

DC drive model with thyristor voltage regulator Lenze 534 and results of investigations of electromechanical properties are presented.

Transition process, semiconductor voltage converters, feedback, P-controls, electromechanical characteristics, model.

УДК 621.384.3

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ДЕФЕКТНИХ КОНТАКТНИХ З'ЄДНАНЬ З УРАХУВАННЯМ ВЕЛИЧИН ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

***М.Т. Лут, А.В. Міщенко, кандидати технічних наук
Ю.В. Смаглюк, інженер***

Проведено дослідження впливу теплових потоків у зоні дефектного контактного з'єднання на температуру його поверхні. Встановлено залежність поверхневої температури дефектного лінійного контактного з'єднання від питомого опору провідника та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Електричний струм, електричний опір, температура, тепловий потік, теплопровідність, тепловіддача.

Тепловізори та пірометри дають нові можливості дистанційного контролю технічного стану силового електрообладнання, зокрема виявлення дефектів струмопровідних елементів електричних апаратів. Тепловізійне обстеження контактних з'єднань має дві суттєві переваги перед іншими способами діагностування:

- проводиться на працюючому обладнанні без зняття напруги;
- дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку.

Сучасна тепловізійна техніка здатна реєструвати перегрівання обстежуваного об'єкта від 0,1 °С, що дозволяє виявити дефекти контактних з'єднань електрообладнання при струмах 2–5 % від номінального. Експертами рекомендується виконувати перерахунок отриманого при обстеженні значення перевищення температури над нормованим [5].

Мета досліджень – встановлення взаємозв'язку температури поверхні дефектного контактного з'єднання з його електрофізичними характеристиками та умовами теплообміну з навколишнім середовищем.

Матеріали і методика досліджень. Оцінка теплового стану дефектних контактних з'єднань при різних струмах навантаження проводилась з використанням положень чинних нормативних документів у галузі випробування електрообладнання.

Використовуючи положення теорії теплообміну в твердих тілах і газах, визначали залежність температури поверхні дефектного контактного

з'єднання від його електрофізичних характеристик та умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Результати досліджень. Оцінку теплового стану болтових контактних з'єднань при струмах навантаження $0,6\text{--}1,0 I_{\text{НОМ}}$ рекомендується здійснювати за формулою:

$$\Delta\theta_{\text{НОМ}} / \theta_{\text{роб}} = (I_{\text{НОМ}} / I_{\text{РОО}})^2, \quad (1)$$

де $\Delta\theta_{\text{НОМ}}$, $\Delta\theta_{\text{роб}}$ – перевищення температури при номінальному $I_{\text{НОМ}}$ і робочому $I_{\text{РОО}}$ струмах навантаження контактного з'єднання.

Похибка оцінки температури контактних з'єднань при використанні формули (1) суттєво підвищується при проведенні випробувань при струмах менше $0,25\text{--}0,3 I_{\text{НОМ}}$ [4]. У випадках, коли навантаження знаходиться в межах $0,3\text{--}0,6 I_{\text{НОМ}}$ для розрахунку рекомендується співвідношення:

$$\Delta\theta_{0,5} / \Delta\theta_{\text{роб}} = (0,5 I_{\text{НОМ}} / I_{\text{РОО}})^2, \quad (2)$$

де $\Delta\theta_{0,5}$, $\Delta\theta_{\text{роб}}$ – перевищення температури при струмі $0,5 I_{\text{НОМ}}$ і робочому $I_{\text{РОО}}$ струмі навантаження контактного з'єднання (таблиця).

Класифікація дефектів болтових контактних з'єднань [5]

Ступінь несправності	$\Delta\theta_{0,5}$, °C, при $0,5 I_{\text{НОМ}}$	Коефіцієнт дефектності $K_{\text{деф}}$	Стадія розвитку дефекту	Рекомендації експлуатаційному персоналу
1	5...10	<1,2	Початкова	Контроль
2	10...30	1.2 – 1,5	Розвинутий дефект	Вжити заходи щодо усунення дефектів
3	>30	>1,5	Аварійний дефект	Негайне усунення дефектів

Оцінка теплового стану болтових контактних з'єднань проводиться з урахуванням коефіцієнта дефектності.

Досвід діагностування дефектних контактних з'єднань свідчить, що на основі цих рекомендацій отримують завищені значення перевищення температури, чим і обумовлено потребу врахування всіх складових процесу теплообміну з навколишнім середовищем.

Завищені дані прогнозованих температур призводять до некоректної оцінки, немотивованої зупинки обладнання. Статистичні відомості, що науково обґрунтовують експертну оцінку, в літературі відсутні.

Залишається відкритим питання про потік пошкоджень та ймовірність безвідмовної роботи контактних з'єднань на об'єктах. Існує низка проблемних питань, які вимагають вирішення: статистичний аналіз даних тепловізійного контролю; методологія ухвалення експертного рішення; терміни розвитку дефектів контактних з'єднань.

Аналіз літературних джерел показує, що в процесі використання тепловізійної техніки перелічені проблеми не розглядаються.

Розглянемо методику оцінки нагріву елементів обладнання (проводів або контактних з'єднань) під дією струму.

Величина перевищення температури $\Delta\Theta$ розраховується за формулою:

$$\Delta\Theta = (\Theta_n - \Theta_0) , \quad (3)$$

де Θ_n , Θ_0 – температура поверхні з'єднання і середовища при довільному струмі, °C.

Припустимо, що виміри проводяться при струмі I_1 , температурі навколишнього середовища Θ_0 . При цьому потужність розсіювання P_1 можна записати у вигляді формули:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = I_1^2 \rho_1 F , \quad (4)$$

де $\rho_1 = \rho(\Theta_1)$ – питомий електричний опір матеріалу деталей з'єднання при температурі вимірювання, Ом·мм²/м; F – параметр, пов'язаний з формою об'єкта і незалежний від температури вимірювання, м/мм²; I_1 – виміряний струм, А.

В умовах теплової рівноваги потужність P_1 , що виділяється, відводиться від об'єкта у вигляді теплового потоку Q_1 , отже, з урахуванням (4) можна записати:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = I_1^2 \rho_1 F = Q_1 = \alpha_1 S \Delta\Theta_1 = \alpha_1 S (\Theta_1 - \Theta_0) , \quad (5)$$

де α_1 – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C): $\alpha_1 = \alpha_{1T} + \alpha_{1B} + \alpha_{1K}$; S – площа поверхні об'єкта, м²; Θ_1 – температура поверхні об'єкта при струмі I_1 , °C; Θ_0 – температура навколишнього середовища, °C; $\alpha_T, \alpha_B, \alpha_K$ – коефіцієнти теплообміну (теплопровідність, випромінювання, конвекція), Вт/(м²·°C).

Остаточню:

$$P_1 = \alpha_1 S (\Theta_1 - \Theta_0) = \alpha_1 S \Delta\Theta_1 . \quad (6)$$

Для номінального навантаження P_2 , наприклад 100 %, для приведеної температури Θ_{np} можна записати:

$$P_2 = \alpha_2 S (\Theta_2 - \Theta_{np}) = \alpha_2 S \Delta\Theta_2 , \quad (7)$$

де α_2 , – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C):

$$\alpha_2 = \alpha_{2T} + \alpha_{2B} + \alpha_{2K} . \quad (8)$$

На підставі співвідношень (4) – (8) можна оцінити перевищення температури протяжного об'єкта (проводу) без урахування охолодження за рахунок теплопровідності вздовж металу:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = \alpha_1 \Delta\Theta_1 / \alpha_2 \Delta\Theta_2 . \quad (9)$$

Вважаючи, що питомий опір металу в досліджуваній області і тепловіддача не залежать від температури, можна отримати рекомендований у нормативних документах [5] вираз:

$$I_1^2 / I_2^2 = \Delta\Theta_1 / \Delta\Theta_2 . \quad (10)$$

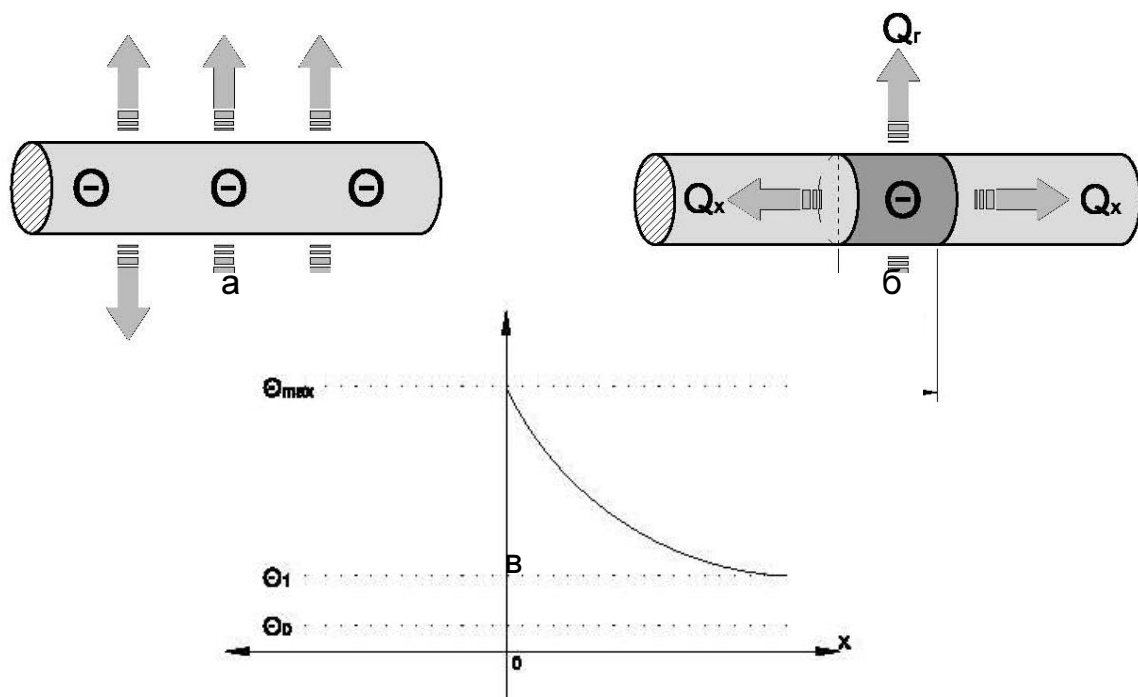
Нехтуючи зміною коефіцієнта тепловіддачі, але враховуючи залежність $\rho(\Theta)$ для дефектного контактного з'єднання, можна використати формулу:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = \Delta\Theta_1 / \Delta\Theta_2 . \quad (11)$$

На відміну від спрощеного виразу (10), співвідношення (11) враховує зміну значення питомого електричного опору від температури, що призводить до збільшення розрахункового значення перевищення температури.

При розрахунках за співвідношенням (11), що враховує як радіальний тепловідвід від поверхні, так і зміну опору матеріалу проводу при зростанні температури, можна визначити значення перевищення температури.

Врахуємо додаткові фактори, що обумовлюють відвід теплоти від досліджуваного нагрітого об'єкта (проводу або контактного з'єднання). Як зазначалося вище співвідношення (9) та його спрощені варіанти (10) і (11) характерні для опису процесів, що проходять у протяжних об'єктах (наприклад, проводах), для яких характерний радіальний тепловідвід Q_r у повітря від ділянки, що нагрівається (рисунок а).



Теплові потоки в області локального дефекту провідника

Дефекти, наприклад надрізи провідників, можуть бути розглянуті у вигляді локального джерела тепла, потік якого поширюється не тільки радіально за рахунок тепловіддачі в середовище, але й уздовж проводу за рахунок теплопровідності металу (рисунок б). У цьому випадку температура Θ приймає максимальне значення $\Theta_{\max}$ у місці дефекту і знижується в міру віддалення від нього (рисунок "в") до температури непорушеної ділянки проводу Θ_1 .

Температура дефектного місця може бути визначена на основі розрахунку теплопередачі в стержні при лінійному тепловому потоці.

Тепловий потік Q_x , що відводиться від площини перерізу стержня з координатою $X = 0$ [1], може бути представлений у вигляді:

$$Q_x = (\Theta_{\max} - \Theta_0)(\alpha P \lambda S)^{1/2} = (\alpha P \lambda S)^{1/2} \Delta \Theta, \quad (12)$$

де P – периметр поперечного перерізу, м; S – площа поперечного перерізу, м².

Вважаючи, що тепловий потік обумовлений тепловідводом за рахунок теплопровідності металу в області дефекту, перевищення температури можна визначити із співвідношення, в якому враховується вплив температури на величини ρ , α , λ при струмах I_1 і I_2 :

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = (\lambda_1 \alpha_1)^{1/2} \Delta \Theta_1 / (\lambda_2 \alpha_2)^{1/2} \Delta \Theta_2. \quad (13)$$

Вирішення задачі про розподіл температури вздовж провідника, який має дефектну ділянку з температурою $\Theta_{\max}$, наведено в [2]: температура експоненціально спадає від максимального значення до рівноважного значення на відстані, що в 5–6 разів перевищує довжину дефекту.

Коефіцієнти електропровідності і теплопровідності металу зв'язані між собою відомим законом Відемана-Франца [2]. Тому, для співвідношення коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору можемо записати:

$$\lambda \rho = 2(k/e)^2 \Theta, \quad (14)$$

де k – стала Больцмана; e – заряд електрона.

З урахуванням співвідношення (14) можна отримати:

$$\lambda_{1d} \rho_{1d} / \lambda_{2d} \rho_{2d} = \Theta_{1d} / \Theta_{2d}, \quad (15)$$

де λ_{1d} , λ_{2d} , ρ_{1d} , ρ_{2d} – параметри ділянок металу, розташованих поблизу дефекту при "усереднених" температурах Θ_{1d} і Θ_{2d} .

На основі співвідношень (13) і (15) можна отримати вираз:

$$\rho_1 I_1^2 / \rho_2 I_2^2 = (\rho_{2d} / \rho_{1d})^{1/2} (\alpha_1 / \alpha_2)^{1/2} (\Theta_{1d} / \Theta_{2d})^{1/2} (\Delta \Theta_1 / \Delta \Theta_2). \quad (16)$$

Вважаючи, що температура Θ , яку ми визначаємо, наближена до температури дефекту, тобто $\Theta_{1d} \approx \Theta_1$, $\Theta_{2d} \approx \Theta_2$, отримуємо при різних струмах:

$$\Delta \Theta_2 / \Delta \Theta_1 = (\rho_2 / \rho_1)^{3/2} (\alpha_1 \Theta_1 / \alpha_2 \Theta_2)^{1/2} (I_2 / I_1)^2. \quad (17)$$

Радіальний тепловідвід від нагрітої ділянки дефектної області за рахунок тепловіддачі в повітря і теплопередачі по довжині металевого провідника враховуються так:

$$I^2 R = Q_r + Q_x, \quad (18)$$

де R – опір металу безпосередньо в області дефекту, Ом.

З урахуванням формули (18) при фіксованому струмі I_1 отримаємо:

$$I_1^2 \rho_1 l / S_d = \alpha_1 \Delta \Theta_1 S_{\pi d} + 2(\alpha_1 P \lambda S)^{1/2} \Delta \Theta_1, \quad (19)$$

де l – довжина ділянки дефекту, м; $S_d = \pi D X_0$ – площа бічної поверхні ділянки дефекту, м²; D , X_0 – діаметр і лінійний розмір дефекту, м; $P = \pi D$ – периметр поперечного перерізу стержня, м²; $S = \pi D^2 / 4$ – площа поперечного перерізу стержня, м².

З урахуванням (20) при різних струмах маємо:

$$\Delta \Theta_2 = \left\{ I_2^2 \rho_2 \left[\alpha_1 X_0 + (D \alpha_1 \beta \Theta_1 / \rho_1)^{1/2} \right] \Delta \Theta_1 / \left\{ I_1^2 \rho_1 \left[\alpha_2 X_0 + (D \alpha_2 \beta \Theta_2 / \rho_2)^{1/2} \right] \right\} \right\}. \quad (20)$$

При малих розмірах дефекту ($X_0=0$) із (20) отримаємо вираз:

$$\Delta\Theta_2 = I_2^2 \rho_2^{3/2} (\alpha_1 \Theta_1)^{1/2} \Delta\Theta_1 / [I_1^2 \rho_1^{3/2} (\alpha_2 \Theta_2)^{1/2}] , \quad (21)$$

ідентичний (17).

При зменшенні діаметра проводу до нуля ($D = 0$) вираз (20) ідентичний співвідношенню (9).

Вважаючи, що питомий опір сплаву ρ незначно залежить від температури, відповідно до (20) отримуємо:

$$\Delta\Theta_2 = \left\{ I_2^2 \rho \left[\alpha_1 X_0 + (D \alpha_1 \beta \Theta_1 / \rho)^{1/2} \right] \right\} \Delta\Theta_1 / \left\{ I_1^2 \rho \left[\alpha_2 X_0 + (D \alpha_2 \beta \Theta_2 / \rho)^{1/2} \right] \right\} . \quad (22)$$

З врахуванням співвідношень (6) – (8) можна записати:

$$\left[\rho(\Theta_1) I_1^2 / \rho(\Theta_2) I_2^2 \right] = \alpha_1 (\Theta_1 - \Theta_0) / \alpha_2 (\Theta_2 - \Theta_{PP}) . \quad (23)$$

Таким чином, із співвідношення (23) можна розрахувати температуру поверхні дефекту Θ_2 при відомих значеннях $\rho(\Theta_1)$, $\rho(\Theta_2)$, I_1 , I_2 , α_1 , α_2 , Θ_1 , Θ_0 .

$$\Theta_2 = \frac{\alpha_1 (\Theta_1 - \Theta_0) \rho(\Theta_2) I_2^2}{\alpha_2 \rho(\Theta_1) I_1^2} + \Theta_{PP} . \quad (24)$$

Умови (6) – (8) та (24) справедливі при припущенні, що тепловідвід від дефекту здійснюється шляхом конвекції і випромінювання на межі метал – повітря, і додатковий тепловідвід здійснюється за допомогою теплопровідності в об'ємі металу від місця локалізації дефекту вздовж провідника.

Висновки

Можливості дистанційної оцінки величин теплових потоків дозволяють розробляти алгоритми, що будуть застосовуватись для підвищення вірогідності діагностування шляхом збільшення числа діагностичних параметрів, які раніше не враховувались, і які підвищують об'єктивність експертної оцінки при діагностуванні.

Використання величини теплового потоку в процесі діагностування контактних з'єднань дозволяє перейти від емпіричних експертних рекомендацій до розробки науково-обґрунтованих пропозицій при проведенні технічного обстеження.

Список літератури

1. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 379 с.
2. Залесский А.М. Электрические аппараты высокого напряжения / А.М. Залесский. –Л.; М.: ГЭИ, 1957.– 540 с.
3. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников — [6-е изд., стереотип]. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 624 с.
4. Масленников Д.С. О тепловизионном контроле электротехнического оборудования / Д.С. Масленников, А.Г. Константинов, В.Н. Осотов // Электрические станции. – 1985. – № 11. – С. 73–75.
5. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [Чинний від 15.01.2007 р.]. – Харків, 2009. – 278 с.

Проведено исследование влияния тепловых потоков в зоне дефектного контактного соединения на температуру его поверхности. Установлена зависимость поверхностной температуры дефектного линейного контактного соединения от удельного сопротивления проводника и условий теплообмена с окружающей средой.

Электрический ток, электрическое сопротивление, температура, тепловой поток, теплопроводность, теплоотдача.

A study of the effect of heat flow in the area of defective pin connection on the temperature of its surface. The dependence of the surface temperature of the defective line pin connections from the resistivity of the conductor and the conditions of heat exchange with the environment.

Electric current, electrical resistance, temperature, heat flow, thermal conductivity, convective heat transfer.

УДК 621.3

ПІДВИЩЕННЯ ККД ІМПУЛЬСНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

А.П.Пузанов, кандидат технічних наук

Проаналізовано вторинні джерела електроживлення зі стабілізацією вихідної напруги широтно-імпульсним модулятором з транзисторним ключем, який навантажено на вихідний імпульсний трансформатор. Такі схеми дають можливість досягнути масогабаритних характеристик 300 Вт/дм^3 при частоті перетворення до 200 кГц і ККД до 70 %.

Розглянуто резонансні та квазірезонансні схеми AC/DC-перетворювачів із використанням LC-кіл. Показано, що резонансні схеми мають більш високу стабільність і ефективність, дають можливість збільшити частоту перетворення до 2 МГц, що дозволяє для джерел з вихідною потужністю до 100 Вт досягнути малогабаритних характеристик до 930 Вт/дм^3 при ККД до 87 %.

Перетворювач напруги, широтно-імпульсний модулятор, стабілізатор напруги, резонансні кола, ефективність.

Стрімкий розвиток нових напівпровідникових технологій привів до революції й у такій області електротехніки, як джерела електроживлення. За короткий термін вторинні джерела електроживлення радикально змінилися: на зміну громіздким пристроям з мережним трансформатором і додатковим транзисторним стабілізатором прийшли мініатюрні імпульсні модулі. Виробляються малогабаритні AC/DC-перетворювачі в корпусах звичайних мікросхем.

Мета досліджень - підвищення ефективності імпульсних джерел живлення.