

ВПЛИВ СТОРОННІХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА СТІЙКІСТЬ І ПРОБИВНУ НАПРУГУ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЇ ПІД ЧАС ЇЇ ТЕПЛОВОГО ПРОБОЮ

Р.В. Вожаков^{*}, В.М. Кириленко^{**}, канд. техн. наук

НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: vozhakovr@fea.kpi.ua

Стаття присвячена аналізу теплового пробою ізоляції електротехнічного та електроенергетичного обладнання внаслідок порушення її теплової рівноваги. Аналіз проводився в рамках найпростішої моделі теплового пробою за ігноруванням розподілу температури в об'ємі ізоляції. Особлива увага приділяється впливу сторонніх джерел теплової енергії на теплову стійкість та пробивну напругу електроізоляційної конструкції. З рівняння теплової рівноваги і умови порушення теплового балансу між сумарною тепловою потужністю в ізоляції і тепловою потужністю, що віддається в навколишнє середовище, знайдено аналітичні вирази, що враховують вплив сторонніх джерел теплової енергії на критичну робочу температуру та пробивну напругу ізоляції. Проаналізовано вплив сторонніх джерел теплової енергії на залежність пробивної напруги від параметрів діелектрика і режиму охолодження. Показано, що пробивна напруга ізоляції експоненціально зменшується зі збільшенням потужності сторонніх джерел теплоти і температурного коефіцієнта $\text{tg}\delta$, а також погіршенням умов тепловіддачі. Встановлено, що критичні діелектричні втрати в ізоляції, що приводять до пробою, не залежать від потужності сторонніх джерел теплової енергії. Запропоновано задля забезпечення стійкості ізоляції до теплового пробою за наявності сторонніх джерел теплової енергії збільшувати коефіцієнт запасу по електричній міцності ізоляції відносно її робочої напруги, враховуючи потужність сторонніх джерел теплоти. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: тепловий пробій ізоляції електрообладнання, сторонні джерела теплової енергії, пробивна напруга, критична температура, критичні діелектричні втрати, тепла стійкість, допустима потужність сторонніх джерел теплоти, коефіцієнт запасу ізоляції по електричній міцності.

Вступ. У загальному випадку під час визначення можливості відмови електрообладнання розглядають в тому числі і вплив внутрішніх і зовнішніх факторів на тепловий стан його ізоляції, оскільки це один з найважливіших елементів, що безпосередньо визначають працездатність обладнання в цілому. Найбільш суттєвий вплив на характеристики високовольтної ізоляції електротехнічних пристроїв має теплове старіння, що приводить до прискореного спрацювання ресурсу, а у разі зістареної ізоляції чи аномальних режимів роботи обладнання і до теплового пробою, пов'язаного з порушенням теплової рівноваги між діелектричними втратами в електричній ізоляції і тепловіддачею в навколишнє середовище [1].

Для діелектричних матеріалів, що використовуються для ізоляції, причиною теплового пробою є експоненціальне зростання діелектричних втрат на електропровідність в залежності від температури. Крім того, необхідно враховувати, що в реальних конструкціях електрично навантажений діелектрик часто знаходиться поряд зі стороннім джерелом теплової енергії (струмопровідна жила, обмотка, активна сталь, активний елемент, тощо) і, крім виділення теплоти від діелектричних втрат, через ізоляцію проходить певна кількість теплової енергії від сторонніх джерел теплоти (СДТ). Ця додаткова тепла енергія призводить до підвищення температури і додаткового нелінійного і неадитивного нагрівання (через експоненціальну залежність діелектричних втрат від температури) і підвищує імовірність порушення теплової рівноваги і виникнення теплового пробою.

Існує узагальнена теорія теплового пробою діелектриків, де на основі диференційного рівняння теплопровідності, яке описує тепловий режим ізоляції, знайдено вираз для пробивної напруги з врахуванням несиметричних умов охолодження, тепловідлення в електродах і зміни питомої активної провідності по товщині зразка [2]. Однак вплив різних факторів на пробивну напругу враховано інтегрально шляхом використання проміжних функцій, які будуються для певного набору умов роботи електричної ізоляції, тому проаналізувати вплив СДТ на пробивну напругу (критичний режим) складно і ресурсовитратно.

В роботі [3] з використанням чисельних методів і диференційного рівняння теплопровідності побудовано математичну модель усталеного теплового режиму діелектрика, яка дає можливість побудувати розподіл температури по товщині діелектрика в граничному для теплової стійкості режимі, і, таким чи-

ном, оцінити наявний запас по тепловій стійкості ізоляції електрообладнання. Під час аналізу даної моделі показано, що за фіксованої напруги, змінюючи температуру діелектрика, можна наблизитися до критичного теплового режиму і теплового пробою. Іншими словами, за зміни температури робоча напруга може стати пробивною. Проте як причини зміни теплового режиму розглядалась тільки зміна температури поверхні діелектрика, що охолоджується навколишнім середовищем, і не враховувалися конкретно СДТ, які можуть суттєво вплинути на усталений тепловий режим роботи діелектрика.

Розрахунки усталених [4, 5, 6], і, навіть, нестационарних [7, 8] теплових режимів ізоляції електрообладнання, що ставлять за мету знайти перепад температур на шарі ізоляції, враховуючи, в тому числі, і тепловий потік від активних елементів (СДТ), дають можливість зробити висновок щодо теплової стійкості електроізоляційної конструкції, однак, не дають однозначної кількісної відповіді на питання щодо запасу теплової стійкості електрообладнання.

Таким чином, питання впливу СДТ на теплову стійкість ізоляції і її пробивну напругу потребує подальшого вивчення і конкретизації отриманих результатів.

Мета роботи. Провести аналіз впливу СДТ на теплову рівновагу і пробивну напругу ізоляції, визначити допустиму потужність сторонніх джерел теплової енергії, що призведе за робочій напругі до теплового пробою ізоляції електротехнічного обладнання і запропонувати методику врахування впливу СДТ на пробивну напругу під час вибору робочої напруги ізоляції.

Матеріали і результати досліджень. Виходячи з теоретичних припущень, надлишкове додаткове нагрівання ізоляції від зовнішніх джерел теплоти може призвести до порушення теплової рівноваги (теплового пробою) і зменшення її пробивної напруги. Відзначимо, що така ситуація на практиці зустрічається досить часто, наприклад, ізоляція кабелю підігривається внаслідок протікання струму по жилі, ізоляція статорної обмотки обертових електричних машин нагрівається струмом обмотки і т. інш.

Рівняння теплової рівноваги електричної ізоляції за наявності додаткового нагрівання від СДТ має вигляд

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

де P_d – діелектричні втрати на електропровідність; P_S – потужність СДТ; Q – теплота, що відводиться в навколишнє середовище згідно з законом Ньютона.

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

$$P_d = U^2 \omega C t g \delta_0 \exp \left[a (t^\circ - t_0^\circ) \right], \quad (2)$$

де U – робоча напруга; ω – кругова частота; C – ємність ізоляції; $t g \delta_0$ – тангенс кута діелектричних втрат за температури t_0° ; a – температурний коефіцієнт $t g \delta$; t° – температура діелектрика; t_0° – температура, за якою визначався $t g \delta_0$.

А відведена в навколишнє середовище теплота згідно з законом Ньютона

$$Q = \alpha_t S_n (t_n^\circ - t_{nc}^\circ), \quad (3)$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні діелектрика; S_n – площа поверхні діелектрика; t_n° – її температура; t_{nc}° – температура навколишнього середовища.

Обидва вирази, які відрізняються температурами, можна звести до одних змінних, якщо домовитися, що початкові діелектричні втрати беруться за умови, що $t_0^\circ = t_{nc}^\circ$. Ніяких обмежень, крім узгодження вибору температур, за яких береться значення $t g \delta_0$, це не накладає. Дещо складніше з температурами t_n° і t° . 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 $t_n^\circ = t^\circ$. Тоді рівняння теплового балансу (1) з врахуванням прийнятих припущень та формул (2) і (3) прийме вигляд

$$U^2 \omega C t g \delta_{nc} \exp(a(t_n^\circ - t_{nc}^\circ)) + P_S = \alpha_t S_n (t_n^\circ - t_{nc}^\circ). \quad (4)$$

Це рівняння дає змогу проаналізувати вплив потужності СДТ на температуру поверхні ізоляції за різних значень робочої напруги і збереженні балансу між тепловиділенням і тепловіддачею (рис. 1). Слід відзначити, що внаслідок температурної залежності P_d , збільшення P_S і, відповідно, додаткове нагрівання ізоляції приводить замість лінійного підвищення даної температури за дії однієї тільки P_S до нелінійного зростання температури поверхні ізоляції (особливо у разі наближення до критичного режиму). Показовим також є те, що за зміни робочої напруги критична температура поверхні змінюється за лінійним законом від потужності СДТ, що призводить до даного критичного режиму.

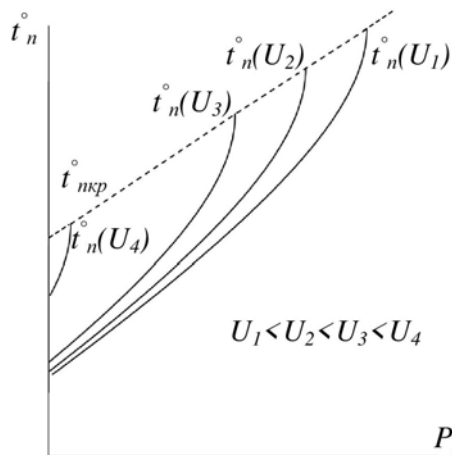


Рис. 1

Критичний режим, що передує порушенню теплової рівноваги і, відповідно, тепловому пробою, характеризується двома параметрами: критичною температурою і критичною напругою. Задля знаходження цих двох невідомих величин t_{nkp}° і U_{np} 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 в критичному режимі є дотичною до кривої $P_{dkp} + P_S$, тобто $\frac{d}{dt_n}(P_{dkp} + P_S) = \frac{dQ}{dt_n}$.

Маємо систему двох нелінійних відносно температури і напруги рівнянь з двома невідомими

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

яка має як рішення критичну поверхневу температуру t_{nkp}° і пробивну напругу U_{np} .

З другого рівняння виразимо P_{dkp}

$$P_{dkp} = \alpha_t S_n a^{-1}. \quad (5)$$

Підставивши це значення в перше рівняння системи, знайдемо вираз для t_{nkp}°

$$t_{nkp}^{\circ} = t_{nc}^{\circ} + a^{-1} + P_S (\alpha_t S_n)^{-1}, \quad (6)$$

що дає змогу, використавши формулу (4), отримати вираз для U_{np}

$$U_{np} = \sqrt{\frac{\alpha_t S_n}{ea\omega Ctg\delta_{nc}}} \exp\left(-\frac{aP_S}{\alpha_t S_n}\right) = U_{np0} \cdot k_{P_S}, \quad (7)$$

де $U_{np0} = \sqrt{\frac{\alpha_t S_n}{ea\omega Ctg\delta_{nc}}}$ – пробивна напруга за $P_S = 0$, $k_{P_S} = \exp\left(-\frac{aP_S}{2\alpha_t S_n}\right)$ – коефіцієнт впливу P_S .

Як бачимо, значення U_{np} експоненційно знижується в залежності від потужності СДТ, яка, в свою чергу, визначається режимними параметрами такими, як навантаження струмоведучої чи активної частини. Встановлена закономірність може бути використана для пояснення аварій на виробництві у відсутності суттєвих перенапружень в ізоляції.

Вплив СДТ на режим теплової рівноваги проілюстровано на рис. 2.

Згідно (5) найменше значення діелектричних втрат, що призведе до теплового пробою даного діелектрика в даних умовах охолодження, не залежать від потужності СДТ та завжди дорівнює $\alpha_t S_n / a$. Однак додаткові СДТ підвищують температуру поверхні діелектрика. І з формули (2) легко побачити, що задане значення $P_{dkp} = \text{const}$ за збільшеної температури поверхні досягається за меншого значення $U^2 \omega Ctg\delta_0$, тобто за меншої напруги. Це також ілюструють рис. 2, а та формули (6) і (7) – за наявності СДТ критичний режим ізоляції характеризується більшою температурою поверхні діелектрика і меншим значенням пробивної напруги. Так, за $a = 0,01 \text{ К}^{-1}$, $\alpha_t = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $S_n = 0,5 \text{ м}^2$, наявність 50 Вт P_S призведе до збільшення температури поверхні на 10°C і зменшення пробивної напруги на 5%.

У роботах [9, 10] зазначалося, що тепла рівновага ізоляційної конструкції може бути порушена, якщо випадкові СДТ підвищують температуру діелектрика до значення $t_{pн0}$ (рис. 2, б), а за нижчих температур задана робоча напруга буде безпечна і не призведе до пробою. Але при цьому автори не враховували, що під час нагрівання діелектрика за рахунок діелектричних втрат і СДТ граничним випадком, коли рівняння (1) матиме розв'язки, буде режим, коли пряма тепловіддачі буде дотичною до кривої тепловиділення. З рис. 2, б видно, що наявність СДТ призведе до порушення теплової рівноваги раніше, ніж діелектрик досягне точки нестійкої рівноваги, відповідної режиму за $P_S = 0$. Таким

чином, формула з [9] $U_{np} = \sqrt{\alpha_t S_n (t_{kp}^{\circ} - t_{pн0}^{\circ}) (\omega Ctg\delta_{kp})^{-1}}$, де $t_{kp}^{\circ} = t_{pн0}^{\circ}$, не може бути використана задля розрахунку пробивної напруги через те, що СДТ не можуть розігріти ізоляцію до температур, вищих t_{kp}° , що відповідає дійсно критичній температурі, за який температури стійкої і нестійкої рівноваги співпадають і яка визначається критичними значеннями діелектричних втрат, потужності СДТ і умов охолодження. Крім того, невірним є твердження, яке закріпилося в літературі, щодо того, що

$tg\delta$ в знаменнику формули відповідає критичній температурі. Насправді, пробивна напруга в прийнятому наближенні залежить, як не парадоксально, від $tg\delta_{nc}$, тобто $tg\delta$ за температури навколишнього середовища, і це потрібно враховувати під час оцінки її значення. Відзначимо, що за відсутності СДТ критична температура поверхні діелектрика та температура навколишнього середовища відрізняються на сталу величину, а у разі дії СДТ на діелектрик різниця між ними залежить ще й від потужності цих джерел.

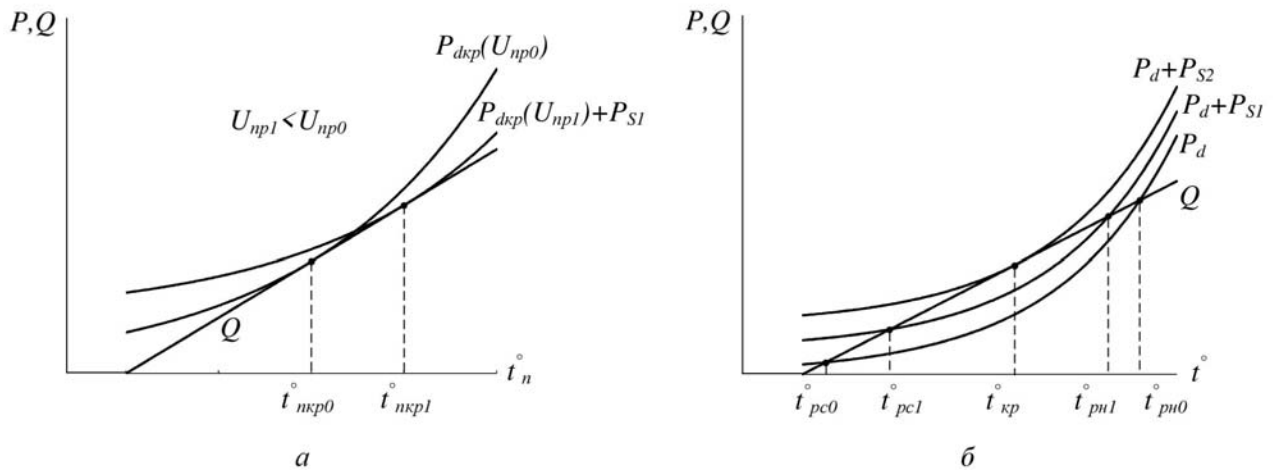


Рис. 2

Слід відзначити, що залежність U_{np} від умов тепловіддачі у разі теплового пробою приводить до того, що ні E_{np} , ні U_{np} не є характеристиками діелектрика чи конструкції, як у пробі в газах, бо вони залежать від коефіцієнта тепловіддачі в навколишнє середовище з поверхні діелектрика, який за допомогою примусової вентиляції можна підвищити шестикратно, а значить, теоретично є можливість підвищити U_{np} і E_{np} у 2 – 2,5 рази без будь-яких змін електроізоляційної конструкції за рахунок інтенсифікації процесу охолодження.

Вплив умов охолодження і температурного коефіцієнта $tg\delta$ на пробивну напругу за наявності СДТ згідно (7) проілюстровано на рис. 3, а і б. За вихідні данні використано значення: $\omega=314$ Гц, $C=45$ пФ, $tg\delta_{nc}=10^{-3}$, $a=10^{-3}$ К $^{-1}$, $\alpha_t=10$ Вт/(м 2 ·К), $S_n=0,002$ м 2 . Наявність СДТ змінює ступінь впливу параметрів електричної ізоляції на її пробивну напругу (нахил кривих на рис. 3), хоча самі ці сторонні джерела впливають на U_{np} опосередковано, через зміну параметрів діелектрика у разі додаткового нагрівання. Як видно з рис. 3, а, 50 Вт сторонньої додаткової теплоти за поганих умов охолодження приведе до того, що U_{np} зменшиться на порядок. Чим кращими стануть умови охолодження, тим менше впливатимуть СДТ на пробивну напругу. Це пояснюється тим, що за поганих умов охолодження додаткова тепла потужність призводитиме до більш інтенсивного нагрівання ізоляційної конструкції. Чим слабкіше діелектричні втрати залежать від температури діелектрика, тим слабкіше буде вплив додаткового нагріву від СДТ на U_{np} (рис. 3, б).

Задля визначення критичної потужності СДТ, яка має пройти крізь ізоляцію електрообладнання, щоб задана робоча напруга стала пробивною скористаємося формулою (7). Перенесемо в праву частину P_S та підставимо замість U_{np} робочу напругу U

$$P_{Skp} = \frac{\alpha_t S_n}{a} \left(\ln \frac{\alpha_t S_n}{a U^2 \omega C t g \delta_{nc}} - 1 \right).$$

Підставивши це значення в (6), отримуємо критичну температуру поверхні, до якої можуть нагріти ізоляцію електрообладнання СДТ без порушення теплової рівноваги (без виникнення теплового пробою) за заданим режимом роботи

$$t_{nkr}^{\circ} = t_{nc}^{\circ} + \frac{1}{a} \ln \frac{\alpha_t S_n}{a U^2 \omega C t g \delta_{nc}}.$$

Отже, критична потужність СДТ, яку може пропустити через себе ізоляція електрообладнання, і температура, до якої можуть нагріти ізоляцію без наслідків сторонні джерела, залежить від умов охолодження, характеристик ізоляційної конструкції, частоти та величини робочої напруги обладнання. Задля більш об'єктивного підходу до вибору режиму експлуатації електротехнічного об-

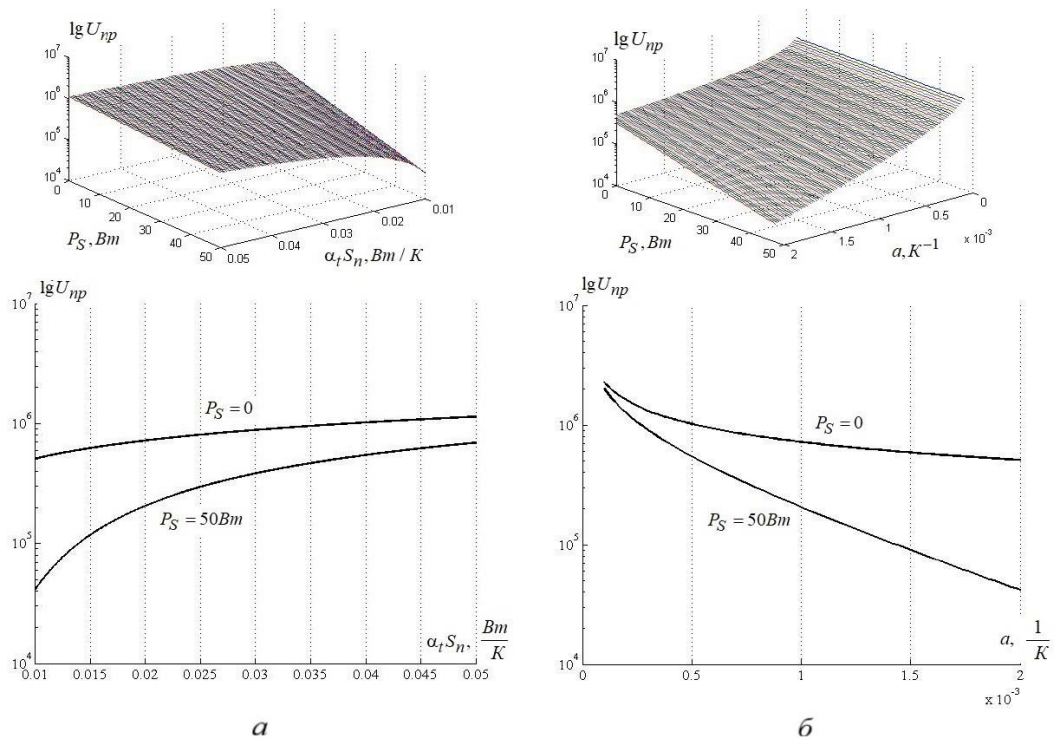


Рис. 3

ладнання можна ввести сталу потужності СДТ, що дорівнює подвоєній потужності критичних діелектричних втрат і визначається тільки температурним коефіцієнтом $tg\delta - P_{S0} = 2\alpha_t S_n a^{-1}$.

Використовуючи цю сталу і значення пробивної напруги за $P_S = 0$ з формули (7), можна розрахувати допустиму потужність СДТ, яку може витримати ізоляція за робочої напруги $U_{роб}$

$$P_{S\text{дон}} = P_{S0} \ln(U_{np0} / U_{роб}) \cdot$$

Знання допустимої потужності СДТ дає змогу правильно враховувати струмове навантаження, а також розраховувати системи охолодження електрообладнання задля забезпечення його надійної роботи. Якщо під час вибору робочої напруги ізоляції використовується коефіцієнт запасу k_z по відношенню до пробивної напруги U_{np0} , то можна рекомендувати для врахування впливу СДТ на пробивну напругу збільшити його в k_{P_S} раз, що забезпечить таку саму надійність, яку матиме ізоляція, на яку не діють СДТ.

Висновки. 1. Тепловий пробій навіть за наявності СДТ можливий тільки за умови, що має місце критичний режим роботи: пряма тепловіддачі дотична до кривої діелектричних втрат.

2. Граничні діелектричні втрати, за яких спостерігається порушення теплової рівноваги (тепловий пробій), не залежать від діелектричних властивостей ізоляції і наявності СДТ, а тільки від умов охолодження і температурного коефіцієнта $tg\delta$.

3. Наявність СДТ призводить до того, що граничні діелектричні втрати і, відповідно, порушення теплової стійкості спостерігаються в ізоляції електрообладнання за меншого значення напруги і більшого значення температури.

4. Наявність СДТ призводить до посилення впливу температурного коефіцієнта $tg\delta$ та умов охолодження на значення пробивної напруги ізоляції електрообладнання.

5. Задля надійної експлуатації електрообладнання авторами пропонується задля врахування впливу СДТ, якщо вони мають місце, на пробивну напругу ізоляції збільшувати коефіцієнт запасу по електричній міцності в k_{P_S} раз і використовувати його у розрахунках робочої напруги ізоляції електрообладнання.

1. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В., Михайлов В.М., Набока Б.Г. Техніка і електрофізика високих напруг. Харків: Торнадо, 2005. 930 с.

2. Койков С.Н., Цикин А.Н. Обобщение теории теплового пробоя твердых диэлектриков с учетом несимметричных условий охлаждения, тепловыделения в электродах и изменения активной проводимости по толщине образца. В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников. М.-Л.: Энергия, 1964. С. 277-284.

3. Зарубин В.С., Савельева И.Ю., Станкевич И.В. Температурное состояние плоского слоя полимерного диэлектрика с зависящей от температуры теплопроводностью. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2018. № 4. С. 14-23. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>
4. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. М.: Энергоиздат, 1981. 392 с.
5. Кириленко В.М., Чан Ван Тхань. Тепловой пробой диэлектриков и полупроводников при наличии сторонних источников тепла. *Электроника и связь*. 1999. Т. 1. № 6. С. 63-68.
6. Вожаков Р.В., Кириленко В.М. Розподіл усталеної температури в ізоляції циліндричної форми при наявності сторонніх джерел теплоти. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4. С. 98-104. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175644>
7. Кириленко В.М., Чан Ван Тхань. Распределение температуры в электротехническом материале при экспоненциально зависящем от температуры тепловыделении. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Електроенергетика*. 1999. № 2. С. 200-205.
8. Зализный Д.И., Новиков М.Н., Ходанович Н.М., Шутов А.Ю. Методика численного расчета нестационарных тепловых процессов в изоляции силового кабеля. *Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. 2010. № 4. С.86-95.
9. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство. Київ: Дельта, 2008. 516 с.
10. Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. Конструкційні та функціональні матеріали. Ч. 1. Основи фізики твердого тіла. Конструкційні матеріали. Київ: Техніка, 2003. 344 с.

THE INFLUENCE OF EXTRANEIOUS SOURCES OF THERMAL ENERGY ON THERMAL STABILITY AND BREAKDOWN VOLTAGE OF ELECTRICAL INSULATION DURING ITS THERMAL BREAKDOWN

R. Vozhakov, V. Kyrylenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: vozhakovr@fea.kpi.ua

The article is devoted to the analysis of thermal breakdown of insulation of electrical and power equipment due to disturbance of its thermal balance. The analysis was performed within the simplest model of thermal breakdown while ignoring the temperature distribution in the insulation volume. Particular attention is paid to the influence of extraneous sources of thermal energy on the thermal stability and the breakdown voltage of the electrical insulation structure. From the heat balance equation and the condition of thermal balance disturbance between the total thermal power in the insulation and the heat transferred into the surroundings, have been found analytical expressions that take into account the influence of extraneous sources of thermal energy on the critical operating temperature and the breakdown voltage of the insulation. The influence of extraneous sources of thermal energy on the dependence of the breakdown voltage on the dielectric parameters and the cooling conditions was analyzed. It is shown that the breakdown voltage of the insulation decreases exponentially with the increase of the power of extraneous heat sources and the temperature coefficient of $\text{tg}\delta$, as well as the deterioration of the heat transfer conditions. It is established that the critical dielectric losses in the insulation leading to the breakdown do not depend on the power of extraneous sources of thermal energy. It is proposed to increase the electrical insulation safety factor for breakdown strength related to its operating voltage, taking into account the extraneous sources of heat, to ensure the stability of insulation against thermal breakdown in the presence of extraneous sources of thermal energy. References 10, figures 3.

Keywords: thermal breakdown of electrical equipment insulation, extraneous heat sources, breakdown voltage, critical temperature, critical dielectric losses, thermal stability, allowable power of extraneous heat sources, electrical insulation safety factor for breakdown strength.

1. Brzhezitsky V.O., Isakova A.V., Rudakov V.V High voltage engineering and electrophysics. Kharkiv: Tornado, 2005. 930 p. (Ukr)
2. Koykov S.N., Tsikin F.N. Generalization of the theory of thermal breakdown of solid dielectrics taking into account asymmetric cooling conditions, heat generation in electrodes and changes in the active conductivity through the specimen thickness. In: Dielectric and semiconductor breakdown, Moskva-Leningrad: Energiyi. 1964. Pp. 277-284. (Rus)
3. Zarubin V.S., Savelyeva I.Yu., Stankevich I.V. The temperature state of a plane polymer dielectric layer with temperature-dependent heat conduction. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni Baumana, Seriya Estestvennye nauki*. 2018. No 4. Pp. 14-23. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>
4. Dmitriyevskiy V.S. Calculation and designing of electrical insulation. Moskva: Energoizdat, 1981. 392 p. (Rus)
5. Kyrylenko V.M., Chan Van Tkhan Thermal breakdown of dielectrics and semiconductors in the presence of extraneous heat sources. *Elektronika i sviaz*. 1999. Vol. 1. No 6. Pp. 63-68. (Rus)
6. Vozhakov R.V., Kyrylenko V.M. Sustained temperature distribution in cylindrical insulation in the presence of extraneous sources of heat. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2018. No 4. Pp. 98-104. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175644>
7. Kyrylenko V.M., Chan Van Tkhan Temperature distribution in the electrotechnological material with calorification exponentially depended on temperature. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. Elektroenergetyka*. 1999. No. 2. Pp. 200-205. (Rus)
8. Zaliznyy D.I., Novikov M.N., Khodanovich N.M., Shutov A.Yu. Method of numerical calculation of non-stationary heat processes in the insulation of a power cable. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*. 2010. No 4. Pp. 86-95. (Rus)
9. Kolesov S.M., Kolesov I.S. Electrical materials science. Kyiv: Delta, 2008. 516 p. (Ukr)
10. Babak V.P., Baisa D.F., Rizak V.M., Filonenko S.F. Constructional and functional materials. At 2 parts, Part 1: Fundamentals of solid state physics. Construction materials. Kyiv: Tekhnika, 2003. 344 p. (Ukr)

Надійшла 29.01.2020

Остаточний варіант 17.12.2020