

# Тема 8

**Сопротивление проводников.  
Сверхпроводимость. Электронная  
теория проводимости металлов.  
Законы Ома и Джоуля – Ленца в  
дифференциальной форме**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

18.1. Сопротивление проводников.

18.2. Сверхпроводимость.

18.3. Электронная теория проводимости металлов.

18.4. Законы Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.

## 8.1. Сопротивление проводников

Сопротивление проводников объясняется тем, что:

1. При движении электронов между узлами кристаллической решетки происходят соударения, т.к. атомы (ионы) кристаллической решетки колеблются около положения равновесия. Чем выше температура проводника, тем больше амплитуда колебания атомов (ионов), тем больше сопротивление проводника.

Электрическим сопротивлением проводника обусловлено явление преобразования электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока по проводнику

2. Т.к. кристаллическая решетка состоит из ионов, внутри проводника возникает периодическое электрическое поле. Потенциал этого поля тоже изменяется по периодическому закону, поэтому упорядоченное движение электронов нарушается.

Экспериментально установлено, что сопротивление проводников  $R$  зависит от температуры по закону

$$R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) \quad (8.1)$$

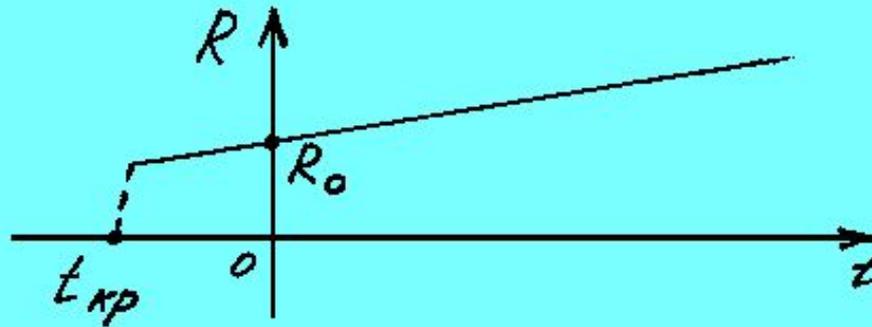


Рис. 8.1.

Однако на практике коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  столь малы, что ими пренебрегают. Если выразить эту зависимость графически, то можно заметить, что при абсолютном нуле сопротивление проводников должно упасть до нуля. Однако это далеко не всегда так. В формуле зависимости сопротивления от температуры  $\alpha$  называется температурным коэффициентом сопротивления (т.к.с.) и индивидуален для каждого проводника. Для выяснения физического смысла  $\alpha$  поступим следующим образом:

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1) \quad (8.2)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2) \quad (8.3)$$

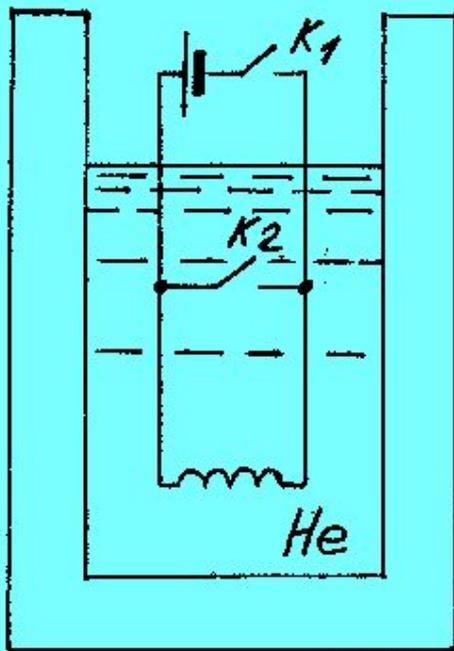
Из (8.3) вычтем (8.2) и получим  $\Delta R = R_0 \alpha \Delta t$  Итак

$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}$  - физическая величина, численно равная относительному изменению сопротивления при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ .

## 8.2. Сверхпроводимость

В 1911 году Камерлинг - Онессом было открыто явление сверхпроводимости, когда при охлаждении проводника ниже критической температуры его сопротивление практически уменьшалось до нуля. В установке Камерлинг - Онесса в сосуде Дьюара с жидким гелием находился ртутный замкнутый виток, в котором индуцировался электрический ток, затем судили о величине этого тока по интенсивности магнитного поля около сосуда.

### Схема опыта Камерлинг - Онесса.



#### Первая фаза опыта.

Ключ K1 замкнут, а ключ K2 – разомкнут. В цепи идет ток.

#### Вторая фаза опыта.

Отключаем источник тока путем размыкания ключа K1, при одновременном замыкании ключа K2. В течение длительного времени фиксируется ток в цепи, погруженной в жидкий гелий.

Рис. 8.2.

### 8.3. Электронная теория проводимости металлов

Сопротивление однородного по сечению и химическому составу реального проводника можно рассчитать по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.5)$$

Где  $l$  — длина проводника,  $S$  — поперечное сечение проводника,  $\rho$  — удельное сопротивление проводника.

Отсюда  $\rho = \frac{R}{\frac{l}{S}}$  - т.е.  $\rho$  — физическая величина, численно равная сопротивлению куба вещества с ребром, равным 1. (8.6)

Согласно классической электронной теории проводимости, электроны в металле представляют собой идеальный газ. Экспериментальное доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах Л.И.Мандельштама и Н.Д. Папалекси (в 1913 г.), Стюартом и Толменом (в 1916 г.).

Схема этих опытов такова. На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (рис. 8.4). К концам дисков при помощи скользящих контактов присоединяют гальванометр.

Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки катушки свободные заряженные частицы будут некоторое время двигаться относительно проводника по инерции, и, следовательно, в катушке возникнет электрический ток. Ток будет существовать незначительное время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц, образующее ток, прекращается.

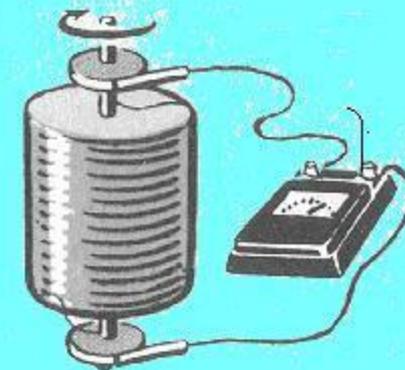


Рис. 8.4.

Наблюдения показали, что в цепи после остановки катушки некоторое время существует ток. Направление его говорит о том, что он создается движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе, т.е.  $|q_0|/m$ . Поэтому, измеряя заряд, проходящий через гальванометр за все время существования тока в цепи, удалось определить отношение  $|q_0|/m$ . Оно оказалось равным  $1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Эта величина совпадает с отношением заряда электрона к его массе  $e/m$ , найденным ранее из других опытов.

## 8.4. Законы Ома и Джоуля - Ленца в дифференциальной форме

При прохождении электрического тока по проводнику совершается работа  $A=qU$ , которая по закону сохранения и превращения энергии, идет на нагревание проводника. Если ток постоянный, то  $q=It$ , тогда

$$A=UIt \quad (8.7)$$

Это математическое представление закона Джоуля - Ленца.

Мощность, выделяемая в цепи равна

$$N = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (8.8)$$

Выделим в веществе элементарный отрезок и применим к нему закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = jS; \quad E = \frac{U}{l} \Rightarrow U = El; \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

Подставив в формулу закона Ома получим:

$$j = \frac{1}{\rho} \sigma \quad (8.9)$$

В векторной форме  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ . (8.10)

Это и есть запись закона Ома в дифференциальной форме. Итак, плотность тока прямо пропорциональна напряженности электрического поля.

$$Q = \frac{U^2}{R} t \quad Q = \frac{E^2 l^2 S t}{\rho l} = \frac{1}{\rho} E^2 V t \quad \frac{Q}{V t} = \frac{1}{\rho} E^2 \quad (8.11)$$

По определению мощность тока  $P = \frac{Q}{t}$ , (8.12)

$$w = \frac{P}{V} \quad - \quad \text{объемная плотность мощности.} \quad (8.13)$$

Тогда закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме запишется

$$w = \gamma E^2, \quad (8.14)$$

т. е. объемная плотность мощности тока прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

