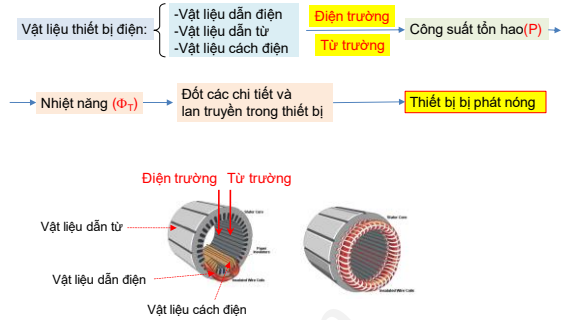


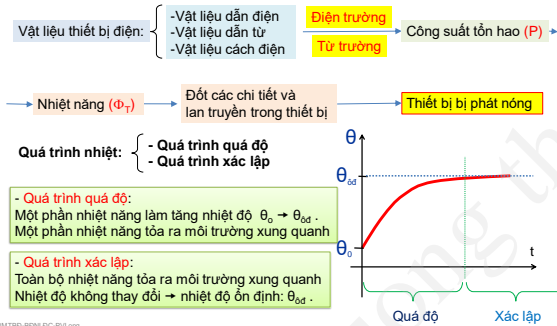
## Chương 2: HIỆN TƯỢNG PHÁT NÓNG/ LÀM MÁT TRONG THIẾT BỊ ĐIỆN

- Tổng quan quá trình nhiệt trong thiết bị điện
- Công suất tổn hao trong thiết bị điện
- Quá trình phát nóng - Quá trình nguội
- Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập
- Các chế độ làm việc của thiết bị điện

### Tổng quan quá trình nhiệt trong thiết bị điện

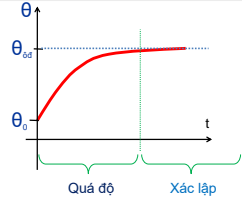


### Tổng quan quá trình nhiệt trong thiết bị điện



### Tổng quan quá trình nhiệt trong thiết bị điện

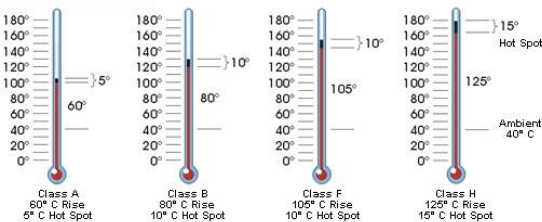
- Quá trình nhiệt: { - Quá trình quá độ  
- Quá trình xác lập }
- Yêu cầu: Nhiệt độ phát nóng của thiết bị phải nhỏ hơn nhiệt độ cho phép
- Trong các vật liệu: dẫn điện, dẫn từ, cách điện  
Vật liệu cách điện chịu nhiệt kém nhất
- $\rightarrow$  Nhiệt độ cho phép của thiết bị điện được quy định bởi nhiệt độ cho phép của cách điện



Cấp cách điện	Y	A	E	B	F	H	C
Nhiệt độ cho phép [°C]	90	105	120	130	155	180	>180

### Tổng quan quá trình nhiệt trong thiết bị điện

#### Insulation Class



Cấp cách điện	Y	A	E	B	F	H	C
Nhiệt độ cho phép [°C]	90	105	120	130	155	180	>180

### Công suất tổn hao trong thiết bị điện

Năng lượng tổn hao của các vật liệu kỹ thuật điện trong một đơn vị thời gian được gọi là công suất tổn hao

- Công suất tổn hao trong các chi tiết dẫn điện
- Công suất tổn hao trong các chi tiết dẫn từ
- Công suất tổn hao trong các chi tiết cách điện

#### 1- Công suất tổn hao trong các chi tiết dẫn điện

Dòng điện  $\rightarrow$  vật dẫn điện  $\rightarrow$  công suất tổn hao P

$$P = \int_V j^2 \rho \, dv$$

- $j$ : Mật độ dòng điện [A/m<sup>2</sup>]  
 $\rho$ : Điện trở suất [ $\Omega \cdot m$ ];  
 $V$ : Thể tích vật dẫn điện [m<sup>3</sup>]

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

**Công suất tổn hao trong thiết bị điện**

Nếu dây dẫn có tiết diện đều  $q$  dọc theo toàn bộ chiều dài  $l$ , vector mật độ dòng điện vuông góc và phân bố đều trên bề mặt tiết diện  $q$ :

$$P = j^2 \rho V = j^2 \rho l \cdot q = I^2 R$$

Điện trở vật dẫn điện:

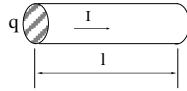
$$R = \rho \frac{l}{q}$$

$\rho$ : Điện trở suất của vật dẫn điện phụ thuộc nhiệt độ

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_1)]$$

- $\rho_{01}$ : Điện trở suất ở nhiệt độ  $\theta_1$
- $\alpha$  [1/°C]: hệ số nhiệt điện trở:  $\alpha_{Al} = 0,0042$  (1/°C);  $\alpha_{Cu} = 0,0043$  (1/°C)

Thường cho sẵn  $\rho_{01}$  ở  $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$  nên  $\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta)$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

7

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

**Công suất tổn hao trong thiết bị điện****Điện trở vật dẫn điện:**

- Dòng điện DC chạy qua vật dẫn điện

$$R_{DC} = R = \rho \frac{l}{q}$$

- Dòng điện AC chạy qua vật dẫn điện

$$R_{AC} = k_f R = k_f \rho \frac{l}{q}$$

$k_f = k_{bm} k_g > 1$ : Hệ số tổn hao phụ do hiệu ứng bề mặt ( $k_{bm} > 1$ ) và hiệu ứng gần ( $k_g > 1$ )

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

8

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

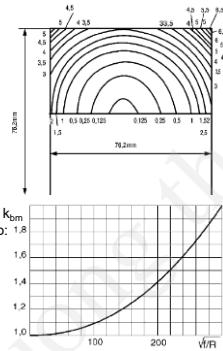
**Công suất tổn hao trong thiết bị điện****Hiệu ứng bề mặt:**

Hiệu ứng bề mặt sinh ra do hiện tượng phân bố dòng điện không đều trên bề mặt tiết diện  $q$  của vật dẫn điện: mật độ dòng điện phân bố ở mặt ngoài lớn hơn khu vực tâm vật dẫn điện

Hiệu ứng bề mặt được đánh giá bằng hệ số bề mặt  $k_{bm}$

Hệ số tổn hao phụ do hiệu ứng bề mặt phụ thuộc vào:

- Tần số dòng điện  $f$ .
- Thông số hình học của tiết diện vật dẫn điện.

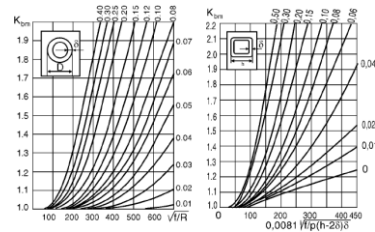
BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

**Công suất tổn hao trong thiết bị điện**

Hệ số tổn hao phụ do hiệu ứng bề mặt phụ thuộc vào:

- Tần số dòng điện  $f$ .
- Thông số hình học của tiết diện vật dẫn điện.

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

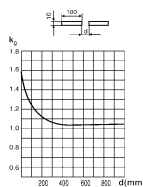
10

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

**Công suất tổn hao trong thiết bị điện****Hiệu ứng gần:**

Hiệu ứng gần là hiện tượng phân bố dòng điện không đều trên tiết diện của vật dẫn điện, khi đặt gần nhau, có dòng điện AC chạy qua

Hiệu ứng gần được đánh giá bằng hệ số gần  $k_g$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

11

Chương 2: Hiệu lương phát nóng trên mặt trong thiết bị điện

**Công suất tổn hao trong thiết bị điện****2- Công suất tổn hao trong các chi tiết dẫn từ**

Vật dẫn từ (mạch từ, chi tiết sắt thép, vỏ máy biến áp hợp kim sắt...) ở trong vùng từ trường biến thiên  
→ Công suất tổn hao do dòng điện xoáy và từ trễ.

$$P_{VatDanTu} = P_{Xoay} + P_{TuTre}$$

**- Mạch từ ghép bởi lá thép kỹ thuật điện.**

Công suất tổn hao do từ trễ và dòng điện xoáy trên một đơn vị khối lượng.

$$P_{TuTre} = p_{tr} \frac{f}{f_0} \left( \frac{B}{B_0} \right)^2 \quad P_{Xoay} = p_x \left( \frac{f}{f_0} \frac{B}{B_0} \right)^2$$

$p_{tr}$ ,  $p_x$  [W/kg]: Công suất tổn hao do từ trễ và dòng xoáy trên một đơn vị khối lượng ở tần số  $f_0$  và từ cảm  $B_0$   
Có thể xác định bằng các đồ thị thực nghiệm trong sổ tay vật liệu

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

12

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột tụ điện

## Công suất tổn hao trong thiết bị điện

## 3- Công suất tổn hao trong các chi tiết cách điện

- Tổn hao Joule trong vật liệu cách điện không đáng kể  $P = \frac{U^2}{R} \approx 0$   
Do điện trở R của cách điện rất lớn
- Khi điện trường biến thiên  $\rightarrow$  Công suất tổn hao điện môi trong vật liệu cách điện

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

P : Công suất tổn hao trong cách điện [W]  
 $\omega = 2\pi f$  , f: Tần số điện trường [Hz]  
 U : Điện áp [V]  
 C : Điện dung [F]  
 $\tan \delta$ : Hệ số tổn hao điện môi

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad \varphi: \text{góc lệch pha giữa dòng và áp.}$$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

13

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột tụ điện

## Quá trình phát nóng - Quá trình nguội

## 1. Quá trình phát nóng

Xét một vật thể đồng nhất, đẳng nhiệt có nguồn nhiệt nội tại:

VD: Thanh đồng có dòng điện chạy qua

- Công suất nhiệt P= hằng số
- Nhiệt độ bằng nhau ở mọi điểm trong vật thể.
- Hệ số tỏa nhiệt  $K_T$  [W/m<sup>2</sup>°C] và nhiệt dung riêng C [W.s/°C]

Năng lượng sản sinh bên trong vật thể trong thời gian dt (Pdt) sẽ biến thành nhiệt năng: một phần làm tăng nhiệt độ của nó (Cdt), một phần tỏa ra môi trường xung quanh ( $k_T S$  tdt)

Phương trình cân bằng nhiệt năng:

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + k_T \cdot S \cdot \tau \cdot dt \quad \frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T \cdot S}{C} \cdot \tau - \frac{P}{C} = 0$$

$\tau = \theta - \theta_o$  : Độ chênh nhiệt độ so với nhiệt độ môi trường, °C.

S : Diện tích tỏa nhiệt [m<sup>2</sup>]

C : Nhiệt dung [W.s/°C].

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

14

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột tụ điện

## Quá trình phát nóng - Quá trình nguội

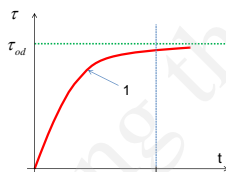
$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T \cdot S}{C} \cdot \tau - \frac{P}{C} = 0 \quad \begin{cases} \tau = \theta - \theta_o : \text{Độ tăng nhiệt độ so với nhiệt độ môi trường } [^{\circ}\text{C}]. \\ S : \text{Diện tích tỏa nhiệt } [\text{m}^2] \\ C : \text{Nhiệt dung } [\text{W.s}/^{\circ}\text{C}]. \end{cases}$$

Giải phương trình vi phân bậc nhất với các điều kiện ban đầu tại t=0 ,

Với điều kiện ban đầu :  $t = 0, \tau = 0$

$$\tau = \tau_{od} \left( 1 - e^{-t/T} \right)$$

Đường 1



$$\tau_{od} = \frac{P}{k_T S} : \text{Độ tăng nhiệt ổn định } [^{\circ}\text{C}].$$

$$T = \frac{C}{k_T S} : \text{Hằng số thời gian phát nóng } [\text{s}]$$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

15

## Quá trình phát nóng - Quá trình nguội

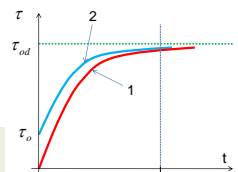
$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T \cdot S}{C} \cdot \tau - \frac{P}{C} = 0 \quad \begin{cases} \tau = \theta - \theta_o : \text{Độ tăng nhiệt độ so với nhiệt độ môi trường } [^{\circ}\text{C}]. \\ S : \text{Diện tích tỏa nhiệt } [\text{m}^2] \\ C : \text{Nhiệt dung } [\text{W.s}/^{\circ}\text{C}]. \end{cases}$$

Giải phương trình vi phân bậc nhất với các điều kiện ban đầu tại t=0 ,

Với điều kiện ban đầu :  $t = 0, \tau = \tau_o$

$$\tau = \tau_o e^{-t/T} + \tau_{od} \left( 1 - e^{-t/T} \right)$$

Đường 2



$$\tau_{od} = \frac{P}{k_T S} : \text{Độ tăng nhiệt ổn định } [^{\circ}\text{C}].$$

$$T = \frac{C}{k_T S} : \text{Hằng số thời gian phát nóng } [\text{s}]$$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

16

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột tụ điện

## Quá trình phát nóng - Quá trình nguội

$$\tau = \tau_o e^{-t/T} + \tau_{od} \left( 1 - e^{-t/T} \right)$$

Nhân xét:

1- Khi  $t \rightarrow \infty \Rightarrow \tau \rightarrow \tau_{od} = \frac{P}{k_T S}$

Chế độ xác lập nhiệt: công suất tổn hao gây phát nóng vật thể cân bằng với công suất nhiệt tỏa ra môi trường xung quanh.

$$P = k_T S \cdot \tau_{od} : \text{Phương trình cân bằng nhiệt ở chế độ xác lập}$$

2- Nếu toàn bộ năng lượng tổn hao không tỏa ra môi trường xung quanh mà chỉ dùng để đốt nóng vật thể (chế độ đoạn nhiệt, đường 3):

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau \rightarrow \tau = \frac{P}{C} t = \frac{\tau_{od}}{T} t \rightarrow \text{khi } t = T \text{ thì } \tau = \tau_{od}$$

- Hằng số thời gian phát nóng T là thời gian làm việc cần thiết để nhiệt độ của vật thể đạt nhiệt độ ổn định không tỏa ra môi trường xung quanh (chế độ đoạn nhiệt).
- Hằng số thời gian T càng lớn thì quá trình phát nóng của vật thể càng kéo dài.

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

17

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột tụ điện

## Quá trình phát nóng - Quá trình nguội

## 2. Quá trình nguội

Quá trình nguội của vật thể xảy ra khi nguồn công suất nhiệt P = 0

$\rightarrow$  Phương trình cân bằng nhiệt:

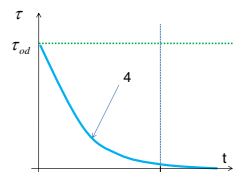
$$C \cdot d\tau + k_T \cdot S \cdot \tau \cdot dt = 0$$

Giải phương trình vi phân

Với điều kiện đầu khi  $t = T$  thì  $\tau = \tau_{od}$

$$\tau = \tau_{od} \cdot e^{-t/T}$$

Đường 4

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV&L&ng  
(TCB&nh edited 2016)

18

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

### Các dạng truyền nhiệt cơ bản

- Truyền nhiệt do dẫn nhiệt } → Thường gọi là **Truyền nhiệt**
- Truyền nhiệt do đối lưu } → Thường gọi là **Tỏa nhiệt**
- Truyền nhiệt do bức xạ }

**1. Dẫn nhiệt** là quá trình trao đổi nhiệt giữa các phần của vật thể hay giữa các vật thể có nhiệt độ khác nhau khi chúng tiếp xúc với nhau.  
Ví dụ khi một thanh sắt bị đốt nóng ở một đầu thì đầu kia cũng sẽ bị nóng hay khi áp tay vào một vật nóng thì tay sẽ cảm giác được sự phát nóng.

**2. Đối lưu** là quá trình trao đổi nhiệt nhờ sự chuyển động của chất lỏng hoặc chất khí giữa các vùng có nhiệt độ khác nhau

**Sự tỏa nhiệt đối lưu** - trường hợp đặc biệt của trao đổi nhiệt đối lưu - quá trình trao đổi nhiệt giữa **bề mặt vật rắn** với **chất lỏng hoặc chất khí chuyển động**

**3. Bức xạ** là quá trình trao đổi nhiệt dưới dạng các tia nhiệt do vật thể phát nóng bức xạ ra môi trường xung quanh : tia sáng, tia hồng ngoại

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

19

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

### Các dạng truyền nhiệt cơ bản

- Truyền nhiệt do dẫn nhiệt } → Thường gọi là **Truyền nhiệt**
- Truyền nhiệt do đối lưu } → Thường gọi là **Tỏa nhiệt**
- Truyền nhiệt do bức xạ }

Trong thực tế cả ba dạng trao đổi nhiệt xảy ra đồng thời và có ảnh hưởng lẫn nhau gọi là **sự trao đổi nhiệt hỗn hợp**.  
Ta cần xét xem dạng trao đổi nhiệt nào là cơ bản, ảnh hưởng của các dạng còn lại được tính đến bằng cách dựa vào các hệ số hiệu chỉnh

**Ví dụ :** Quá trình trao đổi nhiệt giữa bề mặt chất rắn với chất khí ở nhiệt độ không quá lớn được thực hiện chủ yếu bằng đối lưu, ảnh hưởng của bức xạ được tính đến thông qua một hệ số hiệu chỉnh :

Hệ số tỏa nhiệt  $k_T$  = hệ số tỏa nhiệt đối lưu + hệ số tỏa nhiệt bức xạ

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

20

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

### Phương trình truyền nhiệt Fourier

Vi phân nhiệt lượng  $dQ$  truyền qua diện tích vi phân  $dS$  vuông góc với phương truyền nhiệt  $x$  trong khoảng thời gian  $dt$  :

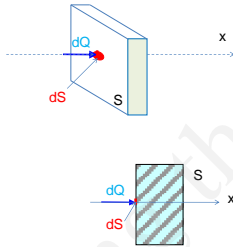
$$d^2Q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dS dt$$

$\lambda$  : hệ số dẫn nhiệt [W/m°C]

• Nếu nhiệt lượng  $Q$  truyền đồng đều qua mọi điểm trên tiết diện  $S$  :  $\rightarrow \frac{dQ}{dS} = const$

Phương trình truyền nhiệt Fourier:

$$\Phi_T = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} S \quad \Phi_T : \text{Nhiệt thông}$$



BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

21

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

• Nhiệt lượng  $Q$  (VD: do công suất tổn hao trong vật dẫn điện) truyền qua diện tích  $S$  của vật không có nguồn nhiệt nội tại (VD: vật cách điện)

- Nhiệt thông:  $\Phi_T = \frac{dQ}{dt}$  : Công suất nhiệt
- Mật độ nhiệt thông:  $\Phi_{Tn} = \frac{\Phi_T}{S}$

Nếu gọi  $P$  là công suất tổn hao trong vật dẫn điện ở chế độ xác lập nhiệt ta có:  **$P = \Phi_T$**

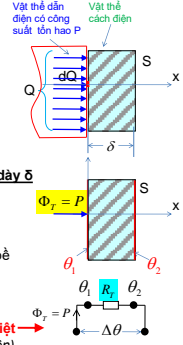
### Truyền nhiệt qua vật cách điện là vách phẳng có bề dày $\delta$

Khi  $x = 0, \theta = \theta_1$   
 $x = \delta, \theta = \theta_2$  }  $\rightarrow \Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Phi_T \frac{\delta}{\lambda S} = \Phi_T R_T$

$R_T = \frac{\delta}{\lambda S}$  : nhiệt trở do dẫn nhiệt qua vách cách điện có bề dày  $\delta$ , tiết diện  $S$  và hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ . [°C/W]

$\Delta\theta = \Phi_T R_T$  : Định luật ohm trong trường nhiệt

→ Có thể mô tả quá trình nhiệt bằng sơ đồ nhiệt (tương tự mạch điện)



BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

22

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

Đại lượng nhiệt	Đơn vị	Đại lượng điện	Đơn vị
Nhiệt lượng	W.s	Điện lượng	A.s
Nhiệt thông	W	Dòng điện	A
Mật độ nhiệt thông	W/m²	Mật độ dòng điện	A/m²
Hệ số dẫn nhiệt	W/m°C	Điện dẫn suất	1/Ωm
Độ chênh nhiệt	°C	Điện áp	V
Nhiệt trở	°C/W	Điện trở	Ω
Nhiệt dung	W.s/°C	Điện dung	F

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

23

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong ruột bị điện

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

### Truyền nhiệt qua vật cách điện là vách trụ bán kính $R_1, R_2$

Xét dây dẫn tròn bọc cách điện, chiều dài  $l$ , bán kính dây dẫn  $R_1$ , bán kính kể cả cách điện  $R_2$ ; hệ số dẫn nhiệt của lớp cách điện  $\lambda$ ; nhiệt độ phần dẫn điện  $\theta_1$  (chính là nhiệt độ mặt trong lớp cách điện), nhiệt độ của bề mặt ngoài lớp cách điện  $\theta_2$ . Nếu  $l \gg R_1, R_2$  thì nhiệt chỉ truyền theo hướng ngang trục (hướng kính)

Phương trình truyền nhiệt Fourier:  $\Phi_T = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} S$

$$\rightarrow -d\theta = \frac{\Phi_T}{2\pi\lambda l} \frac{dr}{r} \rightarrow \int_{\theta_1}^{\theta_2} -d\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{\Phi_T}{2\pi\lambda l} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \Phi_T \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

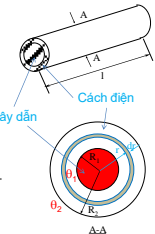
$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Phi_T R_T$$

$\Phi_T = P$  : Nhiệt thông của ống trụ chiều dài  $l$  (chính là  $c/s$  tổn hao  $P$  trong dây dẫn)

$R_T = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{R_2}{R_1}$  : Nhiệt trở của vách trụ chiều dài  $l$  (lớp cách điện)

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

24



Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

- Hoặc xét trên 1 đơn vị chiều dài ống trụ

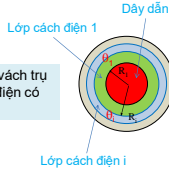
$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Phi_{T,DonVi} \cdot R_{T,DonVi}$$

$$\Phi_{T,DonVi} = \frac{\Phi_T}{l} = \frac{P}{l} : \text{Nhiệt thông trên 1 đơn vị chiều dài ống trụ (chính là c/s tổn hao trên 1 đơn vị chiều dài dây dẫn)}$$

$$R_{T,DonVi} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R_1}{R_2} : \text{Nhiệt trở của 1 đơn vị chiều dài vật trụ (lớp cách điện)}$$

$$R_{T,DonVi} = \frac{1}{2\pi} \sum_i \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} \lambda_i : \text{Nhiệt trở trên 1 đơn vị chiều dài vách trụ}$$

Nếu dây dẫn bọc nhiều lớp cách điện có hệ số dẫn nhiệt  $\lambda_i$ .

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

25

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

- ♦ **Tỏa nhiệt từ bề mặt vật thể phát nóng ra môi trường xung quanh**

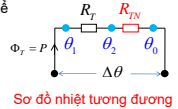
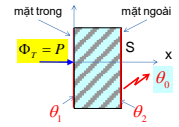
Nhiệt lượng truyền tới mặt ngoài lớp cách điện sẽ tỏa nhiệt ra môi trường xung quanh (có nhiệt độ  $\theta_0$ ) bằng tỏa nhiệt đối lưu, bức xạ theo **phương trình cân bằng nhiệt Newton ở chế độ xác lập**

$$\theta_2 - \theta_0 = \tau_{ad} = \frac{\Phi_T}{k_T S} = \Phi_T R_{TN}$$

$$R_{TN} = \frac{1}{k_T S} : \text{Nhiệt trở ứng với sự tỏa nhiệt từ bề mặt vật thể ra môi trường xung quanh (có nhiệt độ  $\theta_0$ )}$$

$\Phi_T$  : Nhiệt thông trên bề mặt tỏa nhiệt bằng với công suất tổn hao trong vật dẫn điện nếu bỏ qua công suất tổn hao trong cách điện

$k_T$  : Hệ số tỏa nhiệt (do đối lưu, bức xạ)



Sơ đồ nhiệt tương đương

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

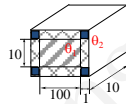
26

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

**VÍ DỤ:** Cho thanh dẫn bằng đồng rất dài có tiết diện chữ nhật 100mm x 10mm. Tổn hao công suất nhiệt Joule trên 1 cm chiều dài của thanh dẫn là 2W. Thanh dẫn được bọc lớp cách điện dày 1mm có hệ số dẫn nhiệt  $\lambda = 0,114 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

Hãy xác định độ tăng nhiệt trên bề dày lớp cách điện nếu bỏ qua tổn hao điện môi trong nó và sự truyền nhiệt qua các phần góc

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

27

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

Vì thanh dẫn dài, đồng nhất và đẳng nhiệt (do hệ số dẫn nhiệt của đồng rất lớn) nên nhiệt lượng không truyền dọc theo thanh dẫn, chỉ truyền theo phương vuông góc với lớp cách điện

- Nhiệt trở trên 1 đơn vị chiều dài lớp cách điện:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda S} = 4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Với:  $\delta = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$  : bề dày lớp cách điện

$$S = [(100+10) \times 2 \times 10^{-3}] \times [10 \times 10^{-3}] = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

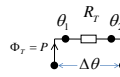
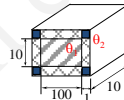
: Tiết diện lớp cách điện mà nhiệt truyền qua

$\lambda = 0,114 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  : Hệ số dẫn nhiệt lớp cách điện

- Độ tăng nhiệt trên bề dày lớp cách điện:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Phi_T \cdot R_T = P \cdot R_T = 2,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- $\theta_1$  : Nhiệt độ mặt trong lớp cách điện chính là nhiệt độ thanh dẫn
- $\theta_2$  : Nhiệt độ mặt ngoài lớp cách điện



Sơ đồ nhiệt tương đương

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

28

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Sự truyền nhiệt của vật thể phát nóng ở chế độ xác lập

Thanh dẫn bọc cách điện ở ví dụ trên được đặt trong môi trường không khí có nhiệt độ môi trường  $40^\circ\text{C}$ , hệ số tỏa nhiệt ra môi trường  $k_T = 15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Xác định nhiệt độ thanh dẫn, nhiệt độ mặt ngoài lớp cách điện

$\theta_0 = 40^\circ\text{C}$  - Nhiệt trở tỏa nhiệt ra môi trường trên 1 đơn vị chiều dài

$$R_{TN} = \frac{1}{k_T S} = \frac{1}{15(2,2 \cdot 10^{-3})} = 30,30 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

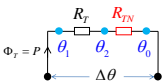
$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0 = \Phi_T (R_T + R_{TN}) = P (R_T + R_{TN})$$

$$= (2)(4 + 30,30) = 68,6^\circ\text{C}$$

- Nhiệt độ thanh dẫn chính là nhiệt độ mặt trong lớp cách điện:

$$\theta_1 = \Delta\theta + \theta_0 = 68,6 + 40 = 108,6^\circ\text{C}$$

- Nhiệt độ mặt ngoài lớp cách điện:

$$\theta_2 = \theta_1 - 8 = 108,6 - 8 = 100,6^\circ\text{C}$$


Sơ đồ nhiệt tương đương

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

29

Chương 2: Hiện tượng phát nóng trên mặt trong chất siêu dẫn

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

- Chế độ làm việc dài hạn.
- Chế độ làm việc ngắn hạn.
- Chế độ làm việc ngắn hạn lặp lại.

- ♦ **Chế độ làm việc dài hạn** : Thời gian làm việc ( $t_w$ ) đủ lớn để nhiệt độ đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau = \tau_{\infty}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ dài để nhiệt độ giảm đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).

- ♦ **Chế độ làm việc ngắn hạn** : Thời gian làm việc ( $t_w$ ) đủ nhỏ để nhiệt độ chưa đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau < \tau_{\infty}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ dài để nhiệt độ giảm đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).

- ♦ **Chế độ làm việc ngắn hạn lặp lại** : Chế độ làm việc có chu kỳ với thời gian chu kỳ  $t_{ck} = t_w + t_{ng}$ . Khoảng thời gian làm việc ( $t_w$ ) đủ nhỏ để nhiệt độ chưa đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau < \tau_{\infty}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ ngắn để nhiệt độ giảm chưa đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

30

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

- Chế độ làm việc dài hạn.
- Chế độ làm việc ngắn hạn.
- Chế độ làm việc ngắn hạn lặp lại.

Tương quan công suất nhiệt (công suất tổn hao, công suất làm việc, dòng điện làm việc của thiết bị điện) ở chế độ ngắn hạn, ngắn hạn lặp lại so với chế độ dài hạn với cùng điều kiện phát nóng cho phép.

→ Có thể tăng c/s ở chế độ ngắn hạn, ngắn hạn lặp lại.

→ Xác định: Hệ số quá công suất, dòng điện của thiết bị điện khi làm việc ở chế độ ngắn hạn, ngắn hạn lặp lại

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

31

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

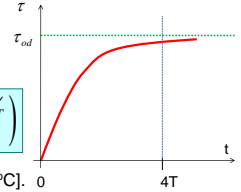
- 1• Chế độ làm việc dài hạn** : Thời gian làm việc ( $t_{lv}$ ) đủ lớn để nhiệt độ đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau = \tau_{od}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ dài để nhiệt độ giảm đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).
- Theo lý thuyết, thời gian làm việc ( $t_{lv}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) là vô cùng
- Thực tế khi  $t = 4T$ :  $\tau|_{t=4T} = \tau_{od}(1 - e^{-4}) \approx 0,982\tau_{od} \approx \tau_{od}$
- sai số tương đối  $\Delta\tau\% < 2$

$T = \frac{C}{k_T S}$  : Hằng số thời gian  
phát nóng [s]

$$\tau = \tau_{od} \left(1 - e^{-t/T}\right)$$

$$\tau_{od} = \frac{P}{k_T S}$$

: Độ tăng nhiệt ổn định [°C].

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

32

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

- 1• Chế độ làm việc dài hạn** : Thời gian làm việc ( $t_{lv}$ ) đủ lớn để nhiệt độ đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau = \tau_{od}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ dài để nhiệt độ giảm đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).
- Theo lý thuyết, thời gian làm việc ( $t_{lv}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) là vô cùng
- Thực tế khi  $t = 4T$ :  $\tau|_{t=4T} = \tau_{od}(1 - e^{-4}) \approx 0,982\tau_{od} \approx \tau_{od}$  sai số tương đối  $\Delta\tau\% < 2$
- Vậy khi  $t_{lv} > 4T$  quá trình nhiệt đã xác lập ổn định → Thiết bị làm việc ở chế độ dài hạn
- Độ chênh nhiệt ổn định được xác định bằng phương trình cân bằng nhiệt Newton

$$\tau_{od} = \frac{P}{k_T S}$$

Để đảm bảo tuổi thọ làm việc của thiết bị điện thì độ chênh nhiệt ổn định  $\tau_{od}$  hay nhiệt độ ổn định  $\theta_{od}$  của thiết bị điện phải nhỏ hơn độ chênh nhiệt hoặc nhiệt độ cho phép của thiết bị điện.

- Nhiệt độ cho phép này thường được quy định bởi nhiệt độ cho phép của vật liệu cách điện sử dụng trong thiết bị điện

Để sử dụng tối ưu hóa các vật liệu trong thiết bị điện, người ta thường thiết kế sao cho nhiệt độ ổn định của thiết bị điện khi làm việc định mức không nhỏ hơn nhiều so với nhiệt độ cho phép của nó (nhiệt độ cho phép của cách điện).

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

33

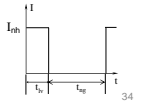
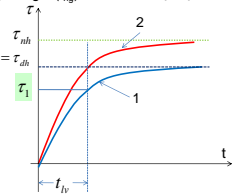
Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

- 2• Chế độ làm việc ngắn hạn** : Thời gian làm việc đủ nhỏ ( $t_{lv} < 4T$ ) để nhiệt độ chưa đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau < \tau_{od}$ ) và thời gian nghỉ ( $t_{ng}$ ) đủ dài để nhiệt độ giảm đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).
- Đường cong 1 là đường cong phát nóng khi thiết bị điện làm việc với dòng điện định mức  $I_{dh}$  ứng với công suất tổn hao dài hạn  $P_{dh}$
- $\tau = \tau_{od}(1 - e^{-t/T}) = \tau_{dh}(1 - e^{-t/T})$  với:  $\tau_{dh} = \frac{P_{dh}}{k_T S}$
- Khi  $t = t_{lv}$  thì  $\tau = \tau_1 < \tau_{od}$  → thiết bị điện làm việc non tải
- Nếu thiết bị điện làm việc ở chế độ ngắn hạn với dòng điện hoặc công suất bằng với dòng điện hoặc công suất dài hạn định mức thì sẽ không tận dụng hết khả năng chịu nhiệt của thiết bị điện
- Đường cong 2 là đường cong phát nóng khi thiết bị điện làm việc với dòng điện ngắn hạn  $I_{nh}$  ứng với công suất tổn hao ngắn hạn  $P_{nh}$

$$\tau = \tau_{nh} \left(1 - e^{-t/T}\right) \quad \text{với: } \tau_{nh} = \frac{P_{nh}}{k_T S}$$

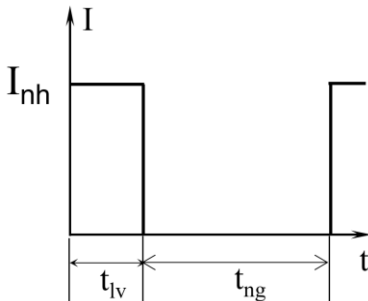
Để sử dụng hết khả năng làm việc của thiết bị điện, ta có thể tăng dòng điện làm việc tới  $I_{nh}$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

34

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

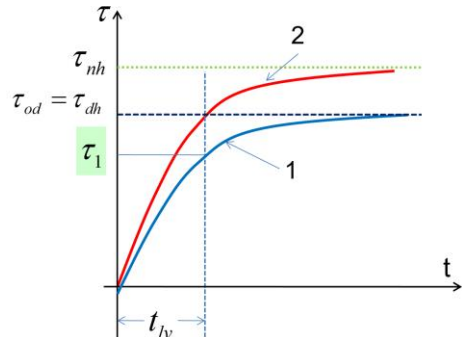
## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

35

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang  
(TCBinh edited 2016)

36

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

Để sử dụng hết khả năng làm việc của thiết bị điện, có thể tăng dòng điện làm việc

$$t = t_{lv} \Rightarrow \tau = \tau_{nh} (1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}) = \tau_{dh}$$

$$\frac{\tau_{nh}}{\tau_{dh}} = \frac{1}{(1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}})} \Rightarrow \frac{I_{nh}}{I_{dh}} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}}}$$

$$\frac{\tau_{nh}}{\tau_{dh}} = \frac{P_{nh}}{P_{dh}} = \frac{I_{nh}^2}{I_{dh}^2} \Rightarrow K_I = \frac{I_{nh}}{I_{dh}} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}}}$$

Hệ số quá tải dòng điện cho phép:

$$K_I = \frac{I_{nh}}{I_{dh}} = \sqrt{\frac{T}{t_{lv}}}$$

Khi  $t_{lv} < T$ 

Hệ số quá tải càng lớn khi thời gian làm việc càng nhỏ và hằng số thời gian phát nóng càng lớn

Ảnh hưởng đến chế độ phát nóng của thiết bị điện, chủ yếu do tổn hao trong dây dẫn điện

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

37

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

**3• Chế độ làm việc ngắn hạn lặp lại:** Chế độ làm việc có chu kỳ với thời gian chu kỳ  $t_{ck} = t_{lv} + t_{ng}$ . Khoảng thời gian làm việc đủ nhỏ ( $t_{lv} < 4T$ ) để nhiệt độ chưa đạt nhiệt độ ổn định ( $\tau < \tau_{od}$ ) và thời gian nghỉ đủ ngắn ( $t_{ng} < 4T$ ) để nhiệt độ giảm chưa đến nhiệt độ môi trường ( $\tau = 0$ ).

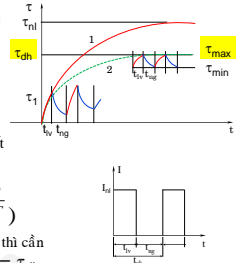
- Đường cong 1 là đường cong phát nóng khi thiết bị điện làm việc với dòng điện ngắn hạn lặp lại  $I_{nl}$  ứng với công suất tổn hao ngắn hạn lặp lại  $P_{nl}$

- Khi số chu kỳ đủ lớn thì độ chênh nhiệt sẽ dao động giữa hai giá trị  $\tau_{max}$  và  $\tau_{min}$  xác lập, đây là **chế độ tự xác lập**

- Đường cong 2 là đường cong phát nóng khi thiết bị điện làm việc với dòng điện định mức dài hạn  $I_{dh}$  ứng với công suất tổn hao dài hạn  $P_{dh}$

$$\tau = \tau_{dh} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = \tau_{od} (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

Để tận dụng hết khả năng chịu nhiệt của thiết bị thì cần tăng dòng điện làm việc đến  $I_{nl}$  sao cho:  $\tau_{max} = \tau_{dh}$



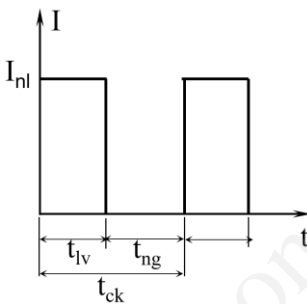
BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

38

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện



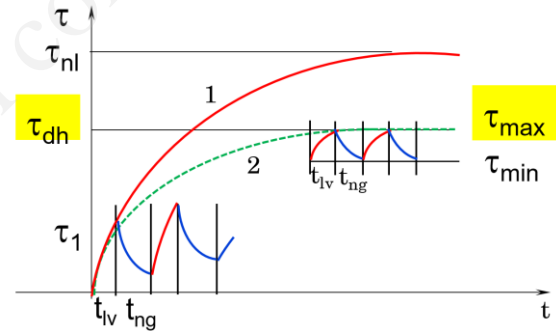
BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

39

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện



BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

40

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

Ở chế độ tự xác lập, ta có:

- Phương trình phát nóng khi  $t = t_{lv}$ :

$$\tau_{max} = \tau_{min} e^{-\frac{t_{lv}}{T}} + \tau_{nl} (1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}})$$

- Phương trình nguội khi  $t = t_{ng}$ :  $\tau_{min} = \tau_{max} e^{-\frac{t_{ng}}{T}}$

Với điều kiện:  $\tau_{max} = \tau_{dh}$ 

$$\tau_{nl} (1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}) = \tau_{max} (1 - e^{-\frac{t_{lv} + t_{ng}}{T}}) = \tau_{dh} (1 - e^{-\frac{t_{ck}}{T}})$$

$$\Rightarrow \frac{\tau_{nl}}{\tau_{dh}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{ck}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}} \text{ Do } \frac{\tau_{nl}}{\tau_{dh}} = \frac{P_{nl}}{P_{dh}} = \frac{I_{nl}^2}{I_{dh}^2} \leftarrow \text{Ảnh hưởng đến chế độ phát nóng của thiết bị điện, chủ yếu do tổn hao trong dây dẫn điện}$$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

41

Chương 2: Hệ thống phát nóng làm mát trong thiết bị điện

## Các chế độ làm việc của thiết bị điện

Hệ số quá tải dòng điện cho phép:

$$K_I = \frac{I_{nl}}{I_{dh}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_{ck}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_{lv}}{T}}}}$$

Khi  $t_{ck} \ll T$  ta có công thức gần đúng:

$$K_I = \frac{I_{nl}}{I_{dh}} = \sqrt{\frac{t_{ck}}{t_{lv}}}$$

Nếu định nghĩa hệ số tiếp điện:

$$TL\% = \frac{t_{lv}}{t_{ck}} 100 \Rightarrow K_I = \sqrt{\frac{100}{TL\%}}$$

BMTBĐ-BĐNLĐC-PV/Lang

(TCBinh edited 2016)

42