

В.В. ЛИТВИНЕНКО, ас. НТУ "ХПИ", Харків
А.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харків
Л.С. КОЗАР, магістр, НТУ "ХПИ", Харків
В.В. МОРГУН, студент, НТУ "ХПИ", Харків

ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК СТРУМОВЕДУЧОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЧНОГО ВИМИКАЧА

A technique of temperature computations in automatic switches current conductors is developed. A mathematical modeling is got up and its results used for modernizing of the base automatic switch. It rise nominal current value in the automatic switch without changes of its main sizes.

Приведена методика теплового расчета токопровода автоматического выключателя. Результаты расчета дают возможность модернизации базовой конструкции выключателя за счет повышения величины номинального тока без изменения базовых габаритных размеров.

Приведено методику теплового розрахунку струмопроводу автоматичного вимикача. Результати розрахунку дають можливість модернізації базової конструкції вимикача за рахунок підвищення величини номінального струму без зміни базових габаритних розмірів.

Вступ. У більшості випадків конструкції струмопроводів сучасних автоматичних вимикачів розробляються з запасом по температурі. При цьому намагаються забезпечити протікання аварійних струмів без перевищення температури струмопроводів. Сучасні тенденції в електроапаратобудуванні спрямовані на енерго- та ресурсозбереження. В зв'язку з цим актуальним стає раціональне конструювання струмопроводів, в тому числі за рахунок обмеження запасу по температурі. Цьому сприяє і те, що в сучасних автоматичних вимикачах намагаються скоротити час протікання аварійних струмів, наприклад, за рахунок підвищення їх швидкодії.

Мета роботи – розробити методику теплового розрахунку струмоведучої частини автоматичного вимикача, яка дозволяє ефективно розраховувати розподіл температури вздовж струмопроводу при протіканні електричного струму.

Постановка задачі. Основна частина електроенергії, що виробляється на стороні низької напруги комутується й розподіляється між

споживачами за допомогою автоматичних вимикачів. Струмоведача частина автоматичного вимикача повинна пропускати номінальний струм протягом тривалого часу не перегріваючись. Струмопровід автоматичного вимикача представлено на рисунку 1. Позначення елементів: 1 – ввід; 2 – нерухомий контактоутримувач; 3 – головні контакти; 4 – рухомий контактоутримувач; 5 – гнучке з'єднання; 6 – термобіметалевий розчеплювач; 7 – термобіметалева пластина; 8 – шунт; 9 – вивід.

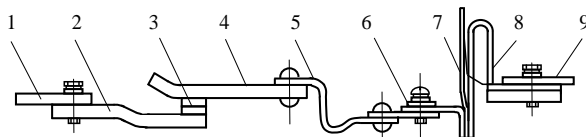


Рис. 1. Струмопровід автоматичного вимикача.

Постійне підвищення вимог до зниження матеріалоемності, трудомісткості й експлуатації автоматичних вимикачів диктують необхідність створення принципово нових і модернізації вже існуючих конструкцій у напрямку скорочення матеріальних, трудових і енергетичних витрат при розробці, виробництві й експлуатації. В результаті аналізу матеріалоемності автоматичного вимикача й розгляду протоколів типових і кваліфікаційних випробувань було встановлено, що автоматичний вимикач типу ВА51-39 на номінальний струм 630 А має запас з нагріву й зносостійкості. Тому актуальною вважається задача підвищення номінального струму вимикача до 800 А зі збереженням базових габаритів.

Спрощення. При розрахунках використовуємо спрощення:

1. *Коефіцієнт теплопровідності.* У тривалому режимі роботи очікувана температура нагріву мідного струмопроводу коливається в діапазоні 70÷100°С. Користуючись даними Бюро стандартів США [1], абсолютна похибка для коефіцієнта теплопровідності мідного струмопроводу складає:

$$\frac{\lambda_{70} - \lambda_{100}}{\lambda_{70}} \cdot 100 = \frac{3,93 - 3,90}{3,90} \cdot 100 = 0,77 \%, \quad (1)$$

де $\lambda_{\vartheta} = \lambda_0 \cdot (1 + \beta\vartheta)$ – коефіцієнт теплопровідності при температурі ϑ , який характеризує властивість проводити тепловий потік; λ_0 – коефіцієнт теплопровідності при $\vartheta = 0$, β – температурний коефіцієнт теплопровідності.

Враховуючи незначну відносну температурну похибку при розра-

хунках приймаємо коефіцієнт теплопровідності постійним:

$$\lambda_{\vartheta} = \lambda_{100} = 3,9 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ \text{C}) \quad (2)$$

2. *Вимірність теплових розрахунків.* При нагріванні струмопроводів теплопередача відбувається при двовимірному тепловому потоці $\Phi(x, z)$. Характер таких стаціонарних процесів залежить від геометричних параметрів нагрітого тіла, теплофізичних властивостей середовища, умов теплообміну. Методики розрахунків ґрунтуються на теорії двовимірних теплових потоків є складними. Тому в роботі використано метод розрахунку одновимірних теплових потоків, який передбачає: незмінну температуру ділянки вздовж перерізу, контактування окремих ділянок струмопроводу відбувається в торцях, для чого струмопровід був трансформований від болтового контактного з'єднання та з'єднання клепкою, пайкою та зварюванням.

3. *Ввідний та вивідний струмопроводи* вважаються нескінченно довгими шинами.

4. *Умови тепловідводу.* Передача тепла через неконтактуючу частину торця ділянки струмопроводу в навколишнє середовище шляхом теплопередачі незначна, тому не враховується. Джерело тепла торцевого контакту стягується у лінію та тепловіддачі від нього немає.

5. *Геометрія струмопроводу.* Ділянки струмопроводу складної конфігурації штучно замінюються на прості прямокутні паралелепіпеди.

6. *Паралельні ділянки струмопроводу.* Струмоведуча система автоматичних вимикачів має паралельну ділянку шунт-термобіметал. Для спрощення ця ділянка перетворюється на умовну послідовну ділянку "еквівалентний" шунт. За довжину та висоту частини "еквівалентного" шунта візьмемо довжину та висоту реального шунта, а ширину "еквівалентного" шунта визначимо.

Опір термобіметалевої пластини та гнучкого з'єднання:

$$R_{tb} = \rho_{tb} (1 + \alpha_{tb} \vartheta_{tb}) \frac{l_{tb}}{b_{tb} h_{tb}} + \rho_{gn} (1 + \alpha_{gn} \cdot \vartheta_{gn}) \frac{l_{gn}}{2b_{gn} h_{gn}}, \quad (3)$$

де $\rho_{tb} = 17 \cdot 10^{-6}$ – питомий опір термобіметалевої пластини; $\alpha_{tb} = 10^{-3}$ – температурний коефіцієнт опору матеріалу термобіметалевої пластини; $\vartheta_{tb} = 100^\circ \text{C}$ – очікувана температура нагріву термобіметалевої пластини; l_{tb}, b_{tb}, h_{tb} – довжина, ширина та висота термобіметалевої пластини; $\rho_{gn} = 1,62 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_{gn} = 4,3 \cdot 10^{-3}$ – питомий опір та температурний коефіцієнт опору мідного гнучкого з'єднання;

$\vartheta_{gn} = 100$; l_{gn}, b_{gn}, h_{gn} – довжина, ширина та висота гнучкого з'єднання.

Опір шунта:

$$R_{sh} = 81 \cdot R_{tb} / 719, \quad (4)$$

або

$$R_{sh} = \rho_{sh} (1 + \alpha_{sh} \cdot \vartheta_{sh}) \frac{l_{sh}}{b_{sh} h_{sh}}. \quad (5)$$

Сумарний опір паралельного з'єднання шунт-термобіметал дорівнює:

$$R_{tb\Sigma} = \frac{R_{sh} \cdot R_{tb}}{R_{sh} + R_{tb}}, \quad (6)$$

де $R_{tb\Sigma}$ – сумарний опір паралельного з'єднання шунт-термобіметал пластини, Ом.

Замінімо паралельне з'єднання шунт-термобіметал на еквівалентну ділянку зроблену з міді.

Ширина b_{eq} такої ділянки:

$$b_{eq} = \frac{\rho_{eq} (1 + \alpha_{eq} \vartheta_{eq}) l_{sh}}{h_{sh} \cdot R_{\Sigma}}, \quad (7)$$

де $\rho_{eq} = 1,62 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_{eq} = 4,3 \cdot 10^{-4}$ – питомий опір та температурний коефіцієнт опору "еквівалентного" шунта; $\vartheta_{eq} = 100$ °С – очікувана температура нагріву шунта.

7. *Поверхневий ефект.* Явище витіснення струму до країв перерізу провідника, зумовлене дією власного магнітного поля, враховується коефіцієнтом додаткових втрат потужності K_p . В тонких пластинах на низьких частотах поверхневий ефект незначний. Нерухомий контактує автоматичного вимикача має малий опір та максимальні розміри висоти і ширини у порівнянні з іншими ділянками. Якщо у ньому коефіцієнт K_p незначний, то в інших ділянках він ще менший.

Опір ділянки при протікання постійного струму:

$$R_{=} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot \frac{l}{h \cdot b} = 5,265 \cdot 10^{-5}, \text{ Ом} \quad (8)$$

де $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-6}$ Ом·м – питомий електричний опір міді; $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$ 1/°С – температурний коефіцієнт електричного опору; ϑ – очікувана температура нагріву ділянки ($\vartheta = 100$ °С); $l = 100$ м,

$h = 8$ мм, $b = 55$ мм – відповідно довжина, висота, ширина ділянки.

На промисловій частоті 50 Гц: $K_P = 1,05$.

Відносна похибка для випадку $K_P = 1$ становить:

$$\frac{K_P - 1}{K_P} \cdot 100\% = 3,85\%, \quad (9)$$

що вважається припустимим. Тому приймаємо $K_P = 1$.

8. *Ефект близькості.* Нерівномірний розподіл щільності струму по перерізу провідника, зумовлене дією магнітного поля сусідніх провідників приймаємо несуттєвим. Тоді коефіцієнт ефекту близькості $K_B = 1$.

Методика розрахунку. Задачі, що вирішуються на основі загального рівняння теплопровідності розділяють на два класи:

1. Задачі для перехідного процесу. До цього рівняння входять складові: теплопровідність; тепло, що відводиться за рахунок конвекції та випромінювання; тепло, виділення якого зумовлено протіканням струму; тепло, що запасується за рахунок теплоємності.

2. Задачі для стаціонарного процесу, де відсутня складова, яка відповідає за тепло, що запасується за рахунок теплоємності.

Основним законом теплопровідності є закон Фур'є. Згідно до якого кількість тепла (енергія) Q_1 , яка передається від більш нагрітої частини твердого тіла до менш нагрітої частини, яка знаходиться на відстані x від першої, прямо пропорційна різниці температур $\Delta\vartheta$ цих частин, часу t і площі перерізу F , та зворотно пропорційна відстані x . Математично цей закон можна записати у вигляді рівняння:

$$Q_1 = \lambda \cdot \Delta\vartheta \cdot F / x \cdot \Delta t, \quad (10)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності; $\Delta\vartheta$ – різниця температур; F – площа перерізу; x – відстань від більш нагрітої частини, м; $\Delta t = t_2 - t_1$ – проміжок часу.

Якщо інтегрувати рівняння (10) в часі та за відстанню, отримаємо диференціальне рівняння теплопровідності для провідника перерізом F товщиною dx :

$$dQ_1 = \lambda F \cdot d\vartheta / dx^2 \cdot dt \cdot dx \quad (11)$$

Інакше, кількість тепла, що проходить через пластини в одиницю часу:

$$dQ_1 = dQ_{1(\vartheta-d\vartheta)} - Q_{1(\vartheta)} = -\lambda F \cdot dt \cdot dx \cdot \left(\frac{d(\vartheta-d\vartheta)}{dx^2} - \frac{d\vartheta}{dx^2} \right) = \lambda F \frac{d\vartheta^2}{dx^2} \cdot dt \cdot dx \quad (12)$$

Тепло, що виділяється при протіканні струму, за законом Джоуля-Ленца пропорційно опору провідника та квадрату струму.

$$Q = c \cdot I^2 R \quad (13)$$

Формула (13) виражає кількість тепла (енергію), яка виділяється за рахунок проходження струму через провідник в одиницю часу:

$$Q_2 = K_D I^2 R \cdot \Delta t, \quad (14)$$

де I – діюче значення змінного струму; R – опір провідника; $K_D = K_P K_B$ – безрозмірний коефіцієнт додаткових втрат зумовлений поверхневим ефектом та ефектом близькості з урахуванням припущень $K_D = 1$.

Інтегруємо рівняння (14) в часі:

$$\int_{t_1}^{t_2} dQ_2 = \int_{t_1}^{t_2} I^2 \cdot dR \cdot dt. \quad (15)$$

Опір провідника довжиною dx :

$$dR = \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) \frac{dx}{F}. \quad (16)$$

Тоді інтегруємо за відстанню dx :

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} dQ_2 = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \left[\left(I^2 \rho_0 (1 + \alpha \cdot \vartheta) \frac{1}{F} \right) dx \right] dt. \quad (17)$$

Отримаємо диференціальне рівняння для тепла, яка виділяється при протіканні струму в провіднику перерізом F товщиною dx :

$$dQ_2 = \frac{I^2 \rho_0}{F} (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot dx \cdot dt. \quad (18)$$

Тепло, яке відводиться у навколишнє середовище визначається коефіцієнтом тепловіддачі K_T – це тепло, яке знімається з 1 м^2 поверхні за 1 с при різниці температур з навколишнім середовищем 1°C . K_T залежить від температури поверхні тіла, температури навколишнього середовища та форми тіла.

Коефіцієнт K_T може бути знайдений за формулою:

$$K_T = K_K + K_I, \quad (19)$$

де K_K – коефіцієнт тепловіддачі за допомогою конвекції; K_I – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Коефіцієнт K_K може бути розрахований за формулою:

$$K_K = 1,33(\Theta/l)^{0,25}, \quad (20)$$

де $\Theta = \vartheta_{\Pi} - \vartheta_0$ – перевищення температури поверхні тіла над температурою навколишнього середовища; ϑ_0 – температура навколишнього середовища; ϑ_{Π} – температура поверхні тіла; l – визначаючий розмір, який для прямокутного паралелепіпеда визначається меншою стороною.

Якщо поверхня, яка віддає тепло, є боковою, то K_K залишається незмінним, якщо звернена доверху, то отримане з формули (20) значення K_K збільшується на 30 %, звернена донизу – зменшується на 30 %. У нашому випадку приймаємо, що тепло віддається з усіх поверхонь струмопроводу.

Коефіцієнт K_I можна розрахувати за допомогою формули:

$$K_I = 2,04 \cdot \vartheta_0^3 \cdot 10^{-7} \cdot E(2,08 \cdot (\vartheta/\vartheta_0) - 1), \quad (21)$$

де $E = 0,5$ – коефіцієнт чорноти випромінювання окисленої міді.

В автоматичних вимикачах в пластмасовому кожуху коефіцієнт тепловіддачі тепла в навколишнє середовище всередині вимикача зменшується на 25 %. Тому формула (19) зазнає змін:

$$K_T = 0,75(K_K + K_I). \quad (22)$$

Згідно з формулою Ньютона кількість тепла (енергія) Q_3 , яка відводиться в навколишнє середовище від нагрітого тіла прямо пропорційна різниці температур:

$$Q_3 = K_T S_B \Theta \cdot \Delta t, \quad (23)$$

де S_B – площа бокової поверхні.

Інтегруємо рівняння (23) в часі:

$$\int_{t_1}^{t_2} dQ_3 = \int_{t_1}^{t_2} K_T S_B \Theta \cdot dt \cdot \quad (24)$$

Площа бокової поверхні для провідника довжиною dx :

$$dS_B = P \cdot dx, \quad (25)$$

де P – периметр.

Тоді інтегруємо за відстанню dx :

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} dQ_3 = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} K_T \Theta P \cdot dx \cdot dt \cdot \quad (26)$$

Отримаємо диференціальне рівняння для тепла, яке відводиться в навколишнє середовище від нагрітого струмопроводу перерізом F то-

вщиною dx :

$$dQ_3 = K_T \Theta P \cdot dx \cdot dt . \quad (27)$$

Кількість тепла (енергія) Q_4 , яке запасється в твердому тілі за рахунок теплоємності, може бути визначена за формулою:

$$Q_4 = cm \cdot \Delta\vartheta , \quad (28)$$

де c – питома теплоємність, кількість тепла, яке треба підвести до тіла, щоб останнє нагрілося на 1 градус; m – маса твердого тіла.

Масу тіла перерізом F , товщиною x знаходимо за формулою:

$$m = \gamma \cdot V = \gamma \cdot F \cdot x , \quad (29)$$

де γ – питома маса твердого тіла; V – об'єм.

Інтегруємо рівняння (28) в часі:

$$\int_{t_1}^{t_2} dQ_4 = \int_{t_1}^{t_2} c\gamma V \cdot \Delta\vartheta \cdot dt . \quad (30)$$

Маса струмопроводу перерізом F , товщиною dx :

$$dm = \gamma \cdot dV = \gamma \cdot F \cdot dx . \quad (31)$$

Тоді інтегруємо за відстанню dx :

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} dQ_4 = \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} c\gamma F \cdot \Delta\vartheta \cdot dx \cdot dt . \quad (32)$$

Отримаємо диференційне рівняння для теплоти, яка запасється в пластини перерізом F , товщиною dx :

$$dQ_4 = c\gamma F \cdot \Delta\vartheta \cdot dx \cdot dt . \quad (33)$$

Загальне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$dQ_1 = dQ_4 + dQ_3 - dQ_2 . \quad (34)$$

Або з урахуванням (12), (18), (27), (33):

$$\lambda F \frac{d\vartheta^2}{dx^2} dx \cdot dt = c\gamma F \cdot \Delta\vartheta \cdot dx \cdot dt + K_T \Theta P \cdot dx \cdot dt - \frac{I^2 \rho_0}{F} (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot dx \cdot dt . \quad (35)$$

В сталому режимі нагрівання, коли температура не змінюється з часом ($\Delta\vartheta = 0$), загальне рівняння теплопровідності приймає вид:

$$\lambda F \frac{d\vartheta^2}{dx^2} dx \cdot dt = K_T \Theta P \cdot dx \cdot dt - \frac{I^2 \rho_0}{F} (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot dx \cdot dt . \quad (36)$$

Інакше:

$$\frac{d\vartheta^2}{dx^2} - \vartheta \cdot \left[\frac{K_T P}{\lambda F} - \frac{I^2 \rho_0 \alpha}{\lambda F^2} \right] + \left[\frac{K_T P \vartheta_0}{\lambda \cdot F} + \frac{I^2 \rho_0}{\lambda F^2} \right] = 0 . \quad (37)$$

Для спрощення формули (37) позначимо:

$$a_1 = \sqrt{\frac{K_T P}{\lambda F} + \frac{j^2 \rho_0 \alpha}{\lambda}}. \quad (38)$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{K_T P \vartheta_0}{\lambda F} + \frac{j^2 \rho_0}{\lambda}}, \quad (39)$$

де $j = I/F$ – щільність струму.

Отримали:

$$\frac{d\vartheta^2}{dx^2} - a_1^2 \vartheta + a_2^2 = 0. \quad (40)$$

Рішення цього лінійного диференційного рівняння другого порядку з правою частиною a_2^2 [2]:

$$\vartheta = A_1 y_1 + A_2 y_2 + \varphi(x), \quad (41)$$

де A_1, A_2 – постійні коефіцієнти.

Рішенням рівняння (41) є функція $y = e^{rx}$. Тоді $y' = r \cdot e^{rx}$, $y'' = r^2 \cdot e^{rx}$.

Отримуємо:

$$e^{rx} \cdot (r^2 - a_1^2) = 0; \quad r^2 - a_1^2 = 0; \quad (r - a_1) \cdot (r + a_1) = 0. \quad (42)$$

Коли виконується умова:

$$\frac{K_T P}{\lambda F} < \frac{j^2 \rho_0 \alpha}{\lambda}, \quad (43)$$

тобто більше тепла виділяється, ніж відводиться, корені характеристичного рівняння комплексно-зв'язані: $r_1 = i \cdot a_1$; $r_2 = -i \cdot a_1$.

Коли виконується умова:

$$\frac{K_T P}{\lambda F} < \frac{j^2 \rho_0 \alpha}{\lambda}, \quad (44)$$

тобто виділяється менше тепла, ніж відводиться, корені характеристичного рівняння дійсні й різні.

Загальне рішення рівняння (39) має вигляд:

$$\vartheta = A_1 \cdot e^{a_1 x} + A_2 \cdot e^{-a_1 x} + \varphi(x). \quad (45)$$

Якщо права частина має вид $f(x) = P(x) \cdot e^{mx}$, то приватне рішення рівняння (39) має вигляд:

$$y = x^k \cdot Q(x) \cdot e^{mx}, \quad (46)$$

де $Q(x)$ – поліном того ж ступеня, що і $P(x)$.

Оскільки права частина дорівнює:

$$-a_2^2 = (z \cdot 0 - a_2^2) \cdot e^{0 \cdot x}, \quad (47)$$

то цей поліном нульового ступеня ($m = 0$) не є коренем характеристичного рівняння. Тому $y = Q(x) = B$.

Отримуємо абсолютну температуру ϑ_{st} в сталому режимі нагріву провідника нескінченної довжини:

$$\vartheta_{st} = B = a_2^2 / a_1^2. \quad (48)$$

З урахуванням (45), (47) загальне рішення лінійного диференційного рівняння з правою частиною для теплових негармонічних затухаючих коливань приймає вид:

$$\vartheta = A_1 \cdot e^{a_1 \cdot x} + A_2 \cdot e^{-a_1 \cdot x} + a_2^2 / a_1^2. \quad (49)$$

Для визначення коефіцієнтів A_1, A_2 потрібно задати граничні умови. Будемо виходити з реальних умов теплообміну на зовнішніх кінцях струмопроводу та на границях сполучення суміжних ділянок.

При відносно великому віддаленні кінців струмопроводу приймаємо граничні умови для системи, яка має нескінченну довжину:

$$(\vartheta_1)_{x=-\infty} = \vartheta_{st1}; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx} \right)_{x \rightarrow -\infty} = 0; (\vartheta_n)_{x=+\infty} = \vartheta_{stn}; \left(\frac{d\vartheta_n}{dx} \right)_{x \rightarrow +\infty} = 0, \quad (50)$$

де n – кількість ділянок струмопроводу.

При теплоізольованих торцях ділянок:

$$(\vartheta_s)_{x=x_n} = \vartheta; \left(\frac{d\vartheta_s}{dx} \right)_{x=x_n} = 0, \quad (51)$$

де s – номер ділянки струмопроводу.

На поверхні торців ділянок відбувається теплообмін з навколишнім середовищем:

$$\Phi_{x=0} = -\lambda F \left(\frac{d\vartheta_1}{dx} \right)_{x=0}; \quad \Phi_{x=x_n} = -\lambda F \left(\frac{d\vartheta_s}{dx} \right)_{x=x_n}, \quad (52)$$

При послідовному тепловому контактуванні ділянок між собою:

$$(\vartheta_k)_{x=x_s} = (\vartheta_{k+1})_{x=x_s} = \vartheta_g; -\lambda_{k+1} F_{k+1} \left(\frac{d\vartheta_{k+1}}{dx} \right)_{x=x_s} + \lambda_k F_k \left(\frac{d\vartheta_k}{dx} \right)_{x=x_s} = 0, \quad (53)$$

де ϑ_g – стала температура стику ділянок.

Послідовне теплове контактування ділянок з джерелом тепла між ними:

$$-\lambda_{k+1}F_{k+1}\left(\frac{d\vartheta_{k+1}}{dx}\right)_{x=x_s} + \lambda_k F_k\left(\frac{d\vartheta_k}{dx}\right)_{x=x_s} = \Phi_s, \quad (54)$$

де Φ_s – потужність джерела тепла на стиках ділянок.

Визначення опорів ділянок струмопроводу. Усього є N ділянок кінцевої довжини та $N+1$ джерело тепла незмінної потужності (нероз’ємні контактні з’єднання). Потужність джерела тепла роз’ємного контакту є змінною величиною. При розрахунках теплових потоків від болтового контактного з’єднання та контактної з’єднання клепою, зварюванням та пайкою, коли частини сусідніх ділянок контактуванні знаходяться одна під іншою вздовж струмопроводу, контакт замінюється джерелом тепла, еквівалентним за потужністю. На рис. 2 схематично зображене нероз’ємне болтове з’єднання ділянок.

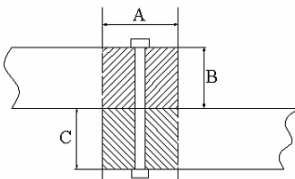


Рис. 2. Нероз’ємне болтове з’єднання ділянок струмопроводу.

Згідно [3] опір контакту не перевищує 20 % від опору шини. Якщо шини різного перерізу, то в якості шини, відносно якої розраховують опір контакту, беруть шину більшого перерізу, щоб опір контакту не перевищував 20 % опору обох шин. Опір шин:

$$R_{ш} = \rho_0(1 + \alpha\vartheta)\frac{A}{BD + CE}, \quad (55)$$

де B – ширина верхньої шини; C – ширина нижньої шини.

Тоді опір контакту:

$$R_k = 0,2 \cdot R_{ш}, \quad (56)$$

Сумарний еквівалентний опір контактуючих ділянок:

$$R_{k\Sigma} = R_{ш} + R_k, \quad (57)$$

Потужність джерела тепла:

$$\Phi = P = I_H^2 \cdot R_{k\Sigma}, \quad (58)$$

де Φ – тепловий потік, P – потужність; I_H – номінальний струм.

Опір головних контактів:

$$R_{gk} = \frac{\Phi_2}{I_H^2} - R_{ш}. \quad (59)$$

Для площинного контакту, коли утворюється мінімум три паралельні площадки контактування, їх сумарний опір:

$$R_{gk} = R_{k1}/3, \quad (60)$$

де R_{k1} – опір однієї контактної площадки.

Контактний опір однієї площадки контактування для різнорідних контактів визначають як:

$$R_{k1} = \frac{\rho_{k1}(1 + \alpha_{k1}\vartheta_k) + \rho_{k2}(1 + \alpha_{k2}\vartheta_k)}{4r_0}, \quad (61)$$

де $\rho_{k1} = \rho_{k2} = 2,8 \cdot 10^{-6}$ – питомі опори матеріалу контактів; $\alpha_{k1} = 2,9 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_{k2} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ – температурні коефіцієнти опору; r_0 – еквівалентний радіус однієї круглої контактної площадки.

Звідки еквівалентний радіус однієї контактної площадки:

$$r_0 = \frac{\rho_{k1}(1 + \alpha_{k1}\vartheta_k) + \rho_{k2}(1 + \alpha_{k2}\vartheta_k)}{4R_{k1}}, \quad (62)$$

Сила контактного натискання на одну контактну площадку:

$$F_{k1} = \zeta \cdot H_B \cdot S_1 = \zeta \cdot H_B \cdot \pi \cdot r_0^2, \quad (63)$$

де $\zeta = 0,5$ – коефіцієнт, який враховує якість поверхні площинного контакту; $H_B = 75 \cdot 10^3$ – контактна твердість за Бринелем; S_1 – переріз однієї контактної площадки.

Сила контактного натискання F_{k1} на одну контактну площадку з опором R_{k1} :

$$F_{k1} = \left[\frac{\rho_{k1}(1 + \alpha_{k1}\vartheta_k) + \rho_{k2}(1 + \alpha_{k2}\vartheta_k)}{4R_{k1}} \right]^2 \zeta \cdot H_B \cdot \pi. \quad (64)$$

Для площинного контакту:

$$F_k = 3F_{k1}. \quad (65)$$

Геометричні розміри ділянок струмопроводу (рис. 1) на номінальний струм 630 А становлять: нерухомий контактоутримувач $40 \times 50 \times 6$ мм; рухомий контактоутримувач $35 \times 22 \times 6$ мм; гнучке з'єднання $45 \times 30 \times 4$ мм; шунт термобіметалевого розчеплювача $50 \times 20 \times 2,5$ мм; термобіметалева пластина $12 \times 18 \times 1,5$ мм; "еквівалентний" шунт $50 \times 25 \times 2,5$ мм.

Для перевірки достовірності розробленої методики та прийнятих допущень проведемо тепловий розрахунок струмопроводу базового вимикача на номінальний струм 630 А з відомими параметрами. Допустимі температури ізольованих провідників і деталей визначаються нагрівостійкістю (класом) ізоляції, а також механічною міцністю матеріалу деталей. Допустима температура контактів і контактних з'єднань визначається

температурою, що виключає їх інтенсивне окислення. Розрахунок проведемо для номінального режиму, тому використовуємо допустимі температури наведені в [4].

На першому етапі розрахунку задаємося нульовим тепловим потоком, обумовленим контактуванням головних контактів. Якщо при нульовому тепловому потоці розподіл температури лежить нижче допустимих температур контактних з'єднань, наведених у [4], тоді будемо збільшувати значення теплового потоку, обумовленого контактуванням головних контактів, до тих пір, поки температура хоча б однієї ділянки струмопроводу дорівнюватиме допустимій. Отриманий тепловий потік визначить силу контактного натискання. Якщо сила контактного натискання буде зовеликою, потрібно буде збільшувати переріз ділянок струмопроводу. Якщо при нульовому тепловому потоці від головних контактів розподіл температури лежить вище допустимих температур контактних з'єднань, наведених у [4], то розроблена методика та прийняті припущення неадекватно відображають процес нагрівання струмопроводу автоматичного вимикача при протіканні номінального струму.

Тепловий потік Φ_1 , обумовлений контактуванням ввідної шини 50×5 мм [5] з нерухомим контактоутримувачем (болтове з'єднання) за (55-58): $\Phi_1 = 0,68$ Вт/см.

На першому етапі розрахунку: $\Phi_2 = 0$ Вт/см.

Тепловий потік Φ_3 , обумовлений контактуванням рухомого контактоутримувача з гнучким з'єднанням (з'єднання клепокою): $\Phi_3 = 0,39$ Вт/см.

Тепловий потік Φ_4 , обумовлений контактуванням гнучкого з'єднання з тепловим розчеплювачем (з'єднання зваруванням): $\Phi_4 = 1,1$ Вт/см.

Тепловий потік Φ_5 , обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта (з'єднання пайкою): $\Phi_5 = 2,12$ Вт/см.

Тепловий потік Φ_6 , обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта з вивідною шиною (болтове з'єднанням): $\Phi_6 = 0,86$ Вт/см.

На рис. 3 зображений графік розподілу абсолютної температури вздовж струмопроводу базового автоматичного вимикача при підключенні ввідної шини розмірами 50×5 мм при струмі 630 А, $\Phi_2 = 0$ Вт/см. Згідно з рисунком температури усіх ділянок менші допустимих.

На рис. 4 зображений графік розподілу абсолютної температури

вздовж струмопроводу базового автоматичного вимикача при $\Phi_2 = 14$ Вт/см та зображені крапки, які відображають допустимі температури нагріву згідно [4]. Згідно з рисунком температура одного контакту дорівнює допустимій, а інших ділянок менша допустимої [4].

Знаходимо силу контактного натискання головних контактів за (59-65): $F_k = 116,64 \approx 120$ Н.

Отриманий розподіл температури вздовж струмопроводу автоматичного вимикача та сила контактного натискання відповідають експериментальним даним. Тому розроблена методика теплового розрахунку вважається коректною, а прийняті припущення припустимі.

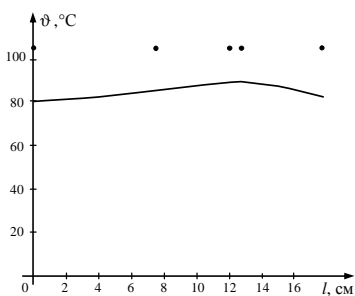


Рис. 3. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу базового автоматичного вимикача (ввідна шина 50×5 мм, струм 630А, $\Phi_2=0$ Вт/см).

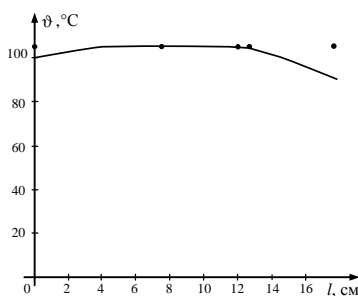


Рис. 4. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу базового автоматичного вимикача (ввідна шина 50×5 мм, струм 630А, $\Phi_2=14$ Вт/см).

В модернізованому вимикачі номінальний струм збільшено до 800А. Для збереження захисної характеристики струм через термобіметалеву пластину не повинен змінитися. Тому змінена довжина шунта: $l_{sh} = 2,5$ см. Тоді ширина "еквівалентного" шунта становить: $b_{eq} = 2,24 \approx 2,2$ см.

Нові геометричні розміри "еквівалентного" шунта: $22 \times 25 \times 2,5$ мм.

Тепловий потік Φ_1 , обумовлений контактуванням ввідної шини 60×6 мм [5] з нерухомим контактоутримувачем (болтове з'єднання) за (55-58): $\Phi_1 = 0,92$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням нерухомого контактоутримувача з частиною напівпетлі (з'єднання зварювання): $\Phi_2 = 1,12$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням головних контактів на першому етапі розрахунку: $\Phi_3 = 0$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням рухомого контактоутримувача з гнучким з'єднанням (з'єднання клепою): $\Phi_4 = 0,39$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням гнучкого з'єднання з тепловим розчеплювачем (з'єднання зварюванням): $\Phi_5 = 1,1$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта (з'єднання пайкою): $\Phi_6 = 3,42$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта з вивідною шиною (болтове з'єднання): $\Phi_7 = 1,03$ Вт/см.

На рис. 5 зображений графік розподілу абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача при підключенні ввідної шини розмірами 60×6 мм при струмі 800А, $\Phi_3 = 0$ Вт/см. Згідно з рисунком температура усіх ділянок менші допустимих.

На рис. 6 зображений графік розподілу абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача при $\Phi_3 = 10$ Вт/см та зображені крапки, які відображають допустимі температури нагріву згідно [4]. Згідно з рисунком температура одного контакту дорівнює допустимій, а інших ділянок менша допустимої [4].

Сила контактного натискання: $F_k = 699,08 \approx 700$ Н.

Отримана сила контактного натискання завелика. Тому потрібно зменшувати виділення тепла, тобто збільшити переріз окремих ділянок струмопроводу.

Переріз ввідної шини збільшено до 60×10 мм. Переріз нерухомого контактоутримувача збільшено до $50 \times 55 \times 8$ мм.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням ввідної шини нерухомим контактоутримувачем: $\Phi_1 = 0,56$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням нерухомого контактоутримувача з частиною напівпетлі: $\Phi_2 = 0,98$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням головних контактів: $\Phi_3 = 0$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням рухомого контактоутримувача з гнучким з'єднанням (з'єднання клепою): $\Phi_4 = 0,39$ Вт/см.

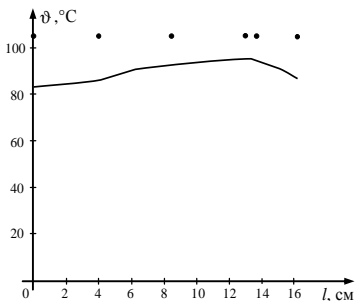


Рис. 5. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача (ввідна шина 60×6 мм, струм 800А, $\Phi_3=0$ Вт/см).

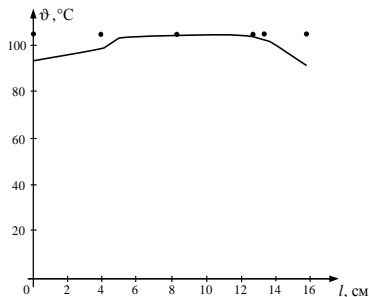


Рис. 6. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача (ввідна шина 60×6 мм, струм 800А, $\Phi_3=10$ Вт/см).

Тепловий потік, обумовлений контактуванням гнучкого з'єднання з тепловим розчеплювачем (з'єднання зварюванням): $\Phi_5 = 1,1$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта (з'єднання пайкою): $\Phi_6 = 3,42$ Вт/см.

Тепловий потік, обумовлений контактуванням "еквівалентного" шунта з вивідною шиною (болтове з'єднання): $\Phi_7 = 0,66$ Вт/см.

На рис. 7 зображений графік розподілу абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача при підключенні ввідної шини розмірами 60×10 мм при струмі 800А, $\Phi_3 = 0$. Згідно з рисунком температури усіх ділянок менші допустимих.

На рис. 8 зображений графік розподілу абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача при $\Phi_3 = 24$ Вт/с та зображені крапки, які відображають допустимі температури нагріву згідно [4]. Згідно з рисунком при температура одного контакту дорівнює допустимій, а інших ділянок менша допустимої [4].

Сила контактного натискання: $F_K = 128,79 \approx 130$ Н.

Дані геометричні розміри та величина сили контактного натискання є остаточними.

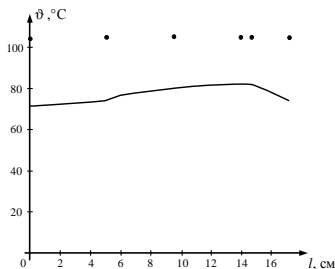


Рис. 7. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача (ввідна шина 60×10 мм, струм 800А, $\Phi_3=0$ Вт/см).

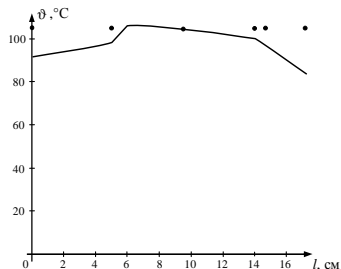


Рис. 8. Розподіл абсолютної температури вздовж струмопроводу модернізованого автоматичного вимикача (ввідна шина 60×10 мм, струм 800А, $\Phi_3=24$ Вт/см).

Висновки. 1. Розроблено методику теплового розрахунку, яка дозволяє ефективно розрахувати розподіл температури вздовж струмопроводу при протіканні електричного струму.

2. Результати теплових розрахунків підтвердили можливість модернізації автоматичних вимикачів за рахунок підвищення номінального струму зі збереженням базових габаритних розмірів.

Список літератури: 1. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967. – 378 с. 2. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 2. – М.: Наука, 1974. – 656 с. 3. ГОСТ 17441-84. Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний. Введ. 29.11.84. – М.: Госстандарт, 1984. – 22 с. 4. ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. Введ. 01.01.1991. – М.: Госстандарт, 1991. – 31 с. 5. Правила устройства электроустановок. – Харьков: Форт, 2011. – 708 с.

*Надійшла до редколегії 24.04.2012
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*