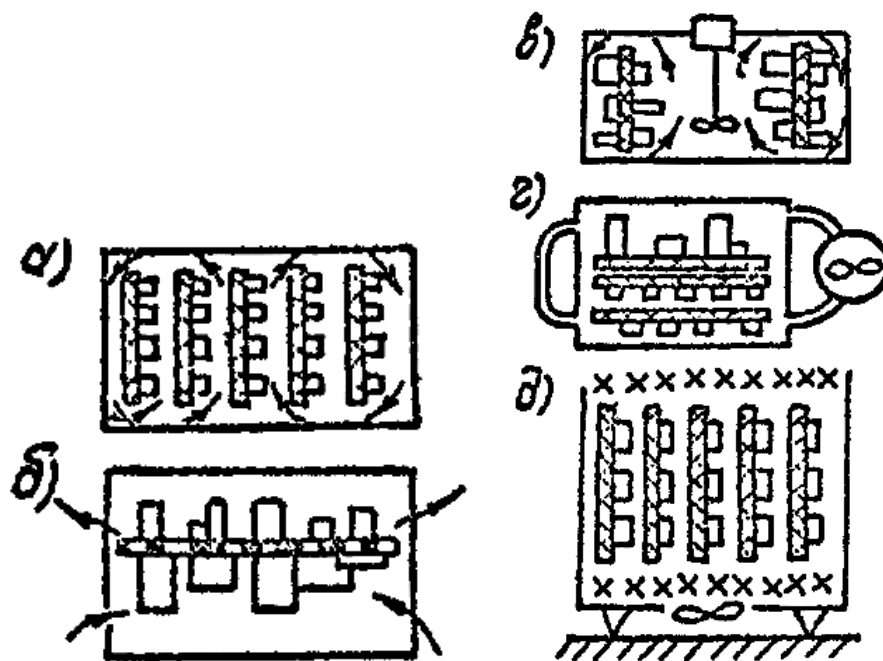


Рис.6 Воздушные системы охлаждения

На рис. 6в приведена возможная схема реализации **внутреннего перемешивания воздуха** в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), а на рис. 6г, д – принудительная вентиляция, которая может быть приточно-вытяжной, приточной или вытяжной.

Приточная вентиляция осуществляется нагнетанием в корпус РЭА охлажденного и очищенного воздуха, **вытяжная** - вытягиванием из РЭА нагретого воздуха. В первом случае вентилятор работает в более холодном и, следовательно, более плотном воздухе и поэтому эффективнее второго случая. В приточно-вытяжной вентиляции нагнетание холодного и вытяжка нагретого воздуха осуществляется вентиляторами.

Жидкостная и испарительная системы охлаждения. На рис. 7е, ж, и, изображены РЭА, у которых внутренний объем корпуса заполнен жидкостью, омывающей поверхность плат, шасси, деталей и т. д.

При этом теплообмен между этими элементами и жидкостью может происходить как в обычных условиях (свободная и вынужденная конвекция), так и при кипении жидкости. На рис. 7ж, схематически изображено принудительное охлаждение приборов, помещенных в жидкость.

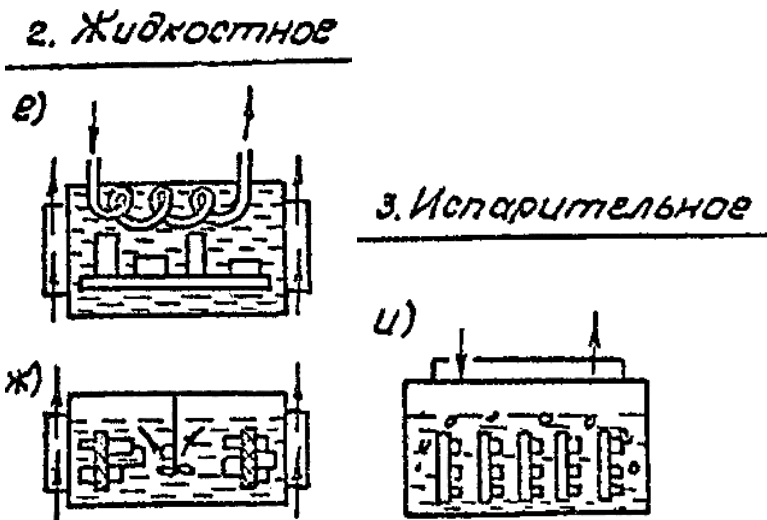


Рис.7 Жидкостные системы охлаждения

Отвод теплоты от нагретой жидкости может быть осуществлен с помощью погруженного в жидкость змеевика с теплоносителем или теплообменником, установленных на корпусе аппарата.

На рис. 8 з, к, схематически изображены системы жидкостного и испарительного охлаждения, в которых теплообмен между источниками теплоты P и жидкостью происходит в условиях вынужденной конвекции в замкнутом контуре.

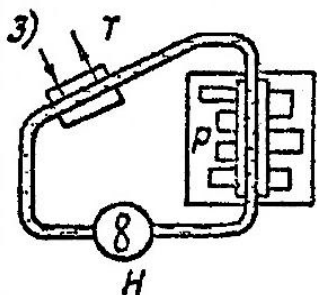


Рис. 8з Жидкостная СО

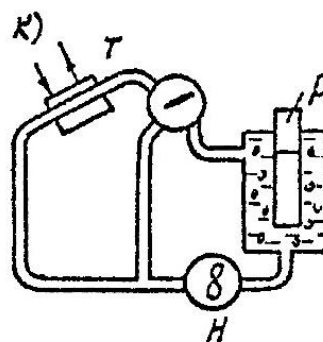


Рис. 8к Испарительная СО

Отвод теплоты от контура осуществляется с помощью теплообменника T , а движение жидкости – с помощью нагнетателя H .

Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторной установки представлен на рис.9.

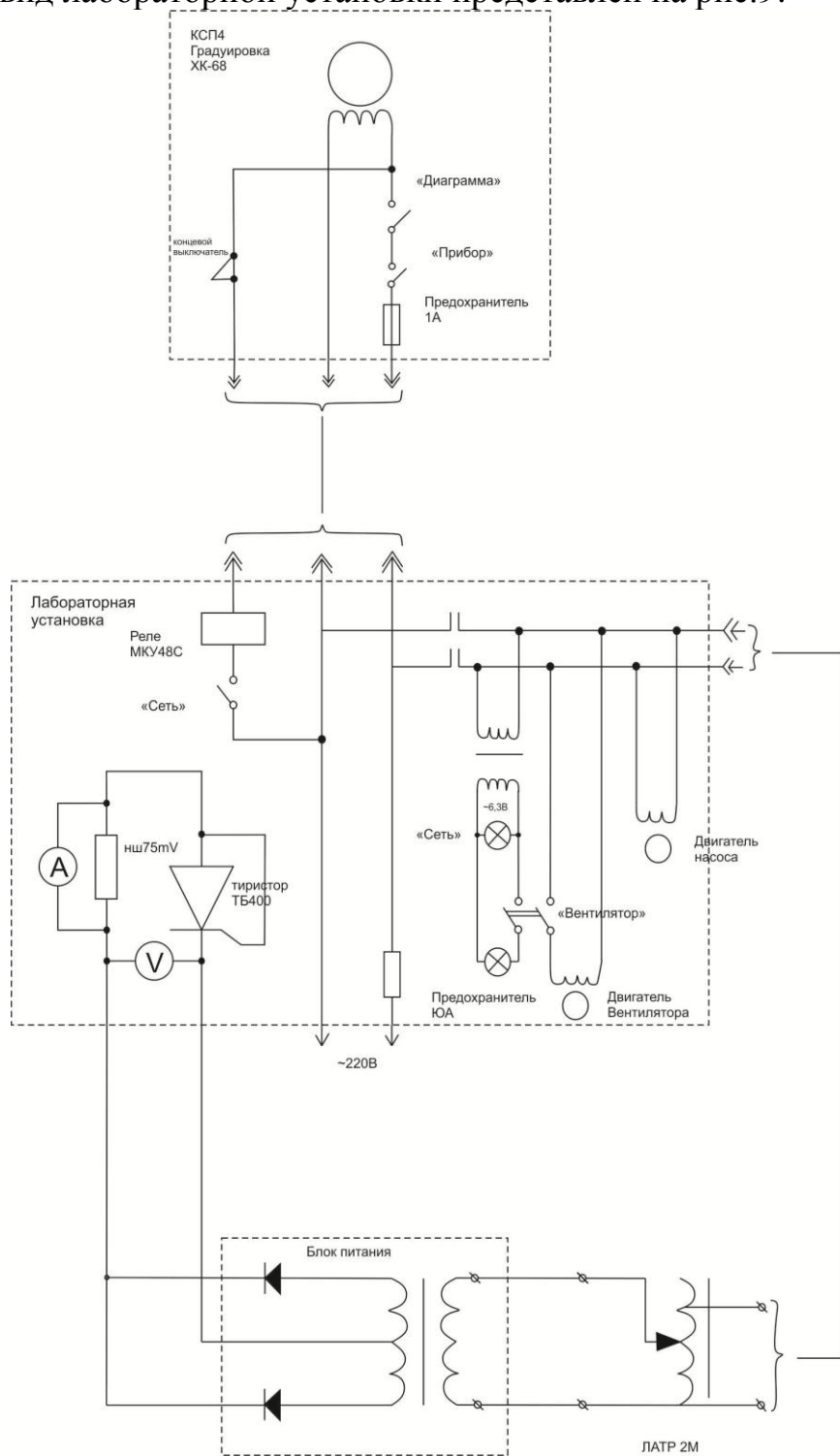


Рис.9 Лабораторная установка

В данной лабораторной работе исследуется *тепловой режим тиристора ТБ 400 с водяным охлаждением* (рис. 10).

На рис. 10 представлено устройство этого тиристора с охладителями.

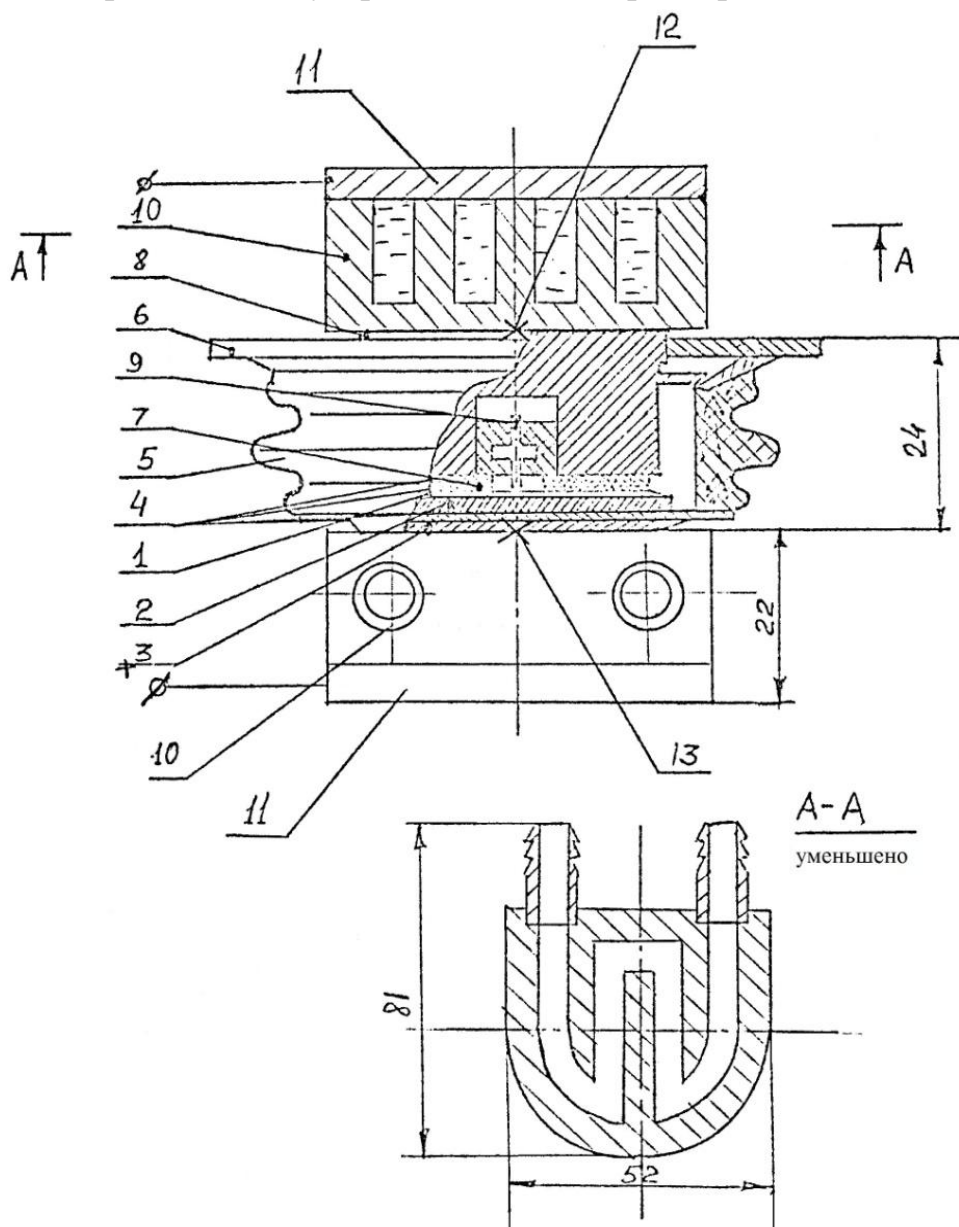


Рис.10 Тиристор ТБ400 с охладителями

Полупроводниковая структура **1** является источником теплоты. Со стороны анода теплота передается к внешней поверхности через вольфрамовую подложку **2**, серебряную прокладку и герметичную мембрану **3**. Со стороны катода теплота через термокомпенсирующий диск **7** и прокладки **4** передается медному электроду **8**. Управление тиристором осуществляется при помощи управляющего электрода **9**. Все элементы тиристора помещены в керамический корпус **5**. Для охлаждения прибора к его анодной и катодной поверхности прижаты охладители **10**, в которых имеются каналы для прокачки жидкости (сечения А-А). Крышки

охлаждающих II служат одновременно контактными пластинами для подвода электрического тока.

В данной работе охлаждение производится только через охладитель, установленный на катоде.

Гидравлическая схема СО представлена на рисунке 11.

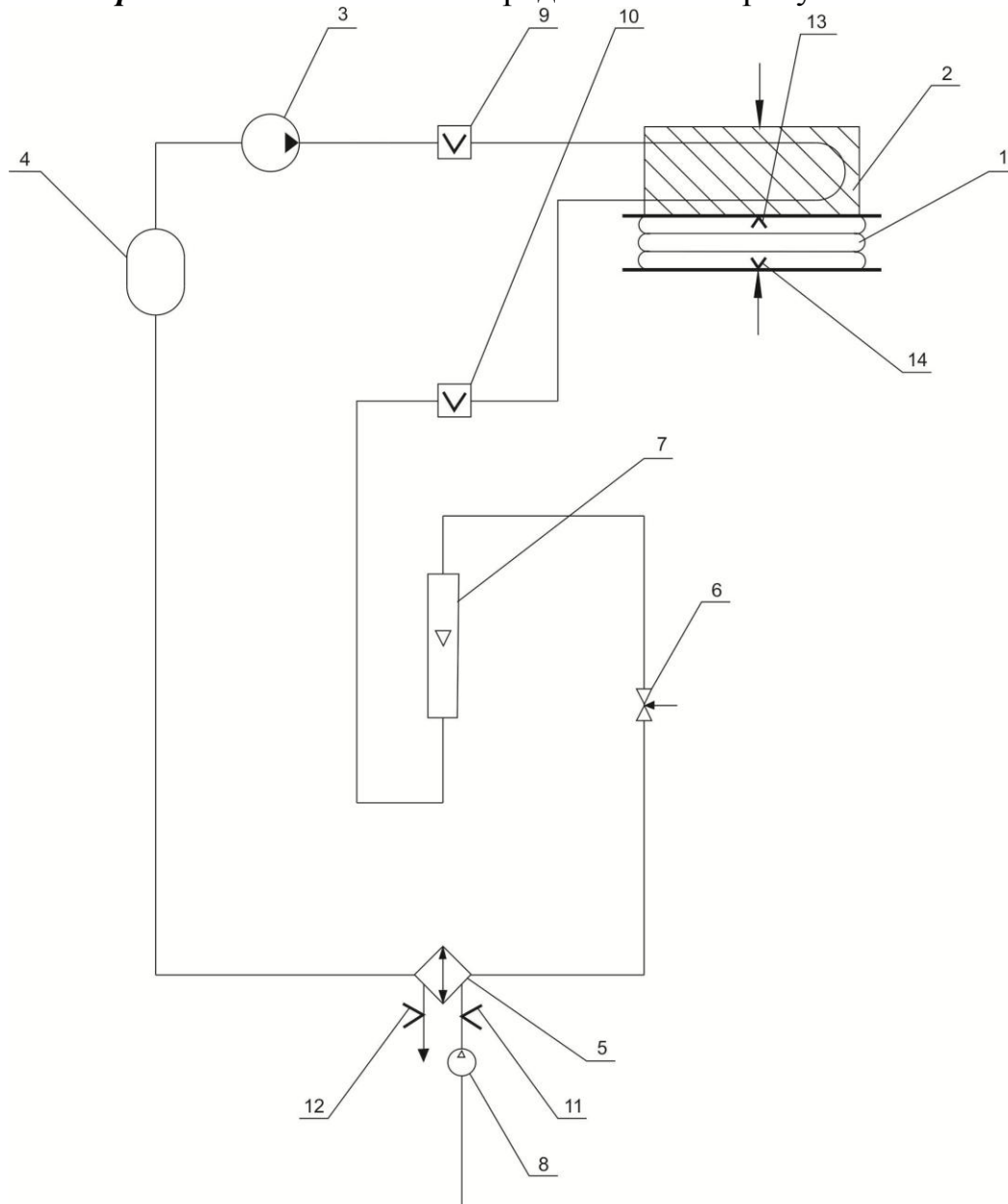


Рис.11 Гидравлическая схема системы охлаждения

Тиристор 1 с охладителем 2 охлаждается жидкостью, прокачиваемой насосом 3 по замкнутому контуру, включающему также бак 4, теплообменник 5, регулировочный кран 6 и расходомер 7. Через теплообменник может прокачиваться воздух вентилятором 8. Для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе охлаждения используются термопары

"хромель-копель" **9** и **10**, для измерения температуры воздуха на входе и выходе теплообменника и температуры поверхностей тиристора **13** и **14** - термопары **11** и **12** (на рис. 11 места установки этих термопар обозначены **12** и **13**).

Тиристор ТВ 400 включен в общую ветвь внешних обмоток трансформатора блока питания. Эти обмотки соединены с тиристором через смежные диоды таким образом, чтобы через него протекал постоянный ток при любой фазе переменного тока во внутренней обмотке трансформатора. Мощность тепловыделений в тиристоре измеряется при помощи вольтметра, нормального шунта и милливольтметра, проградуированного в амперах. Регулирование силы тока, идущего через тиристор, производится при помощи ЛАТРа, подключенного к блоку питания.

С целью обеспечения безопасности работы и сохранности тиристора в случае его перегрева предусмотрены блокировки питания. Для этого в потенциометре КСП 4 установлен концевой выключатель, через который из потенциометра на реле МКУ 48 С подается напряжение 220 В.

Если температура тиристора меньше допустимой, то при включении тумблера "Сеть" лабораторной работы замкнутся контакты реле, и питание будет подано на ЛАТР, двигатель жидкостного насоса и сигнальную лампу "Сеть".

Если температура тиристора выше допустимой, то концевой выключатель будет разомкнут, и питание на реле не подается. Тумблером "Вентилятор" можно включить вентилятор во внешнем контуре теплообменника, при этом загорается сигнальная лампа на передней панели.

С целью упрощения работы с установкой питание приборов осуществляется через разъемы на правой боковой поверхности лабораторной работы. Там же находится разъем соединительных проводов от термопар.

Потенциометр КСП 4 предназначен для измерения температуры от 0 до 100°С при помощи термопар "хромель-копель". Холодные спаи термопар расположены в блоке, находящемся в лабораторной работе. На нем установлен терморезистор, с помощью которого потенциометр автоматически введет поправку на температуру холодных спаев термопары.

Отсчет температуры производится непосредственно со шкалы потенциометра. Термопары **1** и **2** расположены во внешнем контуре теплообменника на входе и выходе воздуха соответственно. Термопары **3** и **4** установлены на входе и выходе воды в охладителе, а термопары **5** и **6** на катодной и анодной поверхностях тиристора. Номера термопар печатаются на диаграммной ленте, на которой одно деление соответствует примерно 1 К.

Для более точного определения температуры надо сопоставить запись на диаграммной ленте со шкалой прибора КСП 4.

Теплоаккумулирующая система охлаждения

Под теплоаккумулирующей СО будем понимать такую систему, где тепловая энергия, выделяющаяся в объекте охлаждения, идет в основном на

изменение теплосодержания элементов системы и лишь незначительная часть рассеивается в окружающую среду. Следовательно, СО - система, которая поглощает теплоту, выделившуюся в элементе, за счет своей теплоемкости.

Рассмотренная выше СО может быть преобразована в теплоаккумулирующую, если прекратить прокачку воздуха через теплообменный аппарат (т.е. выключить вентилятор). В этом случае теплота, выделившаяся в тиристоре, передается охлаждающей жидкости, которая в свою очередь передаст ее теплообменнику, насосу, баку и расходомеру. Эти элементы частично передают теплоту окружающему воздуху и поглощают ее за счет своей теплоемкости. Для приближенного расчета теплового режима тиристора и СО необходимо сделать следующие допущения:

1) Теплоемкость тиристора во много раз меньше общей теплоемкости элементов СО.

2) Температуры элементов СО, через которые прокачивается жидкость, примерно равны температуре жидкости на входе в охладитель тиристора $T_{вх}$.

В этом случае тепловой режим тиристора и СО можно описать следующей системой уравнений:

$$(T_{ппс} - T_K) \frac{1}{R_{вн}} = U \cdot I = \Phi \quad (1)$$

$$(T_K - T_{ж}) \cdot \sigma_{кж} = \Phi \quad (2)$$

$$T_{ж} = 0,5 \cdot (T_{вх} + T_{вых}) \quad (3)$$

$$C_{\Sigma} \cdot \frac{dT_{вх}}{d\tau} + \sigma_c (T_{вх} - T_c) = \Phi \quad (4)$$

$$T_{вых} = T_{вх} + \frac{\Phi}{c \cdot G} \quad (5)$$

где $T_{ппс}$ и T_K – температуры полупроводниковой структуры и поверхности катода тиристора; $R_{вн}$ – внутреннее тепловое сопротивление тиристора; U и I – напряжение на тиристоре и сила проходящего по нему тока соответственно; Φ – мощность тепловыделений в тиристоре; $T_{жс}$ – среднерасходная температура жидкости в охладителе; $T_{вх}$, $T_{вых}$ – температуры жидкости на входе и выходе охладителя; $\sigma_{кж}$ – тепловая проводимость от поверхности катода тиристора и жидкости в охладителе; T_c – температура воздуха в помещении (обычно T_c принимается равной $18,5^{\circ}\text{C}$); σ_c – суммарная тепловая проводимость от элементов СО в окружающий воздух; c и G – удельная теплоемкость и массовый расход теплоносителя – воды.

Важнейшей температурой, определяющей нормальные условия для работы тиристора, будет $T_{ппс}$. Решая систему уравнений (1-5) относительно $T_{ппс}$, получим уравнение, связывающее эту температуру со временем и характеристиками СО.

Для этого примем допущение о том, что в начальный момент времени температуры всех элементов были одинаковы и равны температуре окружающего воздуха – температуре T_c :

$$T_{\text{ппс}} = \Phi \cdot \left\{ R_{\text{вн}} + \frac{1}{\sigma_{\text{кж}}} + \frac{1}{2cG} + \frac{1}{\sigma_c} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_c}{C_{\Sigma}} \cdot T\right) \right] \right\} + T_c \quad (6)$$

Расчет параметров теплоаккумулирующей системы сводится к определению необходимой теплоемкости C_{Σ} и расхода G , которые обеспечивают температуру $T_{\text{ппс}}$ не выше допустимой (у тиристора ТВ 400 температура $T_{\text{ппс}}$ не должна превышать 110 °С).

Для измерения внутреннего теплового сопротивления тиристора со стороны катода жидкостное охлаждение тиристора в лабораторной установке должно производиться тоже со стороны катода. В этом случае практически весь тепловой поток, выделившийся в тиристоре, идет к катодной теплоотдающей поверхности, а термопара, установленная на анодной поверхности, измеряет температуру, близкую к температуре полупроводниковой структуры $T_{\text{ппс}}$.

Определить тепловое сопротивление тиристора можно по формуле (1), подставив вместо $T_{\text{ппс}}$ значение T_a . Более подробные сведения об этом способе измерения $R_{\text{вн}}$ можно найти в работе [6]. По уравнениям (2) и (5) определяются значения $\sigma_{\text{кж}}$, C_{Σ} и σ_c .

Система охлаждения с отводом теплоты через ТА.

Отличие этой системы от ранее описанной заключается в наличии ТА, через внешний контур которого прокачивается воздух при помощи вентилятора.

Расчет компактного теплообменника имеет некоторые отличия. Поверхность компактного теплообменника в единице объема так велика, что не составляет труда увеличить длину или ширину до желаемых значений или выбрать оптимальное решение относительно полного объема теплообменника, минимальной общей потери давления для обоих теплоносителей или минимальной массы теплообменника.

Метод расчета Э-NTU основан на использовании трех безразмерных параметров Э, R и NTU.

Основной характеристикой работы ТА является его эффективность Э. Эффективность передачи тепла в теплообменнике определяется из соотношения

$$\varepsilon = \frac{C_h \cdot (T_1 - T_2)}{C_{\min} \cdot (T_1 - t_1)} = \frac{C_c \cdot (t_2 - t_1)}{C_{\min} \cdot (T_1 - t_1)} \quad (7)$$

где $C_h = W \cdot C$ – произведение массового расхода W на теплоемкость C горячего теплоносителя; $C_c = w \cdot c$ – аналогичное значение для холодного потока; C_{\min} – меньшее из значений C_h и C_c . Э – выражает соотношение между фактически переданным количеством тепла и тем максимально возможным количеством

тепла, которое может быть передано через бесконечно большую поверхность теплообмена.

Число единиц переноса теплоты:

$$N \cdot T \cdot U = \frac{U \cdot S}{C_{min}} = \frac{(t_1 - t_2)}{\Delta t} \quad (8)$$

где U – коэффициент теплопередачи; S – соответствующая ему поверхность; Δt – действительный температурный напор.

Следовательно, число единиц переноса теплоты представляет собой характеристику теплообменника, равную отношению разности температур теплоносителя, пропорциональной переданному тепловому потоку, к температурному напору между теплоносителями, обеспечивающему передачу этого теплового потока. Третий безразмерный параметр - отношение массовых расходных теплоемкостей теплоносителей - определяется формулой:

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (9)$$

Из этой формулы следует, что R всегда должно быть меньше 1.

Подставляя в уравнение теплового баланса $q = U \cdot S \cdot \Delta t = C_h \cdot (T_1 - T_2)$ выражения для \mathcal{E} , R и UNT , находим передаваемый тепловой поток, или тепловую нагрузку теплообменника.

$$\text{При } C_c = C_{min} \quad q = C_c \cdot (t_2 - t_1) = \mathcal{E} \cdot C_c \cdot \left(\frac{C_{min}}{C_c}\right) \cdot (T_1 - t_1) = \mathcal{E} \cdot C_{min} \cdot (T_1 - t_1) \quad (10)$$

$$\text{При } C_h = C_{min} \quad q = C_h \cdot (T_1 - T_2) = \mathcal{E} \cdot C_h \cdot \left(\frac{C_{min}}{C_h}\right) \cdot (T_1 - t_1) = \mathcal{E} \cdot C_{min} \cdot (T_1 - t_2) \quad (11)$$

Рассмотрим *перекрестноточные компактные теплообменники*. Значение для эффективности перекрестного тока, когда оба теплоносителя не перемешиваются, получены Нуссельтом:

$$f := \frac{1 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[1 - e^{-NTU} \cdot \sum_{m=0}^n \frac{(NTU)^m}{m!} \right] \cdot \left[1 - e^{-R \cdot (NTU)} \cdot \sum_{m=0}^n \frac{[R \cdot (NTU)]^m}{m!} \right]}{R \cdot (NTU)} \quad (12)$$

При $R = 0$ данная формула значительно упрощается:

$$\mathcal{E} = 1 - \exp(-NTU) \quad (13)$$

Уравнения (12) и (13) в графическом виде представлены на рис. 12.

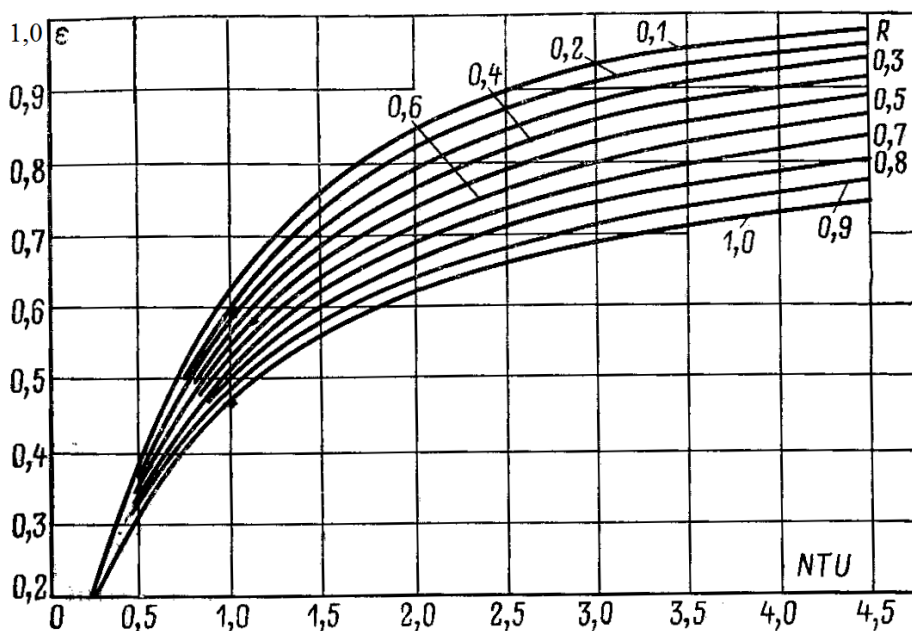


Рис.12 Эффективность перекрестноточного теплообменника с двумя неперемешивающимися потоками.

В данной лабораторной работе эффективность рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{[c \cdot G \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вхвозд}})]} \quad (14)$$

где Φ - тепловой поток, отводимый через теплообменный аппарат; $T_{\text{вых}}$ - температура жидкости на входе в ТА; $T_{\text{вхвозд}}$ - температура воздуха на входе в ТА; c и G - удельная теплоемкость и массовый расход теплоносителя – воды соответственно.

Абсолютно эффективным ТА считается такой, который охлаждает жидкость до температуры воздуха на входе в теплообменнике.

Порядок выполнения работы

1. Теплоаккумулирующая СО.

1.1 Ознакомиться с гидравлической схемой установки (рис. 11). Проверить правильность электрических соединений. Тумблеры "Сеть" и "Вентилятор" должны быть включены, ручка ЛАТРа в крайнем левом положении.

1.2 Получить у преподавателя значения силы тока и расхода теплоносителя.

1.3 Включить лабораторную установку в сеть вилкой; включит потенциометр КСП 4 тумблером "Прибор" и "Диаграмма", убедиться, что он работает. Так же на потенциометре КСП 4 установить скорость диаграммной ленты.

1.4 Включить тумблер "Сеть" на лабораторной установке. При этом должен начать работать насос.

1.5 По заданному значению расхода теплоносителя в соответствии с градуировочным графиком (рис.13) установить при помощи маховика на расходомере требуемый расход жидкости.

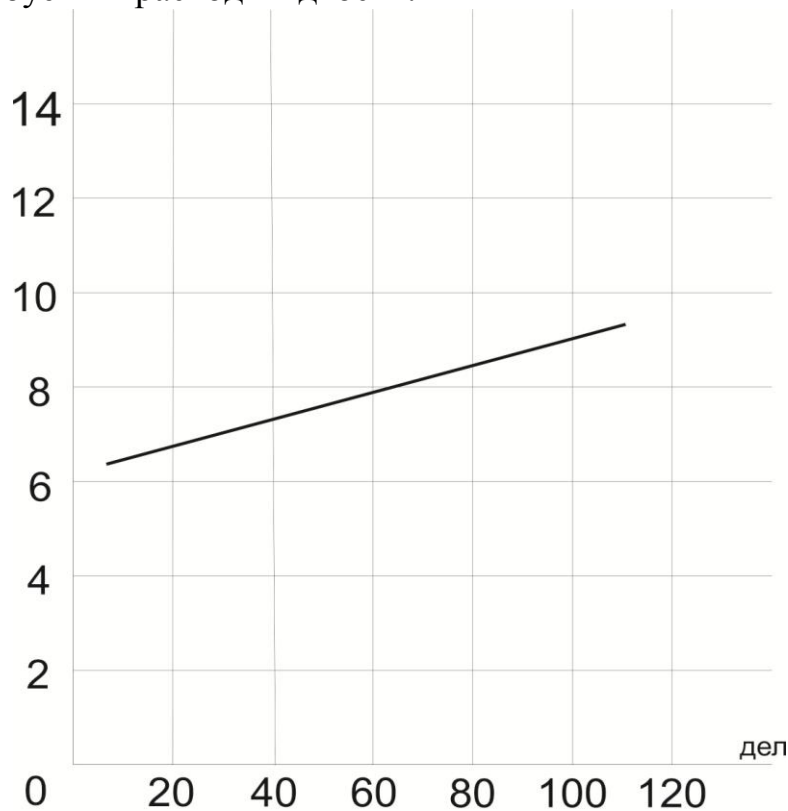


Рис.13 Тарировка расходомера.

1.6 Установить ручкой ЛАТРа требуемое значение тока, идущего через тиристор, по амперметру на лицевой панели (поворачивать ручку ЛАТРа из крайнего левого положения до тех пор, пока на амперметре не установится требуемое значение силы тока).

1.7 Поддерживать установленные значения тока и расхода жидкости в течении времени, за которое температура катода достигнет 100°C и лабораторная установка начнет отключаться при срабатывании блокировки. (Достаточно нагреть катод до температуры 70°C и перейти к пункту 1.8).

1.8 Перевести ручку ЛАТРа в крайнее левое положение, тем самым выключить ток, идущий через тиристор. Включить тумблер "Вентилятор" и в течение 15 мин. охлаждать СО (охлаждать катод нужно до температуры 40°C).

2. СО с отводом теплоты через ТА.

2.1 Установить требуемое значение силы тока, идущего через тиристор поворотом ручки ЛАТРа.

2.2 Поддерживать установленное значение тока и расхода теплоносителя в течении времени, пока не наступит стационарный режим. Перестанут изменяться

температуры элементов, на диаграммной ленте будут вертикальные прямые линии.

Порядок расшифровки результатов измерений.

На диаграммной ленте цифрами обозначены следующие температуры:

- 1 - $T_{\text{ВХ.ВОЗД}}$ - температура воздуха на входе в ТА;
- 2 - $T_{\text{ВЫХ.ВОЗД}}$ - температура воздуха на выходе из ТА;
- 3 - $T_{\text{ВХ}}$ - температура теплоносителя на входе в охладитель тиристора;
- 4 - $T_{\text{ВЫХ}}$ - температура теплоносителя на выходе из охладителя тиристора;
- 5 - $T_{\text{А}}$ - температура анодной теплоотдающей поверхности тиристора;
- 6 - $T_{\text{К}}$ - температура катодной теплоотдающей поверхности тиристора.

Расчет теплоаккумулирующей СО.

1. Определить внутреннее тепловое сопротивление тиристора решением уравнения (1) относительно $R_{\text{вн}}$, подставив в формулу вместо $T_{\text{ппс}}$ значение $T_{\text{А}}$.
2. Определить тепловую проводимость от поверхности катода и жидкости решением уравнений (2) и (3) относительно $\sigma_{\text{КЖ}}$.
3. Решением уравнения (4) относительно C_{Σ} и $\sigma_{\text{С}}$ определить суммарную теплоемкость СО и тепловую проводимость от нее в среду.

Решаем уравнение (4) ПО ДВУМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ТОЧКАМ, так как в этом уравнении два неизвестных. Значение $T_{\text{ВХ}}$ берем в начале и в конце эксперимента.

Производная по времени определяется при помощи графических построений. Из диаграммной ленты в начале и в конце эксперимента берем отношение изменения температуры ко времени, за которое произошло это изменение.

Например, при скорости диаграммной ленты 600 мм/с отношение $\frac{dT}{d\tau}$ приблизительно равно:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{1/2 \cdot K}{120c} = 0,01 \frac{K}{c}$$

4. Рассчитать зависимость $T_{\text{ппс}}$ от времени по формуле (6). Нанести результаты расчетов на диаграммную ленту с экспериментальными данными.

5. Определить эффективность теплообменного аппарата по формуле (14). Значение c – удельной теплоемкости берем из справочника при температуре:

$$\frac{(T_{\text{ВЫХ}} + T_{\text{ВХ}})}{2}$$

6. Определить коэффициент теплоотдачи по формулам: со стороны горячего теплоносителя:

$$U_h = \frac{1}{\frac{1}{(\eta_{wh} \cdot h_h)} + \frac{a}{\left(\frac{S_w}{S_h}\right) \cdot K_w} + \frac{1}{\left(\frac{S_c}{S_h}\right) \cdot \eta_{wc} \cdot h_c}}$$

где индекс w относится к значениям для стенки, разделяющей потоки, за исключением η_w , означающего средневзвешенную эффективность поверхности.

Коэффициент теплоотдачи со стороны холодного теплоносителя:

$$U_h = \frac{1}{\left(\frac{s_h}{s_c}\right) \cdot \eta_{wh} + \frac{a}{\left(\frac{s_w}{s_c}\right) \cdot K_w} + \frac{1}{\eta_{wc}/h_c}}.$$

7. Определить R и NTU по формулам (8) и (9).

8. Найденное значение действительной эффективности теплообменника \mathcal{E} по формуле (14) сравнить с требуемой эффективностью по графику на рис. 12.

$$\Delta = \frac{\mathcal{E}_{\text{эксп}} - \mathcal{E}_{\text{расч}}}{\mathcal{E}_{\text{расч}}} \cdot 100\%$$

Расчет СО с отводом теплоты через ТА.

Для расчета выполнить пункты **1, 2, 3, 5, 6, 7, 8.**

Содержание отчета

В отчете приводятся:

- 1) гидравлическая схема лабораторной установки;
- 2) диаграммная лента с результатами измерений;
- 3) расчеты $R_{вн}$, $\sigma_{кж}$, C_{Σ} , σ_c и \mathcal{E} для теплоаккумулирующей СО и СО с отводом теплоты через ТА;
- 4) график зависимости $T_{ппс}$ от времени для теплоаккумулирующей системы;
- 5) расчет коэффициента теплоотдачи; определение значений R и NTU ;
- 6) сравнение полученного значения эффективности с требуемым значением по графику и расчет погрешности.

Литература

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре - Н.: Высш. шк., 1984, 247 с.
2. Волхов В.А., Хрычиков Э.Е., Киселев В.И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. - М.: Сов. радио. 1975, 144 с.
3. Исакиев А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. Эффективные способы охлаждения сильных полупроводниковых приборов. - Л.: Энергоиздат. 1982, 136 с.
4. Замяшин В.Я., Кондратьев Б.В. Тиристоры. - М.: Сов. радио. 1980, 64 с.
5. ГСП. Приборы автоматические следящего уравнивания КСМ 4, КСП 4, КСП 4И, КСУ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 3.9026.171.ТО. 1979 - 80 с.
6. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г. Испытание силовых полупроводниковых приборов. - М.: Энергоиздат. 1981.
7. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. - М.: Атомиздат. 1979 - 216 с.

Лабораторная работа №3

Сравнение способов охлаждения РЭА кассетной конструкции

Цель работы: освоение методов экспериментальной оценки тепловых режимов РЭА, приобретение практических навыков работы с измерительными приборами и оборудованием, ознакомление со способами охлаждения кассетных РЭА и их сравнительная характеристика.

Программа работы

1. Ознакомление с экспериментальной установкой и измерительными устройствами.
2. Определить время выхода на стационарный режим.
3. Провести измерение температур в стационарном режиме для каждого макета при одинаковой мощности источников тепла.
4. Вычислить по результатам эксперимента среднеповерхностные и местные значения температур нагретой зоны; среднеповерхностные температуры корпуса и средние температуры воздуха.
5. Рассчитать для макетов, выбранных по указанию преподавателя, теоретические значения температур нагретой зоны, корпуса и воздуха.
6. Сравнить расчетные и экспериментальные результаты.
7. Оформить отчет о проделанной работе.

Расчет теплового режима РЭА

Кассетные конструкции аппаратов чаще всего применяются при проектировании устройств на навесных элементах, микромодулях и интегральных схемах, которые располагаются на одинаковых монтажных платах (кассетах) с одной или обеих сторон. Вся совокупность кассет помещается в корпус.

Для охлаждения таких приборов используют различные способы: естественное и вынужденное воздушное охлаждение, кондуктивные системы отвода тепла и др.

Анализ теплового режима и способ определения температурного поля приведены в работах Г.Н.Дульнева и Н.Н.Тарновского [1 – 2].

Приведем *графоаналитический метод расчета теплового режима одноблочных кассетных РЭА при естественной вентиляции.*

Согласно этому методу представим температуру t_j в виде суммы температур t_c среды и перепадов на различных участках движения теплового потока от области j до внешней среды:

$$t_i - t_c = P \cdot R_{кк} + P \cdot R_{зк} + P \cdot R_{оз}, \text{ где } P - \text{ мощность, рассеиваемая аппаратом.}$$

Первый член в правой части уравнения равен перегреву корпуса: $t_k - t_c = \nu_k = PR_{кк}$, второй соответствует перепаду средних температур между поверхностью зоны и корпусом, третий – перепаду температур внутри нагретой зоны между

центром и ее наружной поверхностью; $R_{кc}$, $R_{зк}$, $R_{оз}$ – тепловые сопротивления, соответствующие перечисленным составляющим.

Исходная информация

Размеры корпуса аппарата – L_{zx} , L_{zy} , $L_{zз}$;

Размеры нагретой зоны – L_{1x} , L_{1y} , L_{1z} ;

Среднее расстояние (зазор) между платами;

Площадь перфорационных отверстий (для вентилируемых аппаратов) в корпусе;

Эффективные коэффициенты теплопроводности зоны: λ_x , λ_y , λ_z .

Аппараты в герметичном корпусе

Если ширина между кассетами $b \leq (2-3)$ мм или кассеты ориентированы горизонтально, то сквозная вентиляция отсутствует.

Тепловое сопротивление от корпуса в окружающую среду находится из соотношения: $R_{кc} = (\alpha_c \cdot S_k)^{-1}$, где α_c , S_k – соответственно коэффициент теплопередачи от корпуса, определяемый условиями теплообмена, и площадь его поверхности.

Величина сопротивления $R_{зк}$ определяется зазором между зоной и корпусом. Значение $R_{оз}$ может быть найдено по рис.14 и формулам:

$$R_{oc} = \frac{C \cdot L_{1z}}{4\lambda \cdot L_{1z} \cdot L_{1y}}; C = C \cdot \left(\frac{l_3}{l_1}, \frac{l_3}{l_2}\right); \frac{l_3}{l_2} = \frac{L_{1z}}{L_{1y} \cdot \sqrt{\lambda_y / \lambda_z}}; \frac{l_3}{l_1} = \frac{L_{1z}}{L_{1x} \cdot \sqrt{\lambda_x / \lambda_z}}$$

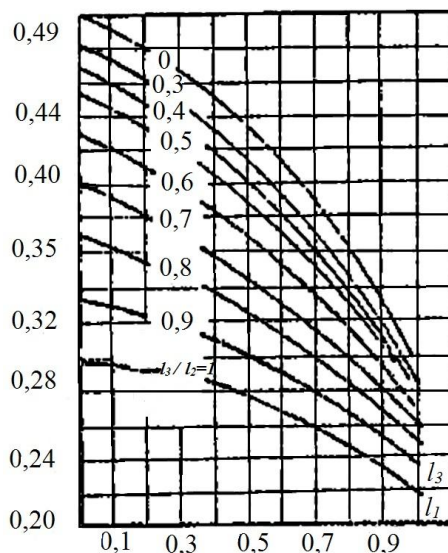


Рис.14 Определение величины теплового сопротивления

Аппараты с естественной вентиляцией

Рассматриваются одноблочные РЭА, нагретая зона которых составлена из вертикально ориентированных кассет с зазорами между ними $b \geq 2-3$ мм; корпус аппарата может быть как герметичным, так и перфорированным.

В этом случае наблюдаются либо циркуляционные (герметичный корпус), либо сквозные (перфорированный корпус) токи воздуха внутри аппарата. На основе анализа теплового режима кассетных конструкций РЭА с различными способами охлаждения был разработан графоаналитический метод расчета, изложенный ниже.

Вспомогательные расчеты

Площадь поверхности корпуса аппарата: $S_k = 2(L_{3x}L_{3y} + L_{3y}L_{3z} + L_{3x}L_{3z})$, м².

Удельный тепловой поток с поверхности корпуса: $W_k = P/S_k$, Вт/м².

Коэффициент перфорации: $K_p = S_{min}/S_a$, где S_{min} – меньшее из двух значений площадей отверстий в нижней или верхней части корпуса аппарата; S_a – площадь основания корпуса аппарата.

Размеры нагретой зоны совпадают с размерами натянутого на нее параллелепипеда.

Площадь поверхности нагретой зоны:

$$S_3 = 2(L_{1x}L_{1y} + L_{1y}L_{1z} + L_{1x}L_{1z}).$$

Удельная мощность на единицу поверхности зоны: $W_3 = P/S_3$, Вт/м².

Эффективный зазор между платами, площадь которых равна $L_{1x} \cdot L_{1z}$:

$$b_{\text{эф}} = b - \sum V_{gi} \cdot (L_{1x} \cdot L_{1zn})^{-1},$$

где b и n – расстояние между платами и их число; $\sum V_{gi}$ – суммарный объем деталей на всех платах.

Приведем способ расчета тепловых сопротивлений отдельных областей аппаратов в условиях естественной конвекции.

Тепловое сопротивление:

$$R_{kc} = \frac{r_{kc} \cdot a}{S_k}$$

Зависимости удельного теплового сопротивления r_{kc} от удельной мощности W_k и коэффициента a от степени перфорации K_p приведены на рис. 15 а, г.

Тепловые сопротивления: $R_{3к} = \frac{r_1 \cdot K_{в1} \cdot a}{S_1 \cdot (1,18 - 0,46 \cdot 10^{-2} \cdot t_3)}$;

$$R_{о3} = \frac{r_0 \cdot K_{в2} \cdot 2a}{S_3 \cdot 6,5 \cdot (1,35 - 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot t_3)(0,01 + L_{1y})},$$

где r_0, r_1 – параметры, зависящие от удельной мощности зоны W_3 , приведены на рис.15б; $K_{в1}, K_{в2}$ – множители, учитывающие зависимость теплового сопротивления от параметра $b_{\text{эф}}$, эти параметры приведены на рис.15в; t_0, t_3 – температуры центра и поверхности нагретой зоны; L_{1y} – длина нагретой зоны в направлении оси y , в метрах.

$$t_k = t_c + P \cdot R_{kc}, \quad t_3 = t_k + P \cdot R_{3к}, \quad t_0 = t_3 + P \cdot r_{о3}.$$

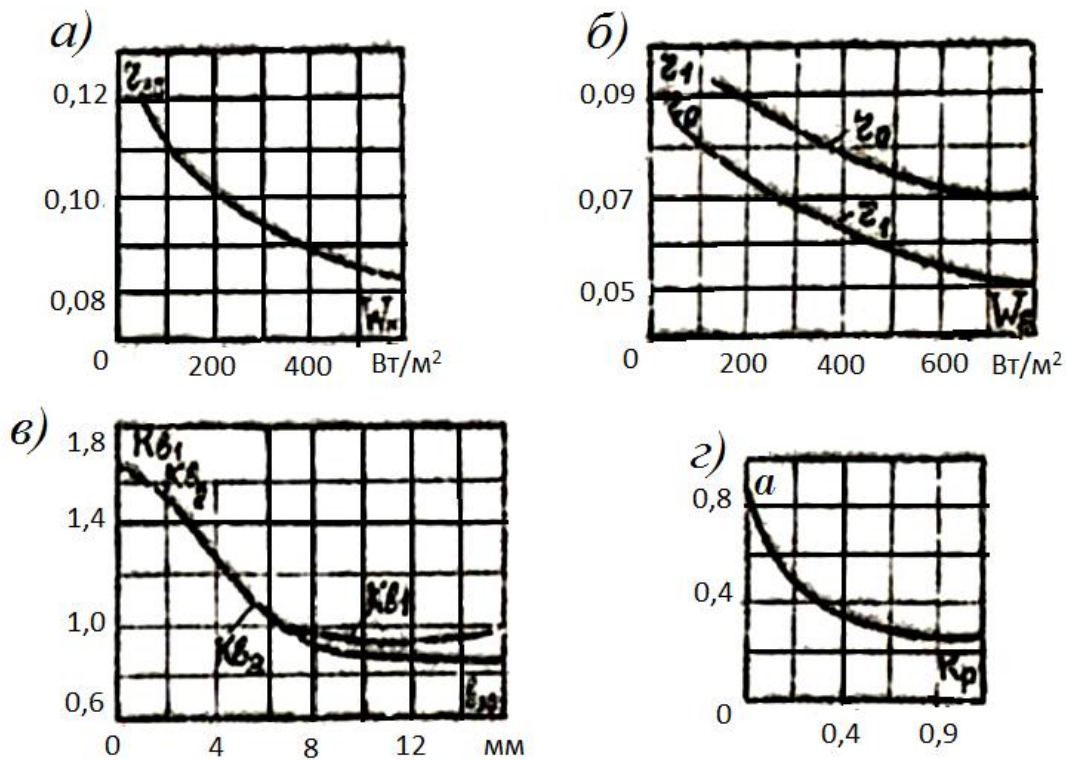


Рис.15 Расчетные графики для определения тепловых сопротивлений.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в себя четыре макета РЭА кассетной конструкции, пульт управления (ПУ) и потенциометр ПП-63.(рис.16)



Рис.16 Экспериментальная установка

Макеты (рис.17) имеют одинаковые нагретые зоны и габариты, но охлаждаются различными способами:

- первый помещен в герметичный корпус 1 (рис.17а),
- второй в перфорированный (рис.17б),
- третий охлаждается с помощью теплостоков (рис.17в),

- четвертый – принудительной вентиляцией (рис.17г).

Нагретые зоны (НЗ) макетов состоят из пяти вертикальных плат 2, имитирующих кассеты с функциональными элементами.

Платы образуют гладкие плоские каналы. Каждая плата выполнена из стеклотекстолитовых пластин ($\lambda = 0,4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$), между которыми находится нихромовая проволока нагревателя.

Кондуктивный теплоотвод выполнен из медной фольги, наклеенной на платы. Последние присоединены к основанию корпуса (холодной плите), охлаждаемого водой.

Регулировка расхода воды осуществляется краном «Вода».

На рис. 17 б, г представлены модели РЭА в перфорированном корпусе. Модель на рис.17б охлаждается путем естественной конвекции. Перфорации выполнены в основании корпуса, нижних частях боковых стенок и крышек.

На рис. 17г представлена модель принудительно вентилируемого аппарата. Воздух по трубопроводу нагнетается центробежным вентилятором, расположенным в пульте управления. Расход измеряется с помощью сужающего устройства и регистрируется микроманометром «Аскания». Включение вентилятора осуществляется тумблером «Вентилятор». Расход воздуха регулируется ручкой «Воздух».

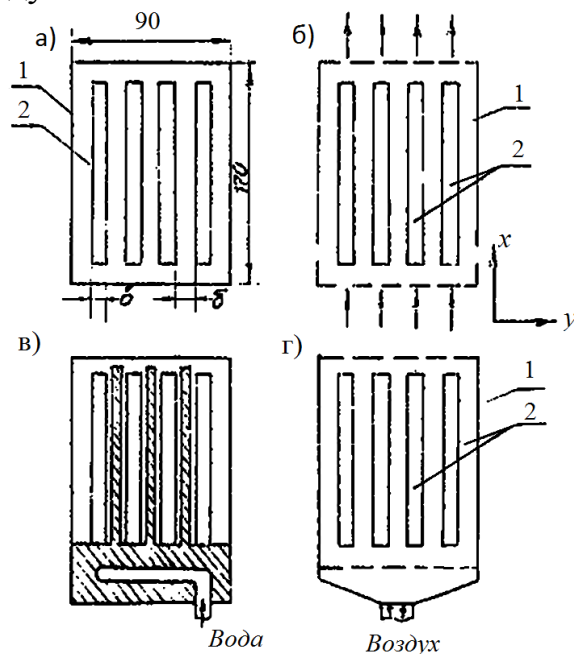


Рис.17 Макеты РЭА кассетной конструкции

Для измерения температурного поля в макетах установлены термодары. Размещение термодаров в НЗ показано на рис.18.

Расстановка датчиков позволяет выявить характер температурного поля нагретой зоны, а также определить средние и локальные температурные перегревы.

Конструкция макетов обеспечивает симметричность относительно вертикальной оси температурного поля каждой пластины и НЗ. Поэтому термопары установлены лишь по одну сторону от оси симметрии, а результаты измерения распространяются на всю НЗ.

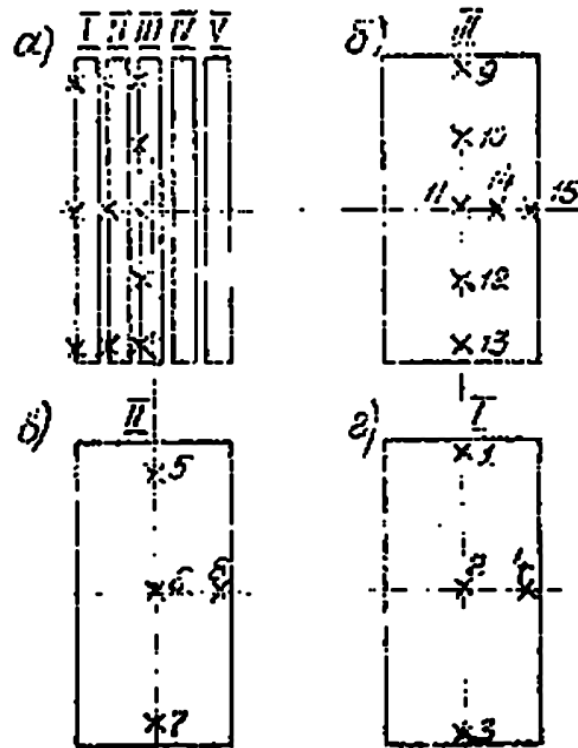


Рис.18 Расположение термопар в нагретых зонах: а) схематическое изображение нагретых зон (НЗ); б)-г) расположение термопар на I, II,III пластинах соответственно; х – места установок термопар.

Термопары 16 – 21 установлены на корпусах с внутренней стороны согласно рис.19. Термопары устанавливаются на двух любых смежных сторонах. Их расстановка предусматривает выявление характера температурного поля по высоте корпуса. Температура воздуха измеряется термопарами 22 и 23. Первая устанавливается на входе воздуха в нагретую зону, вторая – на выходе из нее.

Термопара 24 измеряет температуру холодной плиты в макете с кондуктивным теплоотводом.

Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), развиваемая термопарами, измеряется цифровым микровольтметром.

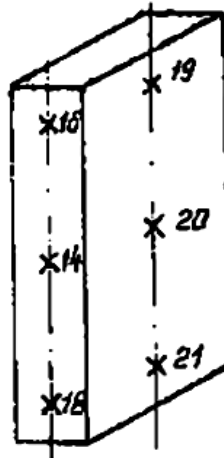


Рис.19 Расположение термопар на внутренней стороне корпуса.

Перегрев θ между рабочим спаем термопары и окружающей средой t_c , соответствующий ТЭДС, определяется по формуле:

$$\theta = k \cdot E,$$

где E – показания потенциометра, мВ, $k = 24$ К/мВ.

Температура в измеряемых точках равна $t = t_c + \theta$.

Ручки переключателей термопар выведены на горизонтальную панель ПУ.

Переключатели 1 и 2 соответствуют макетам с герметичным и с перфорированным корпусом, 3 – кондуктивный теплосток, 4 – принудительная вентиляция.

Включение макетов в измерительную схему осуществляется переключателем «Общий». Напряжение питания на нагреватели подается от автотрансформатора МЭТП при включенном тумблере «Сеть». Для расширения диапазона мощностей, подаваемых в нагретые зоны, предусмотрено параллельное включение нагревателей. Переключатели «Включение моделей» размещены под макетами на наклонной лицевой панели. При положении «0» нагреватели обесточиваются. Мощность, подаваемая в НЗ, контролируется по показаниям вольтметра и амперметра.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Установить переключатели «Включение модели» в положение «Параллельно».
2. Включить тумблер «Сеть».
3. Установить заданную мощность нагревателей перемещением рукоятки автотрансформатора. Заданная мощность устанавливается по показаниям вольтметра и амперметра. Записать показания в таблицу 1.
4. Открыть кран «Вода».
5. Включить тумблер «Вентилятор».

Перемещая ручку «Воздух», установить по показаниям микроманометра заданную величину расхода воздуха и записать показания в таблицу 1. Расход воздуха измеряется с помощью сужающего устройства. Статическое давление воздуха из сужающего устройства отбирается резиновым шлангом через

калиброванное отверстие и подводится к микроманометру типа «Аскания». Жидкость в другом колене микроманометра находится под воздействием атмосферного давления. Так как потери давления на выходе сужающего устройства незначительны, то показание микроманометра позволяет определить среднюю скорость потока в сечении, совпадающем с калиброванным отверстием. Покажем это, используя уравнение Бернулли для трубки тока:

$$0,5 \cdot \rho \cdot U^2 + P = 0,5 \cdot \rho \cdot U_0^2 + P_0 \quad (*),$$

где U, P – скорость и статическое давление в узком сечении диффузора; U_0, P_0 – скорость и давление после сужающего устройства.

Последнее сечение для U_0 и P_0 можно взять на достаточном удалении от диффузора, чтобы $P_0 = P_{атм}$, а $U_0 = 0$.

Подставляя эти значения P_0 и U_0 в (*), получим: $U = \sqrt{\frac{2(P_{атм} - P)}{\rho}}$.

Разность давлений $P = P_{атм} - P$ можно вычислить, если измерена высота столба ΔH рабочей жидкости между двумя ее уровнями в микроманометре и известна плотность $\rho_{ж}$ этой жидкости $\Delta P = \Delta H \cdot \rho_{ж} \cdot g$, $\rho_{ж} = 998 \text{ кг/м}^3$.

После этого расход воздуха можно определить по формуле: $G_v = F_d \sqrt{2\Delta P \rho^{-1}}$, где $F_d = 0,196 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ – площадь сечения диффузора в месте отбора статического давления; $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$.

6. Установить переключатели 1 – 4 на номер, соответствующий положению термопары в центре нагретой зоны.
7. Установить рабочий ток потенциометра.
8. Установить переключатель «Общий» в положение «4».
9. Измерить термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) в точках, указанных преподавателем. Повторять измерение ТЭДС каждые 10 мин до установления стационарного режима и записать показания в таблицу 2.
10. Проверить рабочий ток потенциометра и мощность источников питания.
11. Измерить показания термопар во всех точках. Результаты измерения занести в таблицу 3.
12. Повторить п.10 и 11, устанавливая переключатель «Общий» последовательно в положения «3», «2», «1».
13. Вывести рукоятку автотрансформатора на нулевое положение.
14. Отключить тумблеры «Сеть», «Вентилятор».
15. Выдернуть вилку из розетки.
16. Обработка результатов наблюдений.

Обработка результатов измерений

1. При выполнении первой части работы – определение времени выхода на стационарный режим – результаты измерения вносятся в табл. 1 и 2.

Табл. 1

ΔH, м	G _v , м ³ /с	U, В	I, А	P, Вт

Табл.2

r, с				
E_i , мВ				
ϑ_i , К				

2. При выполнении второй части работы результаты вносятся в табл. 3 и 4.

Табл.3

№ термопар	Макет 1		Макет 2		Макет 3		Макет 4	
	E_i , мВ	θ_i , К	E_i , мВ	θ_i , К	E_i , мВ	θ_i , К	E_i , мВ	θ_i , К
1								
2								
...								
24								

Табл.4

	$t_{по}$, °С	t_3 , °С	t_k , °С	T_B , °С	t_v , °С	t_{v3} , °С
Макет 1						
Макет 2						
Макет 3						
Макет 4						

Геометрические параметры макетов приведены в табл.5

Табл.5

№ пп	Название параметра	Обознач.	Величина	Ед. измер
1	Площадь поверхности корпуса	S_k	$9.4 \cdot 10^{-2}$	m^2
2	Площадь перфорации в	S_p	$0.37 \cdot 10^{-2}$	m^2
3	крышке	K_p	0.35	-
4	Коэффициент перфорации	K_3	0.32	-
5	Коэффициент заполнения	$L_{1x} \cdot L_{1z}$	$148 \cdot 100 \cdot 1$	м
6	Размеры плат	δ	0^{-3}	м
7	Толщина плат	b	$2 \cdot 10^{-3}$	м
8	Зазор между платами	ε	$10 \cdot 10^{-3}$	-
	Степень черноты поверхностей корпуса и нагретой зоны		0.8	

3. Расчетные соотношения для обработки результатов измерения.

Среднеповерхностная температура центральной платы:

$$T_{\text{по}} = \frac{\theta_9 + \theta_{10} + \theta_{11} + \theta_{12} + \theta_{13} + \theta_{14} + \theta_{15}}{7 + t_c}$$

Среднеповерхностная температура нагретой зоны:

$$T_3 = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_7 + \theta_8 + \theta_9 + \theta_{13} + \theta_{15}}{10 + t_c}$$

Среднеповерхностная температура поверхности корпуса:

$$T_{\text{к}} = \frac{\theta_{16} + \theta_{17} + \theta_{18} + \theta_{19} + \theta_{20} + \theta_{21}}{6 + t_c}$$

Средняя температура воздуха: $T_{\text{в}} = t_c + \frac{(\theta_{22} + \theta_{23})}{2}$.

Среднеобъемная температура аппарата:

$$T_v = \frac{1}{23 \cdot \sum \theta_i + t_c}, \quad i = 1..23.$$

Среднеобъемная температура нагретой зоны:

$$T_{v3} = \frac{1}{15 \cdot \sum \theta_i + t_c}, \quad i = 1..15.$$

Литература

1. Дульнев Г.Н., Тарановский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1971, 248с.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре - Н.: Высш. шк., 1984, 247 с.

Лабораторная работа № 4

Термоэлектрическая и жидкостная системы охлаждения тепловыделяющих элементов

Цель работы - освоение методики экспериментальной и теоретической оценок теплового режима транзисторов при использовании термоэлектрического и водяного охлаждения, приобретение практических навыков работы с измерительными приборами и оборудованием, сравнение эффективности исследуемых способов охлаждения.

Программа работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измерительным устройством.
2. Провести измерения температур в стационарном режиме при постоянной мощности тепловыделений в транзисторе и при различных режимах работы (значениях силы тока) термобатареи.
3. Рассчитать значения температур транзистора при использовании жидкостной и термоэлектрической систем охлаждения.
4. Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными.
5. Составить отчет о проделанной работе.

Расчет теплового режима радиоэлектронного элемента

Общие понятия. В работе исследуется тепловой режим транзистора типа КТ807Б. Это кремниевый мезапланарный транзистор типа *n-p-n*. Чаще всего такие транзисторы применяются в стабилизаторах напряжения, каскадах строчной развертки и т.п. В процессе работы такие транзисторы способны в зависимости от режима рассеивать 10-15 Вт тепловой энергии. В случае, если не принимать мер по отводу этой энергии, температура *p-n* перехода может превысить допустимое значение и транзистор выйдет из строя.

Максимально допустимая температура корпуса полупроводниковых элементов (диодов, транзисторов и пр.) зависит от многих факторов и может колебаться от +60 до 120°C. Эта температура определяется материалом полупроводникового вещества, тепловым сопротивлением между *p-n* переходом и корпусом, условиями отвода тепла от корпуса.

Общий вид исследуемых транзисторов, расположенных на платах, изображен на рис.20. Транзистор 1 вместе с подложкой 2 при помощи элементов крепления 3 располагается на плате 4. Тепловая энергия, выделяющаяся в транзисторе, передается в окружающую среду и при помощи кондукции - через подложку в плату.

В лабораторной работе исследуется тепловой режим транзистора при двух способах охлаждения: 1) жидкостная система-транзистор 1 располагается на водоохлаждаемой плате 4 (рис.20,а); 2) термоэлектрическое охлаждение – транзистор 1 расположен на термоэлектрической батарее 7, горячий спай - в контакте с водоохлаждаемой платой 4 (рис.20,б).

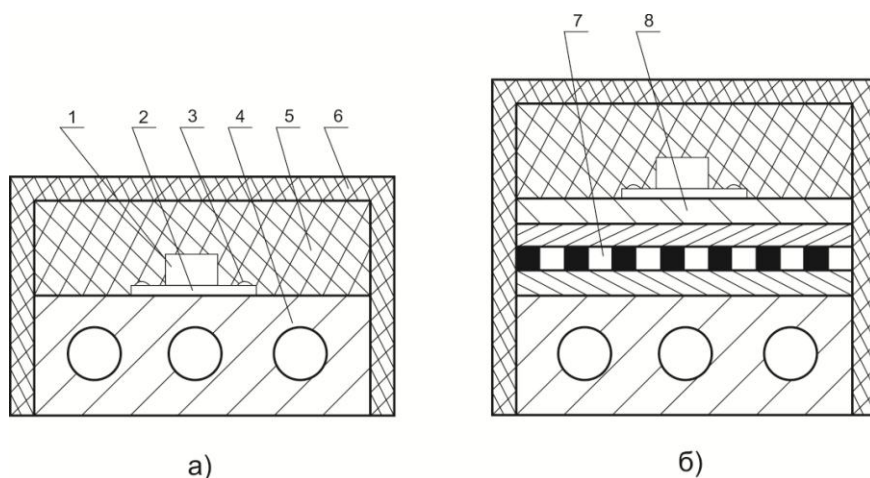


Рис.20 Общий вид исследуемых транзисторов.

В первом случае температура транзистора, как будет показано далее, почти полностью зависит от температуры охлаждающей воды. Во втором варианте температура транзистора будет зависеть как от температуры воды, так и от режима работы термоэлектрической батареи. Применение термобатареи имеет ряд преимуществ перед другими способами охлаждения. Во-первых, возможность обеспечить рабочую температуру транзистора ниже температуры окружающей среды и теплоносителя. Во-вторых, реверсивный характер работы термобатареи, т.е. возможности ее использования как для охлаждения, так и для разогрева; это ее свойство часто используют для термостатирования объекта.

Прежде чем перейти к выводу расчетных соотношений для температуры транзистора, вспомним основные сведения из теории термоэлектрического охлаждения.

Расчет основных показателей термоэлектрического охлаждения

Рассмотрим основные эффекты и законы, на которых основана работа термобатарей (1).

Эффект Пельтье. При прохождении электрического тока через цепь, составленную из разнородных проводников, в местах их соединений (спаях) поглощается или выделяется определенное количество теплоты:

$$P_{\pi} = \pm \Pi \cdot I, \quad (1)$$

где Π - коэффициент Пельтье, В; знаки “ \pm ” указывают на свойства материалов (поглощение или выделение энергии).

Эффект Зеебека. Если спай двух разнородных материалов имеет температуру T , отличную от окружающей T_c , то на концах проводников возникает термоЭДС:

$$E = \pm \alpha \cdot \Delta T, \quad \Delta T = T - T_c, \quad (2)$$

где α – коэффициент Зеебека.

Эффект Томсона. Если в однородном материале существует градиент температур, то при пропускании тока через этот материал появится термоЭДС между отдельными его частями. Выделяющаяся при этом тепловая энергия будет определяться соотношением:

$$P_{\text{То}} = \pm \sigma_{\text{Т}} \cdot I \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{Т}}$ – коэффициент Томсона, В/К.

При соединении проводников p и n типа имеет место следующая связь между введенными коэффициентами:

$$P = \alpha \cdot T, \quad \alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad \text{или} \quad \alpha = |\alpha_p| + |\alpha_n|, \quad (4)$$

где α_p и α_n – соответственно коэффициенты Зеебека для материалов p и n типа.

При описании явлений, происходящих в термобатарее, кроме указанных эффектов будут использованы законы Фурье и Джоуля.

Современная термобатарея представляет собой совокупность пар, состоящих из полупроводниковых материалов p и n типа. При пропускании электрического тока через такую систему на одних спаях происходит поглощение тепла Пельтье («холодные» спаи), а на других – выделение («горячие» спаи). Конструктивно батарея выполнена так, что холодные спаи вынесены на одну ее поверхность, а горячие – на другую. Если при этом температуру «горячего» спая поддерживать на определенном уровне, то температура «холодного» спая понизится.

Рассмотрим единичный полупроводниковый термоэлемент (ТЭ), изображенный на рис.21.

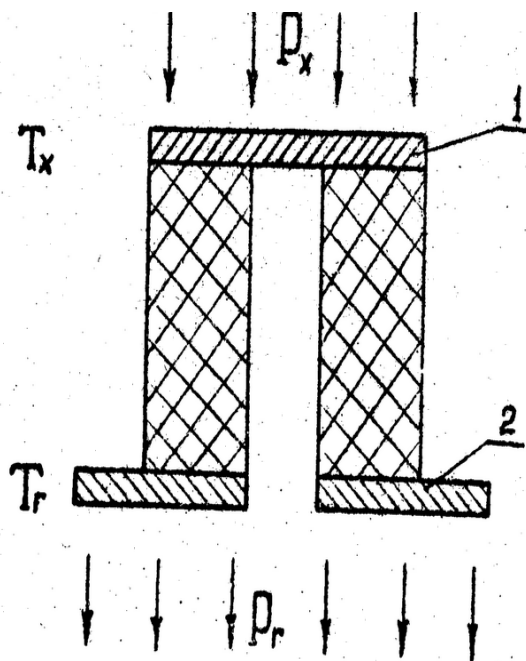


Рис.21 Полупроводниковый термоэлемент

К холодному спаю 1 подводится тепловой поток P_x от окружающей среды или охлаждаемого объекта; от спая 2 за счет теплопроводности проходит поток P_λ ; при прохождении тока через термоэлемент имеют место джоулевы потери P_r .

В стационарном режиме сумма поступающей к холодному спаю в единицу времени энергии ($P_x + P_\lambda + P_T$) отводится за счет эффекта Пельтье: - P_Π , т.е. $P_\Pi = P_x + P_\lambda + P_T$. (5)

Найдем структуру отдельных составляющих этого уравнения. Если пренебречь теплоотводом в среду с боковых поверхностей термоэлемента, то величина P_λ равна:

$$P_\lambda = K (T_r - T_x), \quad K = \frac{1}{L} (\lambda_p \cdot S_p + \lambda_n \cdot S_n), \quad (6)$$

где L, λ_i, S_i - соответственно - длина, коэффициент теплопроводности, площадь поперечного сечения термоэлементов p и n типа. Показано, что наилучшие показатели имеют термоэлементы при $S_p = S_n = S$; кроме того, тепло- и электропроводность p и n проводников обычно близки, поэтому в дальнейшем будем полагать их одинаковыми, тогда $K = 2\lambda S/L$.

Тепловые потери P_T определяются законом Джоуля, и для единичного термоэлемента

$$P_T = 0,5 \cdot I^2 \cdot R, \quad R = 2\rho L/S \quad (7)$$

Из соотношений (1),(2) найдем $P_n = \alpha \cdot I \cdot T_x$ и, подставив значения P_i в равенство (5), получим мощность снимаемой с холодного спая нагрузки или величину холодопроизводительности:

$$P_x = \alpha \cdot I \cdot T_x - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K\Delta T. \quad (8)$$

Аналогично определим нагрузку P_r , которая должна сниматься с горячего спая:

$$P_r = \alpha \cdot I \cdot T_r + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K\Delta T. \quad (9)$$

Для анализа работы термоэлемента вводятся следующие параметры:

1) термоэлектрическая добротность термоэлемента:

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda}, \quad 1/K; \quad (10)$$

2) коэффициент полезного действия ε (холодильный коэффициент), равный отношению снимаемой нагрузки P_x к полной электрической мощности, потребляемой термоэлементом

$$P = U \cdot I, \quad U = I \cdot R + \alpha \cdot \Delta T. \quad (11)$$

В выражении (11) второе слагаемое описывает разность потенциалов, необходимую на преодоление ЭДС Зеебека:

$$\varepsilon = \frac{P_x}{P} = \frac{\alpha \cdot I \cdot T_x - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R}; \quad (12)$$

3) коэффициент преобразования μ (для режима нагрева):

$$\mu = \frac{P_r}{P} = \frac{\alpha \cdot I \cdot T_r + 0,5 \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R}. \quad (13)$$

В настоящее время термобатареи выпускаются универсальной формы в виде модулей, которые могут быть встроены в готовую конструкцию. Количество термоэлементов в модуле и применяемые материалы могут быть различными, что связано с эффективностью работы в том или ином диапазоне температур.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из блока питания, блока транзисторов, водяного термостата, микровольтметра или потенциометра.

Блок питания предназначен для преобразования напряжения в сети 220В в постоянное напряжение 30В (для питания цепи транзисторов) и в постоянное напряжение 3-9В (для питания термобатареи). Источники тепловыделения – транзисторы располагаются на теплообменных устройствах, к которым через распределительную коробку подается охлаждающая вода. На одном из теплообменных устройств установлена термоэлектрическая батарея. Измерение температур в работе производится при помощи медно-константановых термопар, свободные концы которых термостатируются в блоке холодных спаев. Далее термопары при помощи переключателя могут быть поочередно подключены к измерительному прибору. Связь с внешними устройствами (измерительные приборы и источники питания) осуществляется через разъем, расположенный на общем основании.

Установка транзисторов показана на рис.20. На этом рисунке испытуемые транзисторы 1, установленные на подложках 2 с элементами крепления 3, окружены слоем теплоизоляции 5 из пенопласта. Теплоизоляция применена для того, чтобы тепловой поток от транзистора в окружающую среду был пренебрежимо мал по сравнению с тепловым потоком, отдаваемым через подложку теплообменному устройству 4. Снаружи обе конструкции окружены корпусом 6 из оргстекла. В первом случае транзистор располагается непосредственно на теплообменном устройстве 4, во втором случае на теплообменном устройстве размещена термобатарея 7, а транзистор прикреплен к медной пластине 8, которая лежит на холодных спаях термобатареи.

Питание транзисторов осуществляется от источника постоянного напряжения. Рабочее напряжение - 30В. В зависимости от сопротивлений переменных резисторов, в цепях базы в каждом из транзисторов в стационарном режиме может выделяться мощность 0-5 Вт.

Измерительная схема выполнена таким образом, что термопары поочередно могут быть подключены к измерительному прибору.

Измерительным прибором в работе является либо потенциометр ПП-63, либо цифровой вольтметр ВК2-20. Переключатель следующим образом соединяется с термопарами: положение 1 – температура корпуса транзистора при термоэлектрическом охлаждении; положение 2 – температура «холодных» спаев термобатареи; положение 3 – температура транзистора при водяном охлаждении; положение 4 – температура теплообменного устройства при термоэлектрическом

охлаждении; положение 5 – температура теплообменного устройства при водяном охлаждении.

Расчет температуры корпуса транзистора

При водяном охлаждении тепловой поток P , рассеиваемый транзистором, отводится через контактное термическое сопротивление к теплообменному устройству $P_B = \sigma_2(t_{\text{тр}} - t_T)$ и частично через его открытые поверхности передается окружающей среде $P_C = \sigma_1(t_{\text{тр}} - t_c)$, т.е.:

$$P = P_B + P_C \quad (14)$$

$$P_B = \sigma_2(t_{\text{тр}} - t_T) \quad (15)$$

$$P_C = \sigma_1(t_{\text{тр}} - t_c) \quad (16)$$

где σ_1, σ_2 – соответственно тепловые проводимости от транзистора к окружающей среде и теплообменному устройству; $t_c, t_T, t_{\text{тр}}$ – соответственно температуры окружающей среды, теплообменного устройства, корпуса транзистора.

Из выражений (15) и (16) получается выражение для температуры транзистора при его водяном охлаждении:

$$t_{\text{тр}} = (P + \sigma_1 t_c + \sigma_2 t_{\text{ж}})(\sigma_1 + \sigma_2)^{-1}, \quad (17)$$

где $t_{\text{ж}}$ – температура охлаждающей воды.

При термоэлектрическом охлаждении уравнение теплового баланса охлаждаемого транзистора будет выглядеть следующим образом:

$$P = \sigma_1(t_{\text{тр}} - t_c) + \sigma_3(t_{\text{тр}} - t_x), \quad (18)$$

где t_x – температура холодных спаев термобатареи; σ_3, σ_1 – тепловые проводимости между транзистором и холодными спаями и между транзистором и окружающей средой.

В равенстве (18) неизвестной является температура холодных спаев термобатареи. Для ее определения воспользуемся соотношением (8), в котором $P_x = \sigma_3(t_{\text{тр}} - t_x)$:

$$\sigma_3(t_{\text{тр}} - t_x) = N\alpha I T_x - 0.5 I^2 R - K(T_r - T_x), \quad (19)$$

где N – количество термоэлементов термобатареи; R – электрическое сопротивление термобатареи.

Из формулы (18) и (19) можно получить выражение для температуры транзистора $t_{\text{тр}}$ в случае термоэлектрического охлаждения:

$$t_{\text{тр}} = \frac{A \cdot 273 - B - k t_r - \left(\frac{P}{\sigma_3} + \left(\frac{\sigma_4}{\sigma_3}\right) t_c\right) (\sigma_3 + A + K)}{\sigma_3 - \left(\frac{\sigma_4}{\sigma_3} + 1\right) (\sigma_3 + A + K)}, \quad (20)$$

где $A = N\alpha I$, $B = 0.5 I^2 R$.

Зная постоянные термобатареи ($N\alpha = 0.00819$; $R = 0.21$; $K = 0.22$), значения тепловых проводимостей ($\sigma_1 = 0.031$; $\sigma_2 = 0.29$; $\sigma_3 = 0.13$; $\sigma_4 = 0.011$), полученные из градуировочных опытов, и принимая допущение о равенстве температур

$t_r = t_T = t_{ж}$, на основании (17) и (20) можно рассчитать температуры транзистора $t_{тр}$ при жидкостном и термоэлектрическом охлаждении.

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Получить от преподавателя задание: а) величину мощности транзисторов P_1 и P_2 ($1\text{Вт} \leq P_{1,2} \leq 4\text{Вт}$), б) значение тока, проходящего через термобатарейку $I_{Тб}$, в) значение температуры охлаждающей воды: $t_{ж}$ ($20^\circ\text{C} \leq t_{ж} \leq 50^\circ\text{C}$).

2. Ознакомиться с описанием работы и получить разрешение преподавателя на ее проведение.

3. Присоединить блок питания к блоку транзисторов при помощи соединительного жгута.

4. Присоединить к клеммам блока транзисторов прибор для измерения термоЭДС термопар.

5. Убедиться, что шланги водяного термостата присоединены к переходнику блока транзистора.

6. Установить на контактном термометре водяного термостата требуемое по заданию значение температуры охлаждающей воды.

7. Включить водяной термостат.

8. Подать питание на исследуемые транзисторы. Для этого:

а) присоединить блок питания к сети $\sim 220\text{В}$. Включить тумблер «Сеть» блока питания. При этом загорится лампочка «Сеть» блока питания;

б) установить переключатель «Номер транзистора», расположенный на передней панели блока питания в положение «1». При этом измерительные приборы, «Ток через транзистор» и «Напряжение транзистора» подключаются к транзистору, охлаждаемому водой;

в) при помощи рукоятки, расположенной на блоке транзисторов, установить ток и напряжение транзистора 1, соответствующие требуемой мощности.

Мощность транзистора найти как произведение падения напряжения $U_{кз}$ на коллекторный ток $I_{к}$: $P_{тр} = U_{кз} \cdot I_{к}$. Значение напряжения $U_{кз}$ следует определять при помощи вольтметра, расположенного на передней панели блока транзисторов (цена деления – 1,5 В/дел), а значение тока – по амперметру, расположенному там же (цена деления - $12 \cdot 10^{-3}\text{А/дел}$);

г) установить переключатель «Номер транзистора» в положение 2;

д) установить требуемое значение мощности второго транзистора. Это делается так же, как и для первого транзистора.

9. Подать питание на термобатарейку. Для этого при помощи переключателя «Ток через термобатарейку» установить заданное значение тока. Значение тока отсчитывать по амперметру, расположенному на передней панели блока питания (цена деления – 0,155 А / дел).

10. Дождаться выхода системы на стационарный режим. Для этого записывать показания термопары, установленной на транзисторе 1, через каждые пять минут. Стационарный режим будет достигнут тогда, когда два соседних показания будут различаться не более, чем на 5%.

11. Снять показания термопар № 1-5. Измерить температуру окружающего воздуха.

12. Изменить ток через термобатарею или температуру охлаждающей воды (по указанию преподавателя). Вновь дождаться наступления стационарного режима и снять новые показания термопар.

13. Выключить все приборы.

Результаты измерений занести в таблицу 1 и показать их преподавателю.

Таблица 1

Номер термопары	Водяное охлаждение				Термоэлектрическое охлаждение			
	$t_c = \text{ }^\circ\text{C}; t_{ж} = \text{ }^\circ\text{C}$		$t_c = \text{ }^\circ\text{C}; t_{ж} = \text{ }^\circ\text{C}$		$t_c = \text{ }^\circ\text{C}; t_{ж} = \text{ }^\circ\text{C}$		$t_c = \text{ }^\circ\text{C}; t_{ж} = \text{ }^\circ\text{C}$	
	ЭДС, мВ	$t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	ЭДС, мВ	$t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	ЭДС, мВ	$t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	ЭДС, мВ	$t_i, \text{ }^\circ\text{C}$
1								
2								
3								
4								
5								

Обработка результатов измерений

1. По измеренным значениям ТЭДС термопар E_i вычислить перегревы ϑ_i и температуры t_i :

$$\vartheta_i = K_T E_i = t_i - t_c; t_i = \vartheta_i + t_{xc}, \quad (22)$$

где ϑ_i – перегрев i -ой термопары над блоком холодных спаев, К;

t_i – температура горячего спая, $^\circ\text{C}$;

K_T – чувствительность термопары, К/мВ;

E – показания измерительного прибора, мВ

2. Рассчитать по зависимостям (17)-(20) средние температуры транзисторов для всех режимов, которые были исследованы экспериментально.

3. Сопоставить результаты эксперимента и теоретического расчета и записать данные в таблицы 2 и 3.

Содержание отчета

1. Результаты измерений ТЭДС термопар E_i (табл.1,2), полученные значения перегревов ϑ_i и температур t_i .

2. Условия проведения опытов ($t_{cp}, t_{ж}, I$).

3. Теоретический расчет температур элементов при различных способах охлаждения.

4. Результаты сопоставления опытных и расчетных данных (табл.2 и 3).
5. Выводы по работе.

Таблица 2

Температура охлаждающей воды, $t_{ж}, ^\circ C$			
Результаты экспериментов, $t_{ТР}^{эксн}, ^\circ C$			
Результаты расчетов, $t_{ТР}^{расч}, ^\circ C$			
$\delta = \frac{t_{ТР}^{эксн} - t_{ТР}^{расч}}{t_{ТР}^{эксн}} \cdot 100$			
$t_c, ^\circ C$			

Таблица 3

Ток питания термобатареи, I, A			
Результаты экспериментов, $t_{ТР}^{эксн}, ^\circ C$			
Результаты расчетов, $t_{ТР}^{расч}, ^\circ C$			
$\delta = \frac{t_{ТР}^{эксн} - t_{ТР}^{расч}}{t_{ТР}^{эксн}} \cdot 100$			
$t_c, ^\circ C$			
Температура охлаждающей воды, $t_{ж}, ^\circ C$			

Контрольные вопросы

1. Какие допустимые значения температур имеют р-п переходы германиевых и кремниевых транзисторов?
2. Какими преимуществами по сравнению с другими способами отвода тепла обладает термоэлектрическое охлаждение?

3. Какие стандартные режимы работы термобатарей вы знаете? Чем они характеризуются?
4. Как определить мощность теплотеря транзистора?
5. Какими параметрами характеризуется термобатарея?
6. Что такое холодопроизводительность термобатарей? Из каких составляющих она складывается?
7. Какие допущения принимаются при расчете температуры горячих спаев?
8. Как в лабораторной работе при температурных измерениях учитывается влияние окружающей среды?
9. Как можно объяснить расхождение экспериментальных и расчетных значений температур?
10. Какие физические явления необходимо принять во внимание при составлении уравнения теплового баланса на спаях термобатарей?

Литература

1. Дульнев Г.Н. Тепло - и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984.
2. Аксенов А.И. и др. Отвод тепла в полупроводниковых приборах. – М.: Энергия, 1971.
3. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы. – Л.: Наука, 1967.
4. Покорный Е.Г., Щербина А.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств. – Л.: Наука, 1969.

Лабораторная работа №5

Измерение и расчет контактных термических сопротивлений в механических соединениях

Цель работы: изучение физической сущности аппаратуры, техники измерения и способов расчета контактного термического сопротивления (КТС).

Программа работы

1. Ознакомиться с физической сущностью, экспериментальными и расчетными методами определения КТС и конструкцией прибора.
2. Провести расчет КТС по указанной методике.
3. Провести измерение КТС в зависимости от величин внешней нагрузки.
4. Сравнить результаты расчета с данными эксперимента.
5. Составить отчет о проделанной работе.

Физическая сущность КТС

При прохождении теплового потока через соприкасающиеся поверхности двух тел температуры на границе их раздела в любой момент времени будут равны только в том случае, если соприкосновение происходит во всех точках поверхности, т.е. если контакт является идеальным.

В результате этого линии теплового потока при подходе к зоне теплового контакта не претерпевают каких-либо заметных отклонений от прямых.

Практически контакт между поверхностями всегда имеет *дискретный характер*, т.е. соприкосновение происходит в отдельных точках (пятнах), или группах точек номинальной поверхности. Это обусловлено наличием на соприкасающихся поверхностях неровностей в виде шероховатости или волнистости.

В настоящее время установлено, что *площадь физического контакта*, как правило, составляет доли процента от номинальной площади соприкосновения, определяемой геометрическими размерами соприкасающихся тел.

При соприкосновении металлических поверхностей наличие зазоров, заполненных средой, имеющей значительно меньшую теплопроводность, чем теплопроводность металла, ухудшает условия перехода тепла через контактную зону.

Контакт двух шероховатых поверхностей условно в увеличенном масштабе представлен на рис.22.

Тепловой поток, идущий от тела 1 к телу 2, при подходе к поверхности соприкосновения раздваивается, одна часть потока проходит через места фактического контакта, а другая – через среду, заполняющую пространство между выступами шероховатости. В контактной зоне наблюдается стягивание линий теплового потока к пятнам фактического контакта, что обусловлено

различием между теплопроводностью контактирующих материалов и теплопроводностью среды.

В общем случае можно считать, что перенос теплоты через зону контакта при наличии теплопроводной среды осуществляется одновременно тремя путями: *теплопроводностью непосредственно через пятна фактического контакта, теплопроводностью через среду, заполняющую впадины неровностей, и излучением между поверхностями.*

Отводом теплоты вдоль зазоров и конвекцией можно пренебречь вследствие того, что высота неровностей, как правило, мала по сравнению с общей площадью соединения. Теоретические оценки и данные экспериментов показали, что до температур в контактной зоне порядка 700-750К роль теплообмена излучением незначительна.

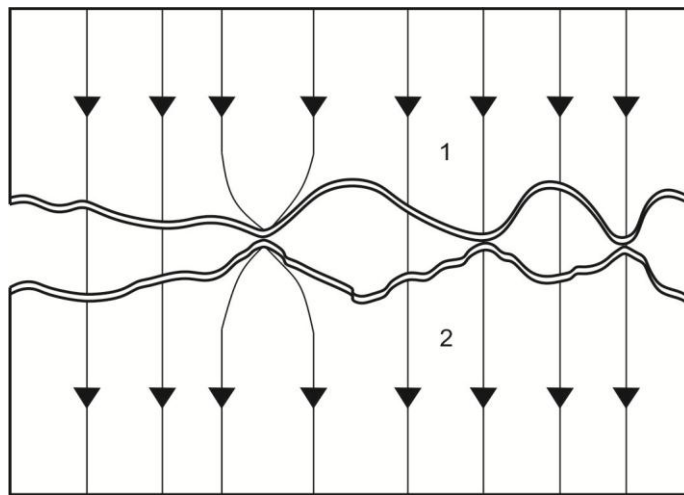


Рис.22 Контакт двух шероховатых поверхностей

С учетом приведенных выше допущений, контактное термическое сопротивление R_k , обусловленное наличием температурного перепада между контактирующими поверхностями, может быть представлено в следующем виде:

$$R_k = \frac{1}{(\alpha_m + \alpha_c) \cdot A}, \quad (1)$$

где α_m , α_c – коэффициенты теплоотдачи через места фактического контакта и межконтактную среду.

Рассмотрим метод расчета КТС плоских поверхностей.

Примем следующие допущения:

- пятна фактического контакта равномерно распределены по всей поверхности сопряжения;
- все пятна фактического контакта имеют форму круга с одним и тем же радиусом, практически остающимся неизменным при приложении нагрузки; термическое сопротивление окисной пленки пренебрежимо мало.

Тепловую проводимость через места фактического контакта (в условиях глубокого вакуума) можно определить по формуле:

$$\alpha_m = \frac{2,12 \cdot 10^4 \cdot \lambda_m \cdot \eta}{\varphi}, \quad (2)$$

где η - относительная площадь фактического контакта ко всей площади сопряжения; φ - коэффициент стягивания теплового потока к пятнам фактического контакта.

Приведенная теплопроводность λ_m связана с теплопроводностями λ_1 и λ_2 контактирующих материалов зависимостью:

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (3)$$

Коэффициент стягивания является функцией величины η , т.е.:

$$\varphi = 1 - 1,41\eta^{1/3} + 0,3\eta^{3/2}. \quad (4)$$

Наличие в формуле (4) относительной площади фактического контакта η позволяет выразить коэффициент теплоотдачи α_m в зависимости от давления, механических свойств материалов, геометрических характеристик контактирующих поверхностей и др. Приведем упрощенную зависимость между параметрами η и φ :

$$\frac{\eta}{\varphi} = \left(\frac{P \cdot B}{E} \right)^{0,8}. \quad (5)$$

Это выражение получено из анализа профилограмм поверхностей с чистой обработкой от 3-го до 10-го класса, для материалов с модулем упругости $E > 10^{10}$ Па и при относительных нагрузках на контактных поверхностях $H/E = 5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4}$.

Входящий в выражение (5) коэффициент B характеризует геометрические свойства поверхностей, он представлен на рис.2 в зависимости от суммы средних высот микронеровностей $h_{cp1} + h_{cp2}$ контактирующих поверхностей.

Окончательно для приближенного расчета α_m из выражений (2) и (5) получаем следующую зависимость:

$$\alpha_m = 2,12 \cdot 10^4 \cdot \lambda_m \left(\frac{P \cdot B}{E} \right)^{0,8}. \quad (6)$$

Тепловая проводимость прослойки межконтактной среды равна отношению теплопроводности этой среды λ_c к эквивалентной толщине прослойки $\delta_{эКВ}$:

$$\delta_{с\ у\delta} = \lambda_c / \delta_{эКВ}. \quad (7)$$

Выражение для эквивалентной толщины прослойки $\delta_{эКВ}$ с учетом дискретного характера расположения полостей среды имеет вид:

$$\delta_{эКВ} = (h_{cp1} + h_{cp2}) \cdot (1 - m_h), \quad (8)$$

где m_h - коэффициент заполнения профиля неровностей.

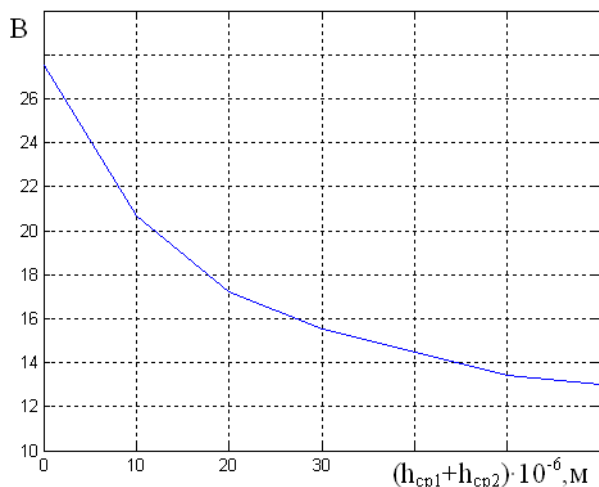


Рис. 23

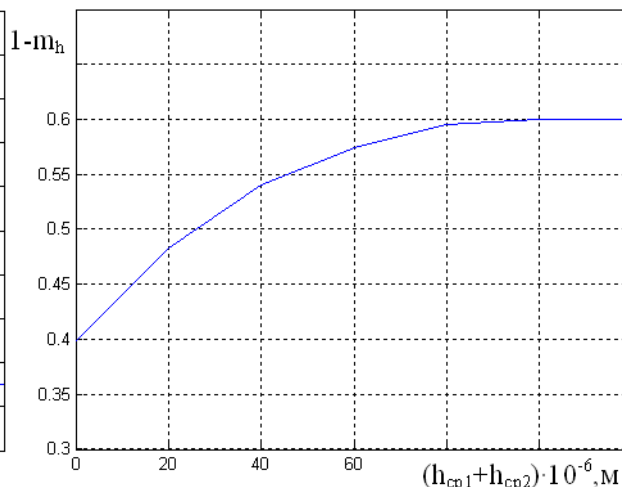


Рис. 24

На рисунках 23-24 приведена графическая зависимость $(1 - m_h) = f(h_{cp1} + h_{cp2})$, полученная путем обработки профилограмм поверхности образцов с чистой обработки от 3-го до 10-го класса из материалов с $E > 10^{10}$ Па.

Для изменения величины КТС разъемных соединений используют следующие приемы:

- заполнение межконтактного пространства теплостойкими вязкими смазками и пастообразными веществами;
- введение в зону контакта высокотеплопроводных материалов (графит, алюминиевая пудра);
- напыление или гальваническое покрытие контактных поверхностей высокотеплопроводными и пластичными материалами (меднение, лужение и др.);
- применение прокладок из высокотеплопроводных мягких материалов (олово, свинец, кадмий и др.).

Описание экспериментальной установки

Согласно определению, КТС равно отношению перепада температур Δt на контактирующих поверхностях к тепловому потоку Φ_k , проходящему через эти поверхности:

$$R_k = \frac{\Delta t}{\Phi_k} = \frac{\vartheta_B - \vartheta_H}{\Phi_k}. \quad (9)$$

Существуют различные методы экспериментального определения этого параметра.

Рассмотрим конструкцию прибора, основанного на наиболее простом экспрессном методе измерения R_k . Принципиальная схема прибора представлена на рис.25.

Прибор состоит из ядра 1, окруженного теплозащитной оболочкой 4, основания 3, термостатируемого блока 6 и нагрузочного устройства 8.

Ядро и теплозащитная оболочка жестко связаны с каркасом и могут перемещаться вдоль штанги 5 в зависимости от высоты исследуемого образца 2 и разворачиваться на 180° при разогреве ядра перед опытом.

Нагреватель 7 вмонтирован в ядро и питается от сети. Контроль за установкой давления осуществляется с помощью динамометра 9.

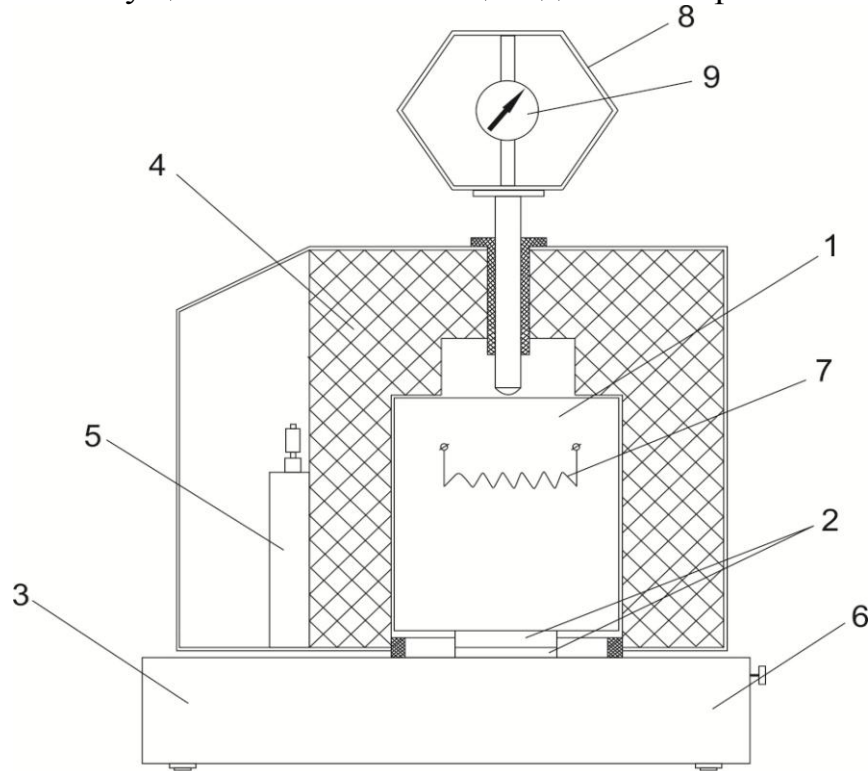


Рис.25 Конструкция прибора, основанного на экспрессном методе измерения R_k .

Кроме измерительного прибора экспериментальная установка включает в себя жидкостный термостат для поддержания температуры основания 3 и потенциометр КСП-4 для регистрации температур образцов 2 и ядра 1. Места установки термопар указаны на рис.25 точками.

Образцы 2 с изучаемым КТС помещаются между предварительно нагретым металлическим ядром 1 и холодным массивным основанием 3. При охлаждении ядра рассеиваемый им поток Φ разделяется на три части: поток Φ_k проходит через КТС в основание, поток Φ_c – через тепловую изоляцию ядра 1 и рассеивается в окружающую среду; поток Φ_{oc} проходит в основание 6 в обход изучаемого объекта 2. На основании закона сохранения энергии имеем:

$$\Phi_k = \Phi - \Phi_c - \Phi_{oc}. \quad (10)$$

Тепловой поток Φ определяется по известным полным теплоемкостям ядра $C_{я}$ и образца C_o и по скоростям их охлаждения $dt_{я}/d\tau$ и $dt_o/d\tau$:

$$\Phi = C_{я} \frac{dt_{я}}{d\tau} + C_o \frac{dt_o}{d\tau}. \quad (11)$$

По определению, тепловые потоки Φ_c и Φ_{oc} связаны с термическими сопротивлениями от ядра к среде R_1 и от ядра к основанию R_2 зависимостями:

$$\Phi_c = (t_j - t_c)/R_1, \quad \Phi_{oc} = (t_j - t_{oc})/R_2. \quad (12)$$

Подставив в равенства (9) и (10) значения тепловых потоков, получим:

$$R_K = \Delta t \left[C_j \frac{dt_j}{d\tau} + C_0 \frac{dt_0}{d\tau} - \left(\frac{t_j - t_c}{R_1} + \frac{t_j - t_{oc}}{R_2} \right) \right]^{-1}. \quad (13)$$

Параметры R_1 и R_2 являются постоянными прибора и могут быть определены из градуировочных опытов, в которых последовательно проводятся измерения двух пар образцов с известными R_{K1} и R_{K2} . При этом следует стремиться к существенному отличию значений этих сопротивлений; вычисления производятся по формуле (13). Для используемого в лабораторной работе прибора имеем:

$$\frac{t_j - t_c}{R_1} + \frac{t_j - t_{oc}}{R_2} = \frac{t_j - t_c}{7,5} = \frac{\vartheta_j}{7,5}. \quad (14)$$

Величина C_j является постоянной прибора и составляет 655 Дж/К.

Величиной $C_0 \frac{dt_0}{d\tau}$ можно пренебречь по сравнению с $C_j \frac{dt_j}{d\tau}$, так как $C_0 \ll C_j$.

На основании вышеизложенного выражение (13) принимает вид:

$$R_K = \Delta t \left[C_j \frac{dt_j}{d\tau} - \frac{\vartheta_j}{7,5} \right]^{-1} \quad \text{или} \quad R_K = \frac{\vartheta_B - \vartheta_H}{C_j \frac{dt_j}{d\tau} - \frac{\vartheta_j}{7,5}}, \quad (15)$$

где ϑ_B, ϑ_H – перегревы верхней и нижней частей образца над средой, К.

Примечание: Величина $d\vartheta_j/d\tau$ определяется по графику изменения перегрева ядра прибора во времени $\vartheta_j = f(\tau)$, записанному на диаграммной ленте КСП-4, и рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\vartheta_j}{d\tau} = \frac{\vartheta_{j1} - \vartheta_{j2}}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (16)$$

Порядок подготовки и проведения опыта

1. Включить жидкостный термостат для поддержания основания прибора при температуре окружающей среды.
2. Включить потенциометр КСП-4 переключателем “Сеть”.
3. Установить скорость протяжки диаграммной ленты 600 мм/ч.
4. Приподнять и развернуть ядро прибора.
5. Установить измеряемые образцы.
6. Включить нагреватель ядра прибора (на основании должна загореться сигнальная лампочка).
7. Включить протяжку диаграммной ленты потенциометра КСП-4.
8. Контролировать увеличение температуры ядра по показаниям КСП-4.
9. При достижении перегрева ядра, равного $\sim 75\text{K}$, выключить нагреватель ядра.
10. Развернуть ядро прибора и накрыть им исследуемые образцы.

11. Установить с помощью нагрузочного устройства заданное преподавателем давление на испытываемые образцы.

12. Провести измерения температур образцов и ядра в течение 10...15мин.

13. Повторить опыт (п.3-10) при других значениях давления на испытываемые образцы.

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.

2. Диаграммные ленты проведенных измерений.

3. Результаты обработки экспериментальных данных в виде зависимости $R=f(P)$.

4. Расчет КТС. Сравнение результатов расчета и эксперимента, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется контактным термическим сопротивлением?

2. От чего зависит величина КТС?

3. Какие различают площади контакта?

4. С какой целью производится термостатирование основания прибора?

5. Какие основные допущения приняты при получении формулы (13) для определения R_k на основании результатов измерений?

6. Каким образом определяется скорость изменения среднеобъемной температуры ядра прибора?

7. Какие существуют ограничения по теплофизическим свойствам образцов, исследуемых на лабораторной установке?

8. Как осуществляется установка и измерение давления на исследуемые образцы?

9. До какой предельной температуры допустимо разогреть ядро прибора?

10. Какие существуют способы уменьшения величины КТС?

Литература

1. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М.: Энергия, 1971.

2. Дульнев Г.Н. Тепло-и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984.

Лабораторная работа №6

Исследование эффективности радиаторов

Цель работы: изучение экспериментальных способов исследования эффективности радиаторов различных конструкций и метода расчета проводимостей таких охладителей.

Тепловой расчет радиаторов

В системах воздушного охлаждения широко применяются радиаторы, различающиеся по виду развитой поверхности. На рис.26 изображены радиаторы: а - пластинчатые; б - ребристые; в - игольчато-штыревые; г- типа «краб»; д - жалюзийные; е - петельно-проволочные.

На рисунке 26 приведены геометрические параметры, существенно влияющие на величину рассеиваемого радиатором теплового потока:

- ✓ размеры основания L_1, L_2 (прямоугольное основание),
- ✓ толщина δ основания,
- ✓ высота H (или h),
- ✓ толщина d ребра или штыря и шаг S между ними.

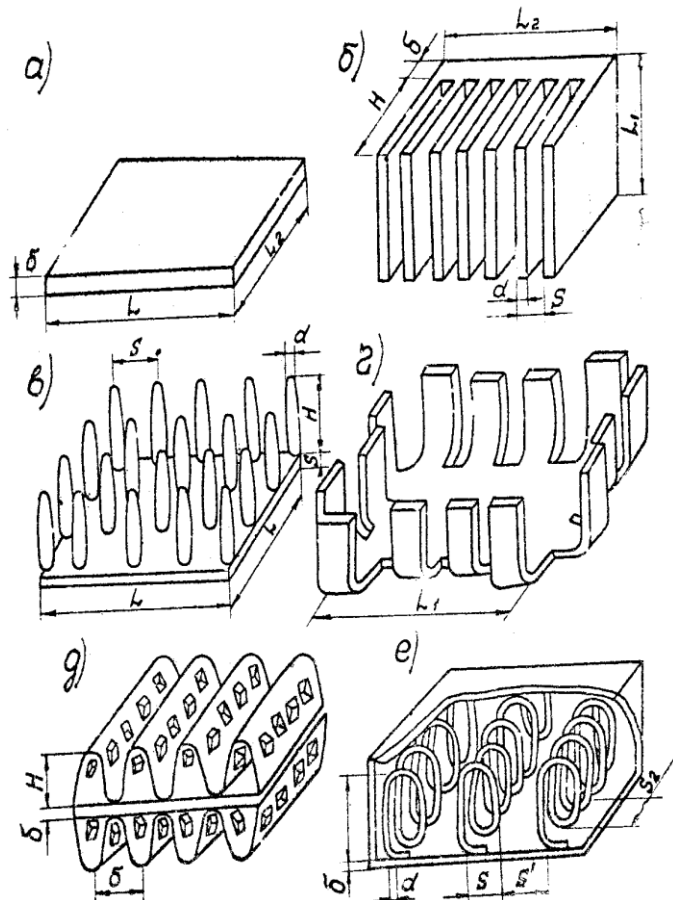


Рис.26 Геометрические параметры радиаторов.

Для петельно-проволочных радиаторов характерными геометрическими параметрами являются высота H витка, диаметр d проволоки, шаг навивки S_2 , шаг укладки S_1 , коэффициент заполнения ϕ канала, равный, отношению площади поперечного сечения спиралей к площади сечения канала.

Для характеристики теплообменных свойств радиатора используют зависимость между средним перегревом $\vartheta = t_s - t_c$ основания радиатора и рассеиваемой им мощностью P , эффективным коэффициентом теплообмена основания $\alpha_{\text{эф}}$, тепловой проводимостью σ_{Σ} или тепловым сопротивлением R_{Σ} , связанными зависимостями:

$$F = L_1 \cdot L_2 \text{ - для прямоугольного основания;}$$

$$F = \pi D^2 / 4 \text{ - для круглого основания;}$$

$$P = \sigma_{\Sigma} \cdot \vartheta_s = R_{\Sigma}^{-1} \cdot \vartheta_s ,$$

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \alpha_{\text{эф}} \cdot F. \quad (1)$$

Формула (1) справедлива для любого из рассмотренных выше типов; вся сложность процессов переноса тепла и конструктивные особенности сосредоточены в одной величине – в эффективном коэффициенте теплообмена. Последний может быть определен экспериментальным и расчетным путем.

Расчет параметров $\alpha_{\text{эф}}$ и σ_{Σ} для ребристых и игольчато-штыревых радиаторов

Необходимость такого анализа связана с непрерывным изменением выпускаемых промышленностью типоразмеров радиаторов.

Представим радиатор как некоторую ребренную (N ребер) пластину (основание радиатора).

Рассмотрим тепловую модель одиночного ребра или штыря сечения f с периметром U , длиной h , находящегося в среде с температурой t_c и коэффициентом теплоотдачи с боковой поверхности α ; коэффициент теплопроводности стержня - α .

В левый торец стержня входит тепловой поток P_i , который кондуктивно передается по ребру, рассеиваясь при этом с его поверхности (рис. 27).

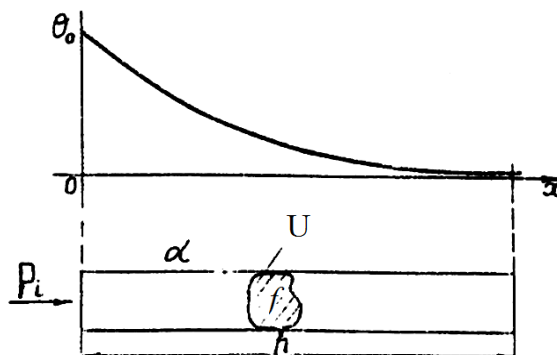


Рис.27 График распределения температуры в стержне.

Температурное поле стержня описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 \vartheta_i}{dx^2} - b^2 \cdot \vartheta_i = 0, \quad (2)$$

где $\vartheta_i = t_i - t_c$; $b^2 = \frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot f}$

С граничными условиями

$$\lambda \cdot f \frac{d\vartheta_i}{dx} \Big|_{x=0} = P_i; \quad \frac{d\vartheta_i}{dx} \Big|_{x=h} = 0 \quad (3)$$

решение системы (2)-(3) имеет вид:

$$f = cth bx; \quad \vartheta_i = \frac{P_i}{\lambda \cdot f \cdot b} \times \frac{ch b(h-x)}{sh bx} \quad (4)$$

Тогда из равенства (4) получаем, что перегрев левого торца стержня, т.е. $\vartheta_i(x=0)$ равен:

$$\vartheta_i \Big|_{x=0} = \frac{P_i cth bh}{\lambda f b} \quad (5)$$

Для учета теплового потока, рассеиваемого с торца стержня ($x=L$), следует вместо длины h подставить в формулу (5) фиктивную длину $h' = h + f/U$, т.е.:

$$\vartheta_i = \frac{P_i}{\lambda \cdot f \cdot b} \times cth b \left(h + \frac{f}{U} \right) \quad (6)$$

Найдем из этой формулы тепловое сопротивление R_i одиночного стержня (ребра, штыря):

$$R_i = \frac{1}{\sigma_i} = \frac{\vartheta_i}{P_i} = \frac{cth bh'}{\lambda \cdot f \cdot b} \quad (7)$$

Общая проводимость ребренной части радиатора за счет конвекции равна сумме проводимостей σ_i всех N ребер, т.е.: $\sigma_{\Sigma P} = \sum \sigma_i = N \cdot \sigma_i$.

Если конвективная проводимость от неоребренной части радиатора равна $\sigma_{нр}$, а проводимость за счет лучистой составляющей - σ_l , то общая проводимость радиатора равна:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{нр} + \sigma_l + \frac{N \cdot \lambda \cdot f \cdot b}{cth bh'} \quad (8)$$

Методики расчета составляющих уравнения (8)

Расчет интенсивности конвективного теплообмена от ребер радиатора.

1. Для вынужденной конвекции воздушной среды могут быть рекомендованы следующие формулы.

Для ребристых радиаторов:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.59 Re^{0.5} && \text{при } 2 \cdot 10^3 < Re < 5 \cdot 10^5; \\ Nu &= 0.033 Re^{0.8} && \text{при } Re > 5 \cdot 10^5, \end{aligned} \quad (9)$$

Для игольчато-штыревых радиаторов:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.49 Re^{0.5} && \text{при } Re < 1000; \\ Nu &= 0.149 Re^{0.65} && \text{при } Re > 1000. \end{aligned} \quad (10)$$

В (9) и (10) приняты следующие обозначения: $Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$; $Re = \frac{V_p \cdot L}{\nu}$, где λ , ν - теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха при температуре

набегающего потока, V_p - расчетная для данного вида оребрения скорость движения воздуха, L - определяющий размер.

Особенности теплообмена радиатора учтены в выборе параметров L и V_p , которые равны:

➤ для ребристых радиаторов: $V_p = 1.25V$; $L = L_1$ (L_1 - длина ребра в направлении движения омывающего воздуха);

➤ для игольчато-штыревых радиаторов:

$$\begin{aligned} L &= (d_1 + d_2)/2 = d_{эф}, \\ V_p &= VS/(S - d_{эф}), \end{aligned} \quad (11)$$

где V - средняя скорость движения набегающего потока воздуха; S - шаг оребрения; d_1, d_2 - диаметры штыря у основания и на конце.

2. При естественной конвекции воздушной среды для игольчато-штыревого и ребристого радиаторов интенсивность теплообмена может быть рассчитана по формулам:

$$Nu = 1.18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.125} \quad \text{при} \quad 10^{-3} < Gr \cdot Pr \leq 5 \cdot 10^2;$$

$$Nu = 0.54 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad \text{при} \quad 5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr \leq 2 \cdot 10^7; \quad (12)$$

$$Nu = 0.135 (Gr \cdot Pr)^{0.33} \quad \text{при} \quad Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7.$$

$$\text{Здесь } Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}; \quad Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (t_p - t_c)}{\nu^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}$$

β - коэффициент объемного расширения воздуха, g - ускорение свободного падения, L - определяющий размер, ν - коэффициент кинематической вязкости, t_p - температура ребра или штыря, t_c - температура окружающей среды, a - температуропроводность воздуха, L - определяющий размер ($L = L_1$, $L = d_{эф}$ - для ребристого и игольчато-штыревого радиатора соответственно).

Теплофизические свойства воздуха следует выбирать при температуре:

$$t_m = 0.5(t_p + t_c).$$

Расчет проводимости неоребренной части радиатора

Проводимость радиатора за счет неоребренной поверхности:

$$\sigma_{нр} = \alpha_{нр} \cdot F_{нр} \quad (13)$$

где $\alpha_{нр}$ - коэффициент теплоотдачи, определяемый в зависимости от способа теплообмена: для вынужденной конвекции воздуха:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.57 \cdot Re^{0.5}, & Re < 4 \cdot 10^4 \\ Nu &= 0.032 \cdot Re^{0.8}, & Re \geq 4 \cdot 10^4 \end{aligned} \quad (14)$$

За определяющую температуру t_m принята здесь температура набегающего потока, а за определяющий размер - длина основания радиатора по направлению потока.

Площади неоребранных поверхностей ребристого и игольчато-штыревого радиаторов соответственно равны: $F_{\text{нр}} = 2 \cdot L_1 \cdot L_2 - N \cdot \delta \cdot L_1$, (15)

$F_{\text{нр}} = 2 \cdot L_1 \cdot L_2 - \frac{N\pi d_1^2}{4}$, где L_1, L_2 – размеры основания радиатора, N – число ребер или штырей, δ – толщина ребра, d_1 – диаметр основания штыря.

Расчет коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{нр}}$ при естественной конвекции можно проводить по следующим формулам:

$$\alpha_k = A_1 \cdot \Phi \cdot \left[\frac{(t_s - t_c)}{L} \right]^{0,25} \quad \text{при } (t - t_c) \leq \left(\frac{0,840}{L} \right)^3, \quad (16)$$

$$\alpha_k = A_2 \cdot \Phi \cdot \left[\frac{(t_s - t_c)}{L} \right]^{0,33} \quad \text{при } (t - t_c) > \left(\frac{0,840}{L} \right)^3,$$

где L – определяющий размер (для вертикально ориентированной поверхности высотой h , определяющий размер равен ее высоте, для горизонтально ориентированной поверхности – ее наименьшему размеру); Φ – коэффициент, равный 1; 1,3; 0,7 для вертикальной поверхности, горизонтальной обращенной стороной вверх и вниз соответственно.

Значения коэффициентов A_1, A_2 определяются из следующей таблицы:

Коэффициенты	Температура $t_m = 0.5(t+t_c), ^\circ\text{C}$							
	10	20	30	40	60	80	100	120
A_1	1.40	1.38	1.36	1.34	1.31	1.29	1.27	1.26
A_2	1.65	1.61	1.57	1.53	1.45	1.39	1.33	1.29

Расчет лучистой составляющей проводимости

Лучистая составляющая проводимости радиатора в равенстве (8) равна:

$$\sigma_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot S_{\text{н}}, \quad (17)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, причем:

$$\alpha_{\text{л}} = 0,227 E_n \left(\frac{T}{100} \right)^3, \quad (18)$$

где $T = 0,5 \cdot (T_s + T_c)$ – среднее значение абсолютных температур основания и среды (в первом приближении T можно принимать равным $\approx 340\text{K}$, а $\alpha_{\text{л}} \approx 9E_n$);

E_n – степень черноты.

Величина $S_{\text{н}}$ определяется величиной площади натянутой на радиатор поверхности, т.е.:

$$S_{\text{н}} = 2 \cdot [L_1 L_2 + (L_1 + L_2) \cdot (h + \delta)]. \quad (19)$$

Расчет эффективного коэффициента теплоотдачи

Рассчитав σ_{Σ} по формуле (8), найдем эффективный коэффициент теплообмена $\alpha_{эфф}$ радиатора, равный:

$$\alpha_{эфф} = \frac{\sigma_{\Sigma}}{F} \quad (20)$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.28) состоит из рабочей камеры 1, нагнетающего устройства 2 и измерительной части.

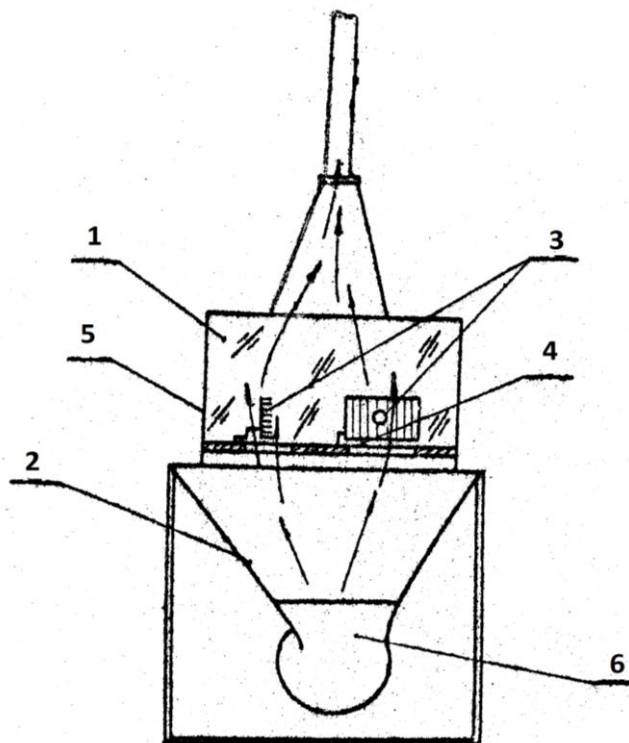


Рис.28 Экспериментальная установка

Исследуемые радиаторы 3 крепятся на шасси 4, которые затем по направляющим вставляются в камеру 1.

Шасси в местах крепления радиаторов имеют отверстия для подвода воздуха. Корпус камеры выполнен из оргстекла и снабжен дверцей для замены шасси с исследуемыми радиаторами.

Нагнетающее устройство состоит из конфузора с вентилятором 6, помещенных в общем корпусе, и вынесенного выпрямителя переменного тока для питания двигателя. Расход воздуха определяется по перепаду давления, возникающему при его прохождении через диафрагму.

Перепад давлений Δh измеряется микроманометром; расход G_v и скорость обдува V рассчитывается по соотношениям:

$$G_v = 6,19 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta h}, \quad \text{м}^3/\text{с}; \quad (21)$$

$$V = \frac{G_v}{F_{\text{ш}}}, \text{ м/с} , \quad (22)$$

где Δh – показания микроманометра в 1 мм водяного столба; $F_{\text{ш}}$ – площадь отверстий в шасси, свободных для продува воздуха.

Источниками тепловыделений являются установленные на радиаторах транзисторы.

Схема их питания позволяет плавно менять мощности тепловыделений в пределах 0,8 Вт; она собрана в корпусе нагнетающего устройства. На лицевой панели имеются переключатели токов и напряжений полупроводниковых приборов. Измерение осуществляется астатическим вольтметром и амперметром.

Для измерения температур радиаторов и транзисторов в макете установлены медно-константановые термопары.

Места их расположения отмечены на шасси и охладителях номерами, соответствующими положениям переключателя (“Термопары”), расположенного на лицевой панели. Показания термопар фиксируются потенциометром типа ПП-63 или цифровым микровольтметром. Величина перегрева рассчитывается по соотношению:

$$\vartheta_i = t_i - t_c = k \cdot E_i \quad (23)$$

Здесь E_i – показания термопары, мВ, k – чувствительность термопары по напряжению равная 25К/мВ.

Общий вид, геометрические размеры и места установки термопар на исследуемые в настоящей работе полупроводниковые приборы и радиаторы показаны на рис.29.

Там же приведены значения площадей отверстий ($F_{\text{ш}}$) для продува воздуха.

Порядок подготовки и проведения опыта

I. Измерение температур на макете в условиях естественной конвекции воздуха

1. Ознакомиться с описанием работы, получить у преподавателя разрешение на ее проведение и исходные данные.

2. Проверить правильность установки пределов измерений всех приборов (амперметр-5А, вольтметр-6В, милливольтметр-2мВ).

3. Включить милливольтметр.

4. Подать питание на полупроводниковые приборы (ППП), установленные на радиаторах. Для этого включить тумблер «СЕТЬ», находящийся на передней панели установки. Измерять изменения температур ППП (термопары 1,5,9,13) через каждые две минуты до выхода приборов на стационарный тепловой режим. Стационарный режим будет достигнут, когда два соседних показания будут различаться не более, чем на 5%.

5. Результаты измерений записать в табл.1.

6. Измерить показания термопар, установленных на радиаторах после наступления стационарного теплового режима. Результаты измерений записать в табл.2.

7. Измерить токи и напряжения, подаваемые на ППП. Результаты записать в табл.2.
8. Выключить все приборы и тумблер «СЕТЬ».

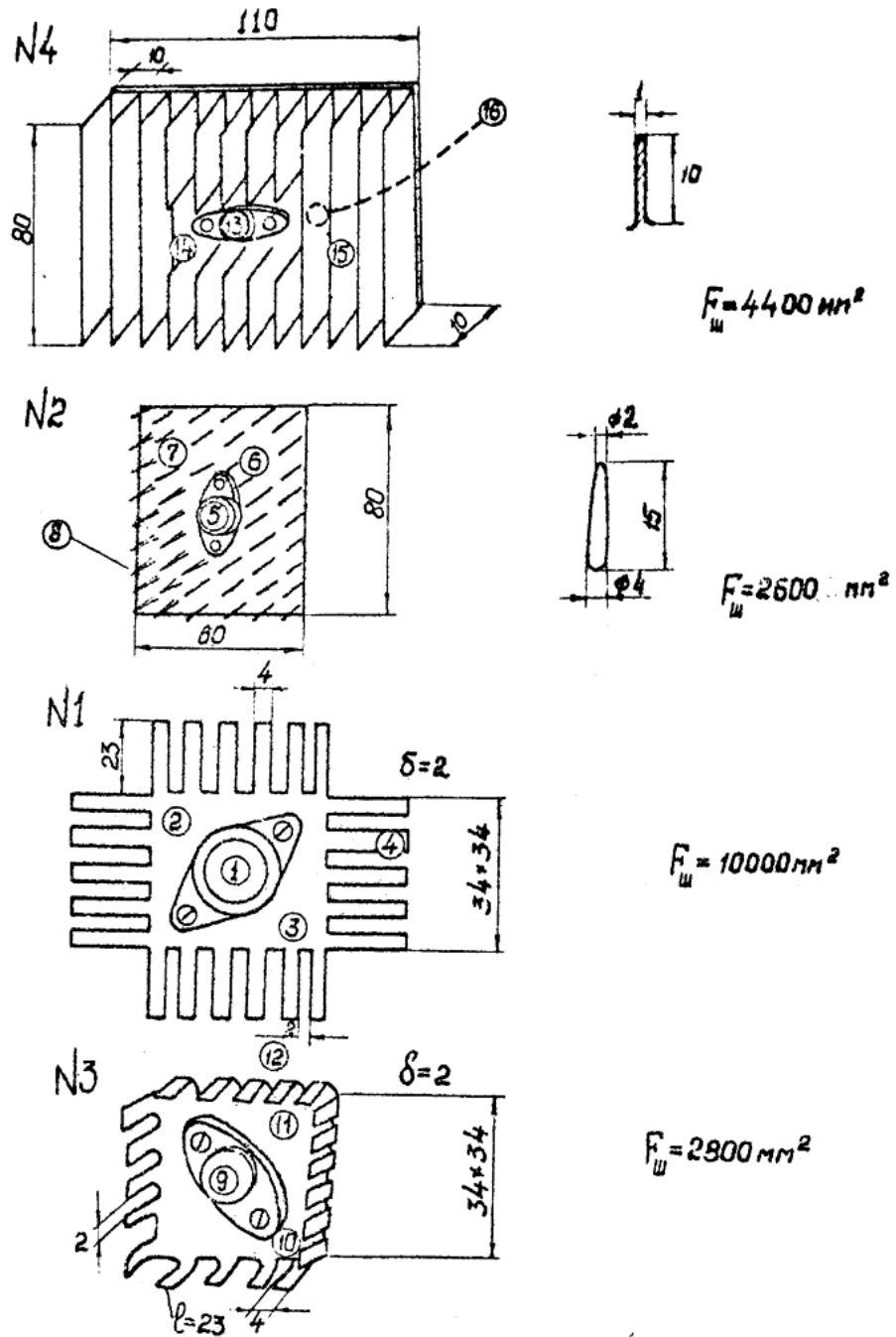


Рис. 29 Общий вид, геометрические размеры и места установки термодатчиков на радиаторы.

II. Измерение температур на макете в условиях вынужденной конвекции воздуха

1. Повторить пункты 1-3 из раздела I.

2. Установить требуемый расход воздуха поворотом рукоятки ЛАТРа по показаниям микроманометра.

ВНИМАНИЕ! Напряжение, подаваемое на двигатель вентилятора, не должно превышать 20В.

Повторить пункты 4-7 из раздела I.

1. Измерить и записать показания микроманометра.

2. Выключить вентилятор.

3. Выключить все приборы и тумблер «СЕТЬ» установки.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить по измеренным значениям ТЭДС термопар, перегревы и температуры, используя формулу (23); результаты занести в табл.2.

2. Определить средний перегрев основания радиатора $\vartheta_{\text{осн}}$, по показаниям двух термопар: $\vartheta_{\text{осн}} = 0,5 \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)$

3. Найти мощность, P , Вт, рассеиваемую радиатором: $P_i = I_i \cdot U$.

4. Определить проводимость радиатора σ_i , Вт/К: $\sigma_i = P_i / \vartheta_{\text{осн}}$

5. Найти эффективный коэффициент теплообмена $\alpha_{\text{эфф},i}$, Вт/м²К:

$$\alpha_{\text{эфф},i} = \sigma_i / F$$

6. Для вынужденной конвекции рассчитать скорость движения воздуха по формулам (21), (22).

7. Результаты обработки занести в табл.2.

8. Рассчитать проводимости радиаторов по формуле (8) и по формуле (20).

9. Сравнить результаты расчета и эксперимента; рассчитать погрешность.

10. Построить зависимости выхода приборов в стационарный режим по результатам из табл.1.

11. Выводы по работе.

Примечание: пункты 8,9 выполнить только для ребристого и игольчато-штыревого радиаторов.

Содержание отчета

1. Результаты измерений и расчетов (табл.1 и 2).

2. Графическая зависимость выхода исследуемого прибора на стационарный тепловой режим.

3. Теоретические и экспериментальные значения σ и $\alpha_{\text{эфф}}$ для игольчато-штыревого и ребристого радиаторов, расчет погрешности.

Сопоставление экспериментальных значений σ и $\alpha_{эфф}$ для исследованных типов радиаторов.

4. Выводы по работе

Контрольные вопросы

1. Какие существуют зависимости для характеристики теплообменных свойств радиаторов?
2. Из каких составляющих складывается общая проводимость радиаторов?
3. Какие допущения принимаются при расчете эффективности радиатора по предложенной в пособии методике?
4. Для чего нужно знать время выхода системы (транзистор-радиатор) на стационарный тепловой режим?
5. Как меняется эффективный коэффициент теплообмена $\alpha_{эфф}$ в зависимости от мощности, рассеиваемой радиатором?
6. Какие существуют типы радиаторов?
7. У каких радиаторов $\alpha_{эфф}$ наиболее высок (у корзинчатых, игольчато-штыревых, ребристых), почему?
8. Как скажется увеличение длины ребра (штыря) радиатора на $\alpha_{эфф}$?
9. Какая площадь поверхности радиатора выбирается при расчете $\sigma_{л}$?
10. Из какого материала рекомендуется изготавливать радиаторы?
11. Как изменяется $\alpha_{эфф}$ ребристого радиатора в зависимости от ориентации его в пространстве?

Таблица 1

Номер прибора	Номер термопары	ТЭДС и перегревы	Время, мин											
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50		
1	1	мВ												
2	5	К												
2	5	мВ												
		К												
3	9	мВ												
		К												
4	13	мВ												
		К												

Таблица 2.

Номер прибора	I	U	P	Места расположения термопар							
				корпус прибора	основание радиатора	основание радиатора	ребро радиатора				
	ТЭДС и перегревы приборов и радиаторов										
	A	B	Вт	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1											
2											
3											
4											

Литература

1. Дульнев Г.Н. Тепло-и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.:Высшая школа, 1984.

Лабораторная работа №7

Определение внутренних тепловых сопротивлений силового полупроводникового прибора

Цель работы: ознакомление с особенностями теплового режима силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа (СПП); изучение способа определения внутреннего теплового сопротивления (ВТС) СПП; исследования ВТС СПП при различных давлениях; анализ полученных результатов и выработка рекомендаций по обеспечению нормального теплового режима СПП.

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством СПП, его работой и условиями эксплуатации.
2. Изучить по предлагаемым литературным источникам и данным методическим указаниям способы определения ВТС СПП.
3. Освоить работу на приборе для определения ВТС СПП.
4. Измерить ВТС СПП при различных давлениях.
5. Сделать анализ полученных результатов.
6. Составить отчет о проделанной работе.

Устройство силовых полупроводниковых приборов

Для коммутации, выпрямления, преобразования частоты и регулирования тока от 10 до 3000А и напряжений до 1000В используются силовые полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы, тиристоры различных видов).

Основным их элементом является многослойная полупроводниковая структура из кремния, имеющая форму тонкого диска диаметром от 20 до 160мм. Электрический ток пропускается через поверхность диска, при этом падение напряжения может быть от 1 до 2В.

При больших токах мощность тепловыделений может достигать 1-3кВт в очень ограниченном объеме *p-n* перехода.

Особую сложность измерения ВТС представляет в силовых полупроводниковых приборах таблеточного типа, так как значения $R_{\theta n}$ малы (0,03-0,2 К/Вт), зависят от приложенного давления, теплоотвод осуществляется через две поверхности, а термочувствительные параметры имеют, как правило, очень большой разброс даже в одной партии приборов. Поэтому есть необходимость разработать такой способ и средство измерения ВТС, которые исключали бы определение *p-n* перехода, а остальные измерения проводились прямыми методами, при помощи термопар и термомеров.

Силовой полупроводниковый прибор (СПП) таблеточного типа представлен на рис.30.

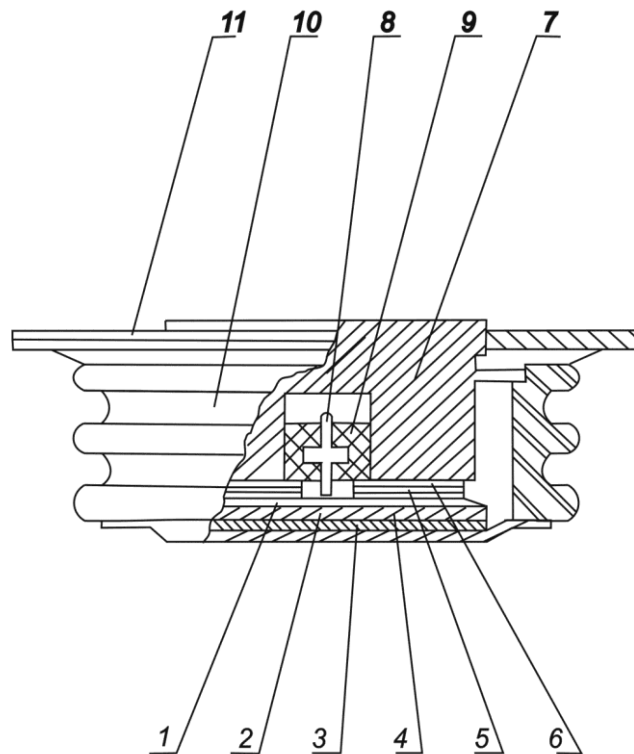


Рис.30 Устройство силового прибора таблеточного типа.

Полупроводниковая структура 1 припаяна к термокомпенсационному диску 2. Через серебряные, молибденовые, и оловянные прокладки 3, 4, 5 и 6 к структуре подводится электрический ток от катодного блока 7 и анода, представляющего собой медную луженую мембрану.

Управление СПП производится через электрод 8, отделенный от блока 7 компаундом 9. Весь прибор помещен в фарфоровый корпус 10 и загерметизирован мембранами 11. Источником теплоты является полупроводниковая структура 1. Тепловое сопротивление представляет собой совокупность кондуктивных и контактных термических сопротивлений между элементами 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7.

В существующих в настоящее время приборах таблеточного типа может быть и другое взаимное расположение элементов 1-7. Приведенный в качестве примера тиристор Т500 предназначен для коммутирования токов до 500 А и выделяет мощность до 900 Вт.

Способ измерения ВТС СПП

СПП таблеточного типа характеризуется двумя параметрами ВТС: от зоны р-п перехода к анодной R_a и катодной R_k поверхностями:

$$R_a = \frac{T_j - T_a}{Q_a} \quad (1)$$

$$R_k = \frac{T_j - T_k}{Q_k} \quad (2)$$

где T_j , T_a , T_k – температуры p - n перехода, Q_a и Q_k – тепловые потоки, идущие от поверхности анода и катода.

Анализируя конструкции СПП таблеточного типа, можно сделать ряд допущений:

1. Тепловые потоки в СПП идут в основном к катодной и анодной поверхностям, боковой теплообмен пренебрежимо мал.

2. Толщина зоны тепловыделений много меньше толщины прибора и ее можно считать плоским источником теплоты.

3. В процессе исследований прибор находится в стационарном тепловом режиме.

Если пропустить тепловой поток от анодной поверхности к катодной, то в соответствии с этими допущениями можно считать, что $Q'_k = -Q'_a$, т.е. вышедший из катодной поверхности поток равен по абсолютной величине вошедшему в анод потоку. Этого можно добиться, разогрев анод нагревателем и охладив катод. В этом случае:

$$R_a + R_k = \frac{T_j - T_a}{Q_a} + \frac{T_j - T_k}{Q_k} = \frac{T_a - T_k}{Q_k} \quad (3)$$

где T'_a , T'_k , Q'_k – измеренные значения температур и потока. Сумму этих ВТС можно измерить, определив температуры анода T'_a и катода T'_k и измерив термомером тепловой поток Q'_k на катоде. Если затем разогреть до стационарного состояния СПП электрическим током, пропускаемым через полупроводниковую структуру, измерить напряжение U и силу греющего тока I , тепловой поток Q''_k , идущий через катод и температуры анода T''_a и катода T''_k , то можно составить уравнения:

$$Q''_k \cdot R_k = T''_j - T''_k \quad (4)$$

$$(U \cdot I - Q''_k) \cdot R_a = T''_j - T''_a \quad (5)$$

В результате этих двух опытов получена замкнутая система уравнений (3), (4), (5), в которых неизвестные R_a , R_k , T''_j измеренные величины T'_a , T'_k , Q'_k , T''_a , T''_k , Q''_k , U и I . Решая эту систему уравнений относительно R_a и R_k можно получить:

$$R_a = \frac{\frac{Q''_k}{Q'_k} (T_a - T_k) + T''_k - T''_a}{U \cdot I} \quad (6)$$

$$Rk = \frac{T_a - T_k}{Qk} - Ra \quad (7)$$

Таким образом, можно определить значение внутренних тепловых сопротивлений СПП таблеточного типа.

Описание прибора для измерения ВТС

На рис.31 изображена измерительная ячейка для определения ВТС. Полупроводниковый прибор 1, включающий тепловыделяющую структуру 2, зажат между тепломером 3 и нагревателем 4.

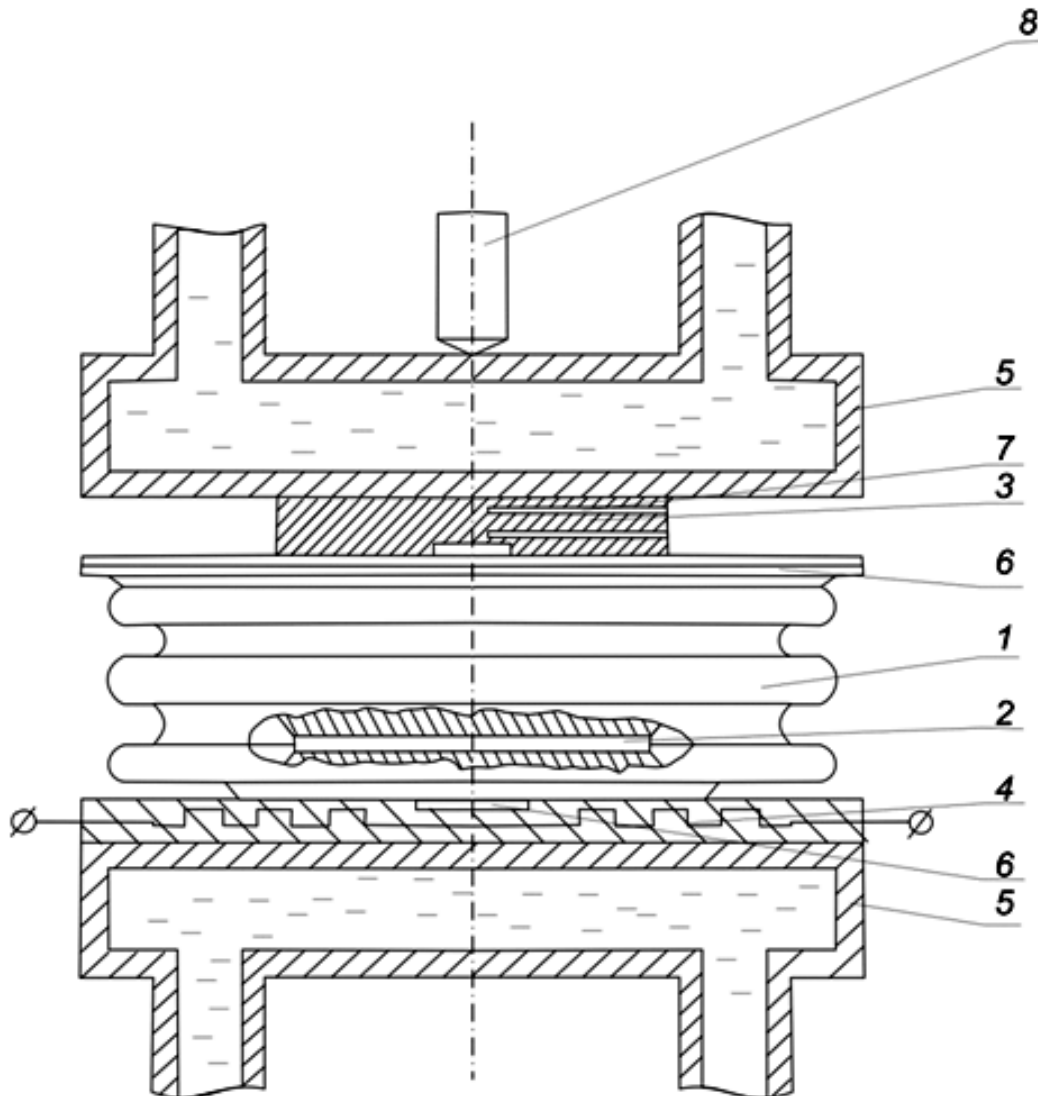


Рис.31 Измерительное устройство для определения внутреннего теплового сопротивления силовых полупроводниковых приборов

Для охлаждения ячейки служат охладители 5. Напряжение U и температуры T_a и T_k измеряются при помощи дисков 6, установленных на тепломере и нагревателе через электро- и теплоизоляционную прокладку. В дисках 6 установлены горячие спаи термомпар и электроды для измерения

напряжения. Тепломер представляет собой стальной цилиндр, на разной высоте которого сделаны радиальные отверстия, в которых установлен восьмиспайный термостолбик.

Используются термопары типа «Хромель-копель» ГОСТ 3044-84. Чувствительность термопар в диапазоне температур 0-100°C 14,5 К/мВ, чувствительность тепломера 56,5 Вт/мВ. Для сжатия прибора до равных давлений установлено нагрузочное устройство, которое создает усилие в осевом направлении СПП до $3 \cdot 10^4$ Па и измеряется динамометром ДОСП-3-3. Давление P передается прибору через охладители 5, тепломер 3 и нагреватель 4 при помощи толкателя 8 (рис.31). В основании прибора установлены элементы питания СПП, переключатель термопар и режимов, приборы, показывающие напряжение и силу тока в СПП. Через охладители и тиристоры в цепи питания СПП прокачивается вода, которая термостатируется в термостате ИТИ-2. С целью автоматизации измерений, все измеряемые сигналы могут сниматься со специального разъема на задней стенке прибора.

Электрическая схема прибора

Схема представлена на рис.32.

Напряжение 220В из сети через предохранитель и тумблер «сеть» подводится к входной обмотке трансформатора. Напряжение на СПП подается с вторичных обмоток через тиристоры Т50 при переключении тумблера «режим» в положение II. Сила тока измеряется при помощи нормального шунта 30А-75мВ и индикатора М265 «ТОУ», причем на индикаторе 1 деление соответствует 0,02 В, а также сигнал с шунта и напряжение через делитель поступает в блок холодных спаев в гнезда 7, 8, 9 и 10. Нагреватель питается с вторичной обмотки трансформатора, если тумблер «Режим» находится в положении «1».

Температура анода измеряется термопарой, которая в блоке холодных спаев установлена в гнездах 1, 2, катодная термопара – в гнездах 3, 4, термостолбик тепломера подключен к гнездам 5, 6.

Сигналы с блока холодных спаев [мВ] поступают на переключатель сигнал, с которого подается в розетку на задней стенке прибора (измеряется милливольтметром) и на разъем для подключения блока автоматизации измерений.

Положение переключателя:

- 1 – температура анода
- 2 – температура катода
- 3 – тепловой поток от катода
- 4 – сила тока
- 5 – напряжение

Пересчет ЭДС термопар в температуру производится по формуле:

$$T_i = 14,6 \cdot T \quad (8)$$

Тепловой поток определяется по зависимости: $Q_k = 56,5 \cdot Q \quad (9)$

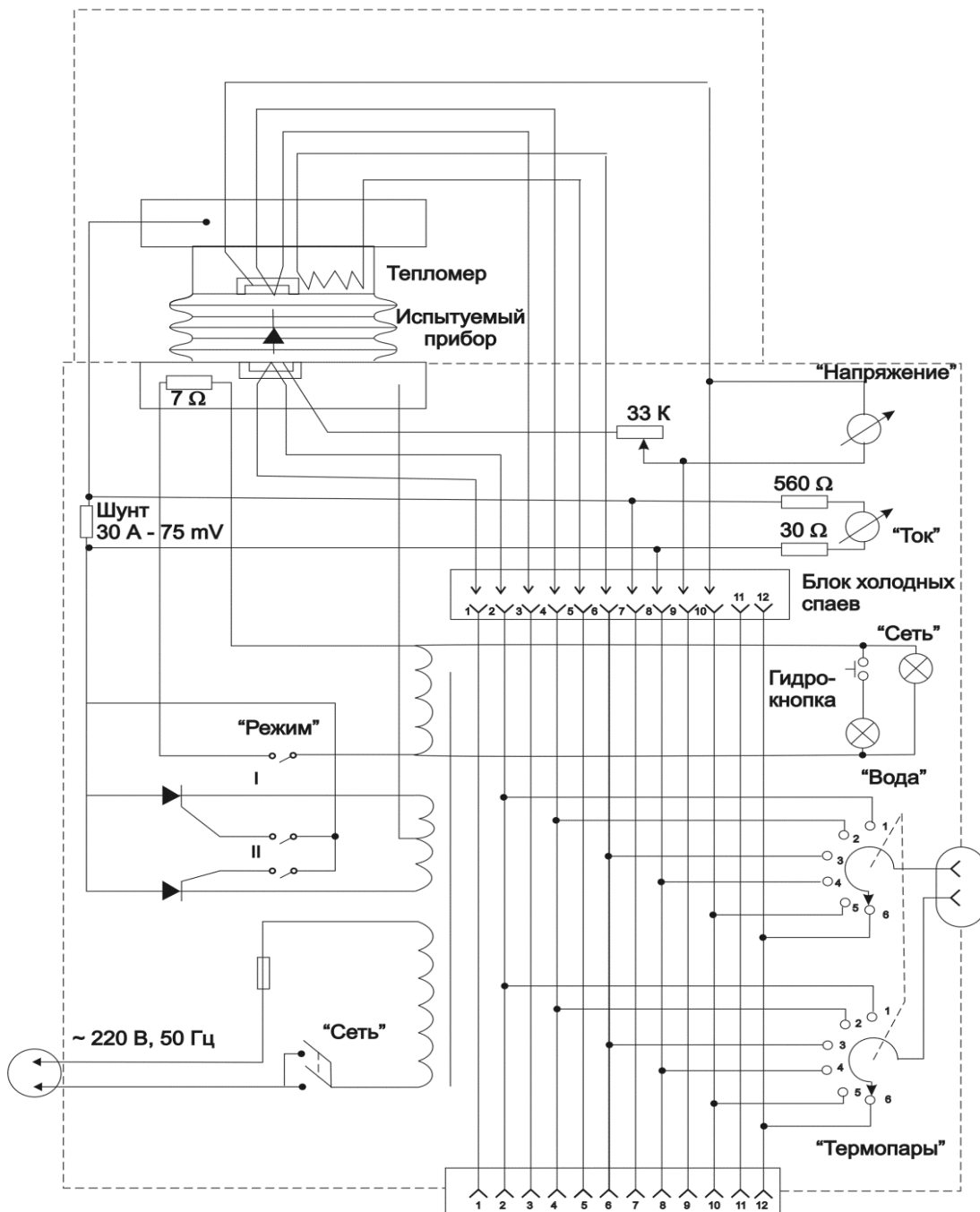


Рис.32 Электрическая схема измерителя ВТС.

Напряжение в вольтах:

$$U = 0,0177 \cdot U \quad (10)$$

Сила тока в амперах:

$$I = 0,644 \cdot I \quad (11)$$

Величины в формулах (8-11) подставляются в мВ.

Полное тепловое сопротивление R можно рассчитать по формуле для двух параллельных тепловых сопротивлений:

$$R = \frac{Ra \cdot Rk}{Ra + Rk} \quad (12)$$

Порядок проведения работы

1. Проверить подключен ли прибор для измерения ВТС к термостату и включить термостат.
2. Приподняв колпак, поместить тиристор внутрь измерительного устройства и опустить колпак.
3. Установить с помощью нагрузочного устройства, заданное преподавателем давление на тиристор.
4. Включить прибор с помощью тумблера «Сеть» на передней панели установки.
5. Включить цифровой вольтметр.
6. Установить тумблер «Режим» в положение I.
7. Через 20 минут после начала опыта записать показания термопар 1-5.
8. Установить тумблер «Режим» в положение II.
9. Повторить пункт 7.
10. Повторить опыт (пп. 3-9) при других значениях давления на испытуемый образец.
11. Результаты измерений свести в табл.1

Таблица 1.

№ термопар	Давление P=		Давление P=		Давление P=	
	Режим I	Режим II	Режим I	Режим II	Режим I	Режим II
1						
2						
3						
4						
5						

Обработка результатов измерений

1. Расчет тепловых сопротивлений анода и катода производится по формулам (6) и (7)
2. Полное тепловое сопротивление можно рассчитать по формуле (12) для двух параллельных тепловых сопротивлений
3. Вычисление погрешности измерения ВТС СПП складывается из трёх составляющих:
 - ❖ погрешности показаний и градуировки термопар ΔE_{mn} и ΔK ;
 - ❖ погрешности показаний и градуировки тепломера ΔE_{tm} и $\Delta \varphi$;
 - ❖ погрешности амперметра и вольтметра ΔI и ΔU .

Вычисление погрешности производится из выражения (6) и (7), которые записываются в виде:

$$R_a = \frac{E'_{TM} \cdot E'_{TM} + E''_{TP} \cdot E'_{TP}}{U \cdot I \cdot E'_{TM}} \cdot K; R_k = \frac{E'_{TP} \cdot K}{E'_{TM}} - R_a;$$

$$T'_a - T'_k = K \cdot E'_{TP}; Q'_k = E'_{TM};$$

$$T''_k - T''_a = K \cdot E''_{TP}; Q''_k = E''_{TM} \cdot \varphi.$$

Абсолютная и относительная погрешности определяются по формулам для косвенных измерений:

$$\Delta R_a^2 = \left(\frac{\partial R_a}{\partial E'_{TP}} \Delta E'_{TP}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial E''_{TP}} \Delta E''_{TP}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial E'_{TM}} \Delta E'_{TM}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial E''_{TM}} \Delta E''_{TM}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial R_a}{\partial K} \Delta K\right)^2;$$

$$\delta R_a = \frac{\Delta R_a}{R_a};$$

$$\Delta R_k^2 = \left(\frac{\partial R_k}{\partial E'_{TP}} \Delta E'_{TP}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial E''_{TM}} \Delta E''_{TM}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial K} \Delta K\right)^2 + \left(\frac{\partial R_k}{\partial \varphi} \Delta \varphi\right)^2;$$

$$\delta R_k = \frac{\Delta R_k}{R_k}.$$

Содержание отчета

1. Результаты измерений (табл. 1).
2. Результаты обработки экспериментальных данных (табл. 2).

Таблица 2

Р кгс			
R _a к/Вт			
R _к к/Вт			
R к/Вт			

3. Расчет погрешности измерений ВТС СПП.
4. Построить график зависимости ВТС (R) от давления (P) на тиристор.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как устроен силовой полупроводниковый прибор?
2. В чём сущность контактных методов измерения температур?
3. Назовите источники погрешности метода измерения ВТС СПП.
4. Какие допущения используются при расчете R_a, R_к и полного внутреннего сопротивления?
5. Дайте определение тепловому режиму СПП.
6. Что является основным источником тепловыделений при работе СПП?
7. Из каких погрешностей складывается погрешность измерения ВТС СПП?
8. При каком условии мощность потерь можно определить как Q=U·I?
9. В чём недостатки СПП?
10. Назовите рабочие температуры СПП.

Литература

1. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г. Испытания силовых полупроводниковых приборов. М. Энергоиздат 1981
2. Рабимерсон А.А., Ашкинази Г.А. Нагрузки силовых полупроводниковых приборов. М. Энергия 1976

Шарков Александр Васильевич
Кораблев Владимир Антонович
Герасютенко Виктория Викторовна
Заричняк Юрий Петрович

Системы охлаждения и термостатирования

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А