

# ХАРАКТЕР ДІЇ СТОРОННІХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ НА ТЕПЛОВУ РІВНОВАГУ І ПРОБИВНУ НАПРУГУ ДІЕЛЕКТРИКА

**Вожаков Р.В., асистент**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** Теорія теплового пробою – це теорія порушення теплової рівноваги між виділенням тепла в діелектрику і його відведенням в навколишнє середовище. Однак дуже часто електрична ізоляція додатково підігривається сторонніми джерелами теплоти (втрати в струмоведучих частинах, магнітопроводах, тощо), під дією яких відбувається додаткове нагрівання діелектрика, що може призвести до порушення теплової рівноваги, теплового руйнування і електротеплового пробою. [1-3].

**Мета роботи.** Провести аналіз впливу сторонніх джерел тепла на теплову рівновагу і напругу, що призводить до теплового пробою діелектрика.

**Матеріали і результати досліджень.**

Рівняння теплової рівноваги електричної ізоляції має вигляд:

$$P_d = Q, \quad (1)$$

де  $P_d$  – діелектричні втрати на електропровідність;  $Q$  – теплота, що відводиться в навколишнє середовище згідно закону Ньютона.

Діелектричні втрати на електропровідність можна апроксимувати дещо спрощеним виразом, що справедливий у вузькому інтервалі температур, але дає можливість спростити розгляд,

$$P_d = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_0 \exp(a(t^\circ - t_0^\circ)),$$

а відведену в навколишнє середовище теплоту

$$Q = \alpha_t S_n (t_n^\circ - t_{nc}^\circ), \quad (2)$$

де  $\alpha_t$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні діелектрика;  $S_n$  – площа поверхні діелектрика;  $t_n^\circ$  – її температура;  $t^\circ$  – температура діелектрика;  $t_0^\circ$  – температура, при якій визначався  $\operatorname{tg} \delta_0$ ;  $t_{nc}^\circ$  – температура навколишнього середовища.

Обидва вирази, які відрізняються температурами, можна звести до одних змінних. Оскільки,  $t_0^\circ$  – температура, при якій визначався  $\operatorname{tg} \delta_0$ , а  $t_{nc}^\circ$  – температура навколишнього середовища, то можна домовитися, що початкові діелектричні втрати беруться при умові, що  $t_0^\circ = t_{nc}^\circ$ . Ніяких обмежень на теорію, крім узгодження вибору температур, при яких береться значення  $\operatorname{tg} \delta_0$ , це не накладає. Дещо складніше з температурами  $t_n^\circ$  і  $t^\circ$ , якщо їх прирівняти, то нехтується перепад температур в об'ємі діелектрика і дещо завищується  $U_{np}$ ,

але на це доводиться йти, щоб отримати систему двох рівнянь з двома невідомими, і тому приймається  $t_n^{\circ} = t^{\circ}$ .

З врахуванням прийнятих наближень вирази для  $P_d$  і  $Q$  мають вигляд:

$$P_d = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_{nc} \exp(a(t_n^{\circ} - t_{nc}^{\circ})), \quad (3)$$

Графіки цих характеристик зображені на рис. 1. Діелектричні втрати  $P_d$  показані для трьох напруг – докритичної, критичної і закритичної. При докритичній напрузі крива  $P_d$  перетинається з прямою  $Q$ , що характеризує відведення теплоти в навколишнє середовище, в двох точках стійкої і нестійкої рівноваги  $t_{pc}^{\circ}$  і  $t_{pn}^{\circ}$ , де  $P_d = Q$ .

Якщо діелектрик буде тимчасово перегрітий до більш високої температури, ніж температура стійкої рівноваги, не за рахунок діелектричних втрат, а зовнішніми джерелами теплоти  $P_s$ , наприклад, за рахунок джоулевих втрат в обмотці, то при припиненні їх дії температура знову повернеться в точку  $t_{pc}^{\circ}$ . Якщо ж температура перейде через точку  $t_{pn}^{\circ}$ , то почнеться неконтрольоване розігрівання і відбудеться тепловий пробій діелектрика

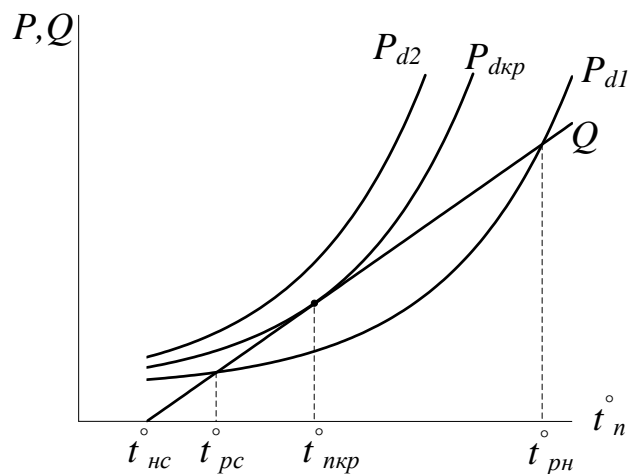


Рисунок 1 – Залежність тепловиділення і тепловіддачі від температури

При підвищенні напруги точки рівноваги зближуються і в критичному режимі зливаються в одну невідому критичну температуру  $t_{nkp}^{\circ}$ . Таким чином, в критичному режимі є тільки одна точка теплової рівноваги, і саме цей режим вважається таким, що відповідає пробою. Відповідно, напруга, що відповідає критичному режиму, є найменшою напругою, що викликає пробій, тобто є пробивною напругою діелектрика за визначенням. В закритичному режимі завжди буде спостерігатися тільки необмежене розігрівання діелектрика і його пробій першого, другого чи третього роду [1].

Отже, виходячи з теоретичних припущень, надлишкове нагрівання від зовнішніх джерел теплоти може призвести до порушення теплової рівноваги (теплового пробую) і зменшення пробивної напруги діелектрика. А така ситуація на практиці зустрічається досить часто, наприклад, ізоляція кабелю підігрівається внаслідок протікання струму по жилі, ізоляція статорної обмотки обертових електричних машин нагрівається струмом обмотки тощо.

Для врахування сторонніх джерел енергії в ліву частину формули (1) додамо незалежне джерело потужності  $P_s$ , що підігріває діелектрик.

$$P_d + P_S = Q.$$

Або з врахуванням (2) і (3):

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta_{nc} \exp(a(t_n^\circ - t_{nc}^\circ)) + P_S = \alpha_t S_n (t_n^\circ - t_{nc}^\circ).$$

Для знаходження двох невідомих величин  $t_{нкp}^\circ$  і  $U_{np}$  ( $P_{dkp}$ ) потрібно два рівняння. Перше з них відповідає умові критичної рівноваги  $P_{dkp} + P_S = Q_{kp}$ , а друге випливає з того факту, що пряма  $Q_{kp}$  в критичному режимі є дотичною до кривої  $P_{dkp} + P_S$ .

Таким чином, маємо систему двох нелінійних рівнянь з двома невідомими, яка має як рішення пробивну напругу  $U_{np}$  ( $P_{dkp}$ ), якій відповідає критична поверхнева температура  $t_{нкp}^\circ$

$$\begin{cases} P_{dkp} + P_S = \alpha_t S_n (t_{нкp}^\circ - t_{nc}^\circ) \\ a P_{dkp} = \alpha_t S_n \end{cases}, \quad (4)$$

З другого рівняння виразимо  $P_{dkp}$  і підставивши це значення в перше рівняння знайдемо вираз для  $t_{нкp}^\circ$ :

$$t_{нкp}^\circ = t_{nc}^\circ + \frac{1}{a} + \frac{P_S}{\alpha_t S_n}. \quad (5)$$

Що дає змогу, використавши формулу (4), отримати вираз для  $U_{np}$ :

$$U_{np0} = \sqrt{\frac{\alpha_t S_n}{ea\omega C \operatorname{tg} \delta_{nc}} \exp\left(-\frac{aP_S}{\alpha_t S_n}\right)} = U_{np0} \exp\left(-\frac{aP_S}{2\alpha_t S_n}\right), \quad (6)$$

де  $U_{np0} = \sqrt{\frac{\alpha_t S_n}{ea\omega C \operatorname{tg} \delta_{nc}}}$  – значення пробивної напруги при  $P_S = 0$ .

Як бачимо, значення  $U_{np}$  експоненційно знижується в залежності від потужності сторонніх джерел теплоти, яка, в свою чергу, визначається режимними параметрами, такими як навантаження струмоведучої чи активної частини. Це пояснює аварії на виробництві у відсутності суттєвих перенапружень в ізоляції. Вплив сторонніх джерел тепла на режим теплової рівноваги показано на рис. 2.

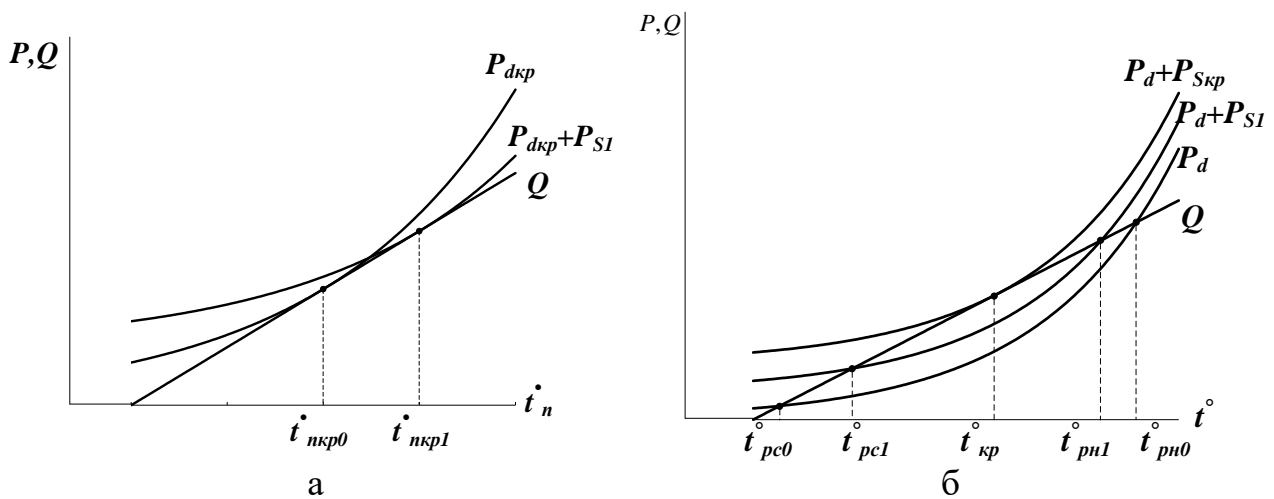


Рисунок 2 – Вплив сторонніх джерел тепла на режим теплової рівноваги діелектрика (а – критичний режим, б – нормальний режим)

Згідно (4) найменше значення діелектричних втрат, що призведуть до теплового пробою даного діелектрика в даних умовах охолодження і в рамках даного наближення не залежить від потужності сторонніх джерел теплоти і завжди дорівнює  $\alpha_t S_n / a$ . Однак, при наявності сторонніх джерел теплоти, згідно формул (5) і (6), критичний режим характеризується більшою температурою поверхні діелектрика і меншим значенням пробивної напруги (рис. 2.а). Так, при  $a = 0,01 \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_t = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ,  $S_n = 0,5 \text{ м}^2$ , наявність 50 Вт  $P_S$  призведе до збільшення температури поверхні на  $10^\circ$  і зменшення пробивної напруги на 5%.

Крім того, в недавніх навчальних виданнях [2, 3] зазначалось, що теплова рівновага ізоляційної конструкції може бути порушена, якщо випадкові сторонні джерела тепла підвищують температуру діелектрика до значення  $t_{pn}^\circ$  (рис. 1). Але при цьому, автори не враховували, що при нагріванні діелектрика відбувається перерозподіл втрат між діелектричними втратами і сторонніми джерелами теплоти. Крім того, з рис. 2.б видно, що наявність сторонніх джерел тепла призведе до порушення теплової рівноваги раніше, ніж діелектрик досягне точки нестійкої рівноваги, відповідної режиму при  $P_S = 0$ .

**Висновки.** Тепловий пробій навіть при наявності сторонніх джерел теплоти можливий тільки при умові, що має місце критичний режим: пряма тепловіддачі дотична до кривої діелектричних втрат.

#### Перелік посилань

1. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків:НТУ "ХП" – Торнадо, 2005. – 930 с.
2. Колесов С. Н., Колесов И. С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 535с.
3. Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. Конструкційні та функціональні матеріали: Навч. посібник: У 2 ч. – Ч. 1: Основи фізики твердого тіла. Конструкційні матеріали. – К.: Техніка, 2003. – 244 с.