

МОДЕЛЮВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ СТРУМОПРОВІДНИХ ШИН РІЗНОГО ПРОФІЛЮ

Кириченко О. С.¹, Костюченко В. І.², Захаров Д. О.¹

¹Миколаївський національний аграрний університет,

²Київська державна академія водного транспорту
імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного

Виконано моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин прямокутного і квадратного профілю з квадратним отвором при різних варіаціях сили струму. Отримано електротеплові характеристики струмопровідних шин різного профілю в адіабатичній постановці та з урахуванням розсіювання теплоти в оточуюче середовище. Встановлено, що струмопровідна шина квадратного профілю з квадратним отвором нагрівається менше ніж струмопровідна шина прямокутного профілю при рівній силі струму в обох шинах та однакової матеріалоемності, різниця в нагріві цих шин зростає при збільшенні величини сили струму внаслідок неоднакового розсіювання тепла. Продемонстровано зручність використання чисельних методів розрахунку для візуалізації стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю.

Постановка проблеми. Струмопровідні шини широко використовуються в електричних підстанціях і високовольтних розподільчих пристроях систем електропостачання. В якості матеріалу для їхнього виготовлення, як правило, використовується мідь, алюміній або сталь. До переваг використання струмопровідних шин відносяться зручність їх монтажу та експлуатації, компактність конструкції, простота огляду і висока експлуатаційна надійність. Струмопровідні шини в меншій степені є горючими в порівнянні зі звичайними силовими кабелями.

Для розрахунку струмопровідних шин електричних підстанцій і високовольтних розподільчих пристроїв систем електропостачання використовуються стандартні методики на основі аналітичних методів розрахунку [7, 9]. З точки зору наочної візуалізації фізики процесів, які відбуваються в робочих і аварійних режимах роботи струмопровідних шин, кращим є застосування чисельних методів розрахунку, наприклад, методу скінченних елементів. Через це актуальним є використання нових підходів до моделювання фізичних процесів в матеріалі струмопровідних шин різного профілю з кращою наочною візуалізацією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість робіт присвячена дослідженню струмопровідних шин різного профілю на електродинамічну стійкість. В роботах [1, 2, 4, 5] дослідження струмопровідних шин на електродинамічну стійкість проводилось з використанням аналітичних методів розрахунку.

Про складність дослідження нестационарних і стаціонарних теплових полів різного електроустаткування на основі аналітичних методів розрахунку зазначено в [8].

В роботах [3, 6] наведено переваги використання чисельних методів розрахунку, приведено приклади чисельного вирішення тривимірного рівняння теплопроводності.

Проведений огляд останніх досліджень і публікацій показав, що питання моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю досліджено не в повній мірі.

Мета статті. Висвітлення результатів моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю на основі розроблених математичних моделей з чисельним розв'язком, а також аналіз отриманих електротеплових характеристик для струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором.

Основні матеріали дослідження. В [1, 2] наведено рівняння теплопроводності в декартовій системі координат x, y, z :

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + p_0, \quad (1)$$

де c, ρ – теплоємність і густина відповідно;

θ, t – температура та час відповідно;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коефіцієнти теплопроводності уздовж координат x, y, z ;

$p_0 = f(x, y, z, t)$ – теплопродуктивність одиниці об'єму струмопровідної шини, яка залежить від координат та часу.

Диференціальне рівняння (1) в загальній постановці описує нестационарне температурне поле в тривимірному анізотропному просторі.

Під час виконання моделювання теплових полів струмопровідних шин різного профілю в усталених режимах їх роботи похідна температури від часу в лівій частині рівняння теплопроводності (1) буде дорівнювати нулю, при цьому саме рівняння можна записати в наступному вигляді:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + p_0 = 0. \quad (2)$$

Слід зазначити, що рівняння (2) не має аналітичного розв'язку при його застосуванні для аналізу електротеплових процесів в струмопровідних шинах довільної конструкції. Зважаючи на це, а також для кращої наочної візуалізації, для проведення моделю-

вання теплових полів струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором створено математичні моделі для чисельного розв'язку. До основних переваг математичних моделей на основі чисельних методів розрахунку відносяться наочна візуалізація фізики процесів за рахунок зручного представлення та інтерпретації результатів в графічній і/або табличній формі.

На рис. 1 показано деякі основні перерізи струмопровідних шин електричних підстанцій і високовольтних розподільчих пристроїв.

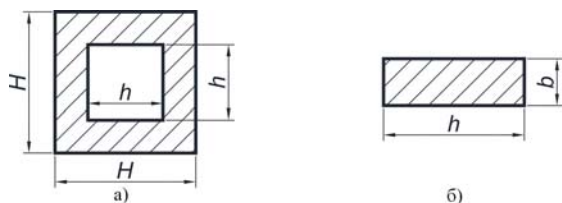


Рисунок 1 – Струмопровідні шини квадратного профілю з квадратним отвором (а) і прямокутного профілю (б)

На рис. 2 і рис. 3 представлено геометричні моделі струмопровідних шин однакової матеріалоемності довжиною 0,7 м прямокутного профілю 100×10 мм та квадратного профілю 40×40 мм з квадратним отвором 24,5×24,5 мм відповідно.



Рисунок 2 – Прямокутна струмопровідна шина 100×10 мм та кріплення до ізолятора ІОР-10-7,5

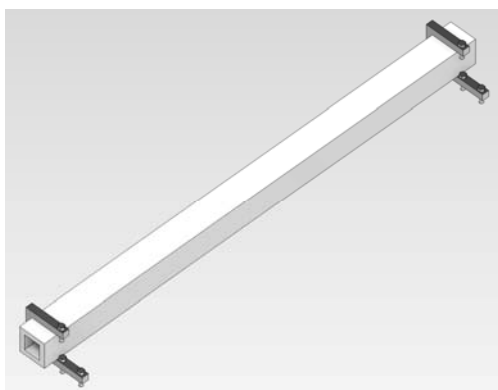


Рисунок 3 – Квадратна струмопровідна шина 40×40 мм з квадратним отвором 24,5×24,5 мм та кріплення до ізолятора ІОР-10-7,5

Струмопровідні алюмінієві шини за допомогою сталевого кріплення монтуються до фарфорових опорних ребрих ізоляторів ІОР-10-7,5 (на рис. 1 і рис. 2 ізолятори ІОР-10-7,5 не показано).

В якості чисельних методів розрахунку набули поширення так звані "сіткові" методи розрахунку, зокрема, метод скінченних різниць і метод скінченних елементів.

Обчислювальні (чисельні) методи – методи вирішення математичних задач в чисельному вигляді.

Багато чисельних методів є частиною бібліотек математичних програм, які застосовують в системі підготовки інженерів технічних спеціальностей в якості важливої складової навчання та досліджень.

Основами для обчислювальних (чисельних) методів є: рішення систем лінійних рівнянь; інтерполявання і наближене обчислення функцій; чисельне інтегрування; чисельне рішення системи нелінійних рівнянь; чисельне рішення звичайних диференціальних рівнянь; чисельне рішення рівнянь в часткових похідних (рівнянь математичної фізики); рішення задач оптимізації.

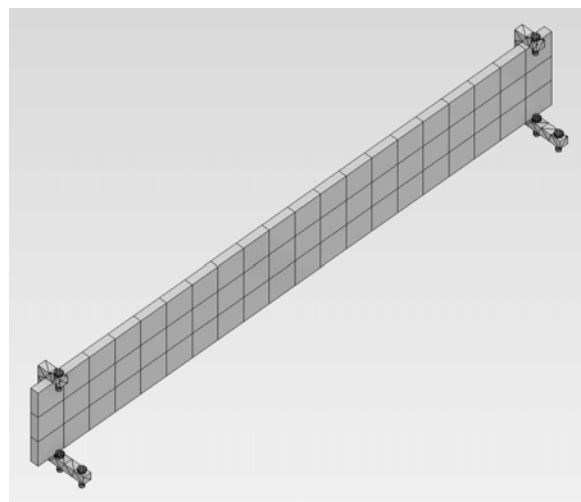


Рисунок 4 – Кінцево-елементна модель прямокутної струмопровідної шини та кріплення до ізолятора

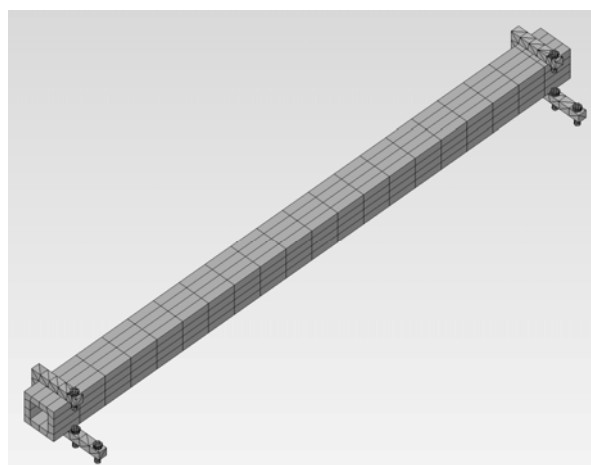


Рисунок 5 – Кінцево-елементна модель квадратної струмопровідної шини з квадратним отвором та кріплення до ізолятора

Метод скінченних різниць – це чисельний метод рішення диференціальних рівнянь, заснований на заміні похідних різницевиими схемами. Даний метод є сітковим методом.

Метод скінченних елементів – це чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частковими похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки і електродинаміки.

Метод скінченних елементів складніший за метод скінченних різниць в реалізації. Проте в методу скінченних елементів є ряд переваг, що виявляються на реальних завданнях: довільна форма розрахункової області; сітку можна зробити більш рідкісною в тих місцях, де особлива точність не потрібна.

Сіткові моделі струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором показано на рис. 4 і рис. 5 відповідно.

При стаціонарному тепловому режимі температура струмопровідних шин в часі залишається постійною. Гранично допустимим струмом для обох варіантів струмопровідних шин, що розглядаються, є величина 1910 А. Слід відмітити, що температура струмопровідних шин в нормальних штатних робочих режимах не повинна перевищувати 70 °С [7, 9].

Для проведення моделювання програмно задано основні електротехнічні матеріали моделей та їх властивості. В якості граничної умови прийнято, що температура оточуючого середовища (повітря) навколо струмопровідних шин становить 20 °С.

Геометричні розміри струмопровідних шин, які використано в розрахунку:

- квадратного профілю з квадратним отвором – $H = 40$ мм; $h = 24,5$ мм (рис. 1, а);
- прямокутного профілю – $h = 100$ мм; $b = 10$ мм (рис. 1, б).

На рис. 6 і рис. 7 продемонстровано результати моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором відповідно з урахуванням розсіювання в оточуюче середовище (повітря навколо шин) за рахунок вільної конвекції при струмі 250 А.



Рисунок 6 – Стаціонарне теплове поле прямокутної струмопровідної шини з урахуванням конвективного розсіювання теплоти в оточуюче середовище при струмі 250 А



Рисунок 7 – Стаціонарне теплове поле квадратної струмопровідної шини з квадратним отвором з урахуванням конвективного розсіювання теплоти в оточуюче середовище при струмі 250 А

На основі розроблених математичних моделей отримано електротеплові характеристики струмопровідних шин при варіаціях струму від 0 до 1910 А (рис. 8).

На рис. 8 крива 1 представляє собою електротеплову характеристику $\theta = f(I)$ в адіабатичному режимі одночасно як для прямокутної шини, так і для квадратної шини з квадратним отвором, враховуючи їх однакову матеріалоемність. Адіабатичний тепловий режим розглядався для оцінювання верхнього граничного значення температури обох шин. Так при значенні сили струму 250 А температура адіабатичного нагріву становить 25,9 °С, а при значенні граничного допустимого струму 1910 А – 342,3 °С.

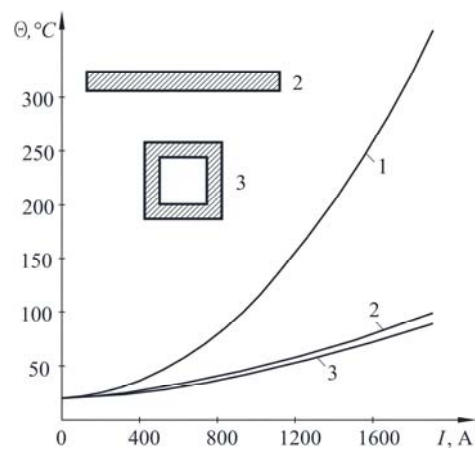


Рисунок 8 – Електротеплові характеристики $\theta = f(I)$ струмопровідних шин різного профілю в діапазоні струмів від 0 до 1910 А:

1 – в адіабатичній постановці для прямокутної і квадратної шин; 2, 3 – з урахуванням конвективного розсіювання теплоти в оточуюче середовище для прямокутної і квадратної шин відповідно

Криві 2 і 3 на рис. 8 представляють собою залежності з урахуванням вільної конвекції. Аналізуючи ці криві можна побачити, що електротепловий нагрів з урахуванням вільної конвекції набагато менший в діапазонах великих струмів. Так при значенні сили струму 250 А температура нагріву прямокутної струмопровідної шини становить 22,7 °С, а квадратної струмопровідної шини з квадратним отвором –

22,4 °C. Проте при силі струму 1500 А, яке не перевищує граничного значення 1910 А, температура нагріву прямокутної струмопровідної шини становить 73,3 °C, а квадратної струмопровідної шини з квадратним отвором – 66,9 °C.

Таким чином, на рис. 8 показано результати моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором відповідно в різних режимах роботи.

Висновки. В роботі виконано моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю з однаковою матеріалоемністю:

1. Створено чисельні математичні моделі для струмопровідних шин прямокутного та квадратного профілю з квадратним отвором в адиабатичній постановці та з урахуванням теплообміну за рахунок вільної конвекції в оточуюче середовище при варіаціях струму від 0 до 1910 А.

2. Установлено, що в діапазоні струмів від 0 до 250 А температури адиабатичної моделі та моделі з урахуванням теплового розсіювання відрізняються в незначній мірі.

3. При струмах близько 1500 А для математичної моделі з урахуванням теплового розсіювання температура шини прямокутного профілю становить 73,3 °C, тобто перевищує допустиму температуру 70 °C.

За цих же умов температура шини квадратного профілю з квадратним отвором знаходиться в допустимих межах і становить 69,9 °C.

Список використаних джерел

1. Долин А. П. Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений / А. П. Долин // Научный журнал "Электрические станции". – М.: Энергопрогресс, 2005. – № 4. – С. 49-53.

2. Долин А. П. Применение современных шинодержателей в отечественных конструкциях жесткой ошиновки / А. П. Долин, Л. Е. Егорова // "Электроэнергия. Передача и распределение". – М.: ООО "Кабель", 2012. – № 4(13). – С. 64-69.

3. Кириченко О. С. Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного лабораторного стенду з теоретичної електротехніки / О. С. Кириченко // Матеріали XIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Перспективна техніка і технології – 2017". – Миколаїв: МНАУ, 2017. – С. 50-53.

4. Kyrychenko O. Влияние геометрических параметров изоляторов и токопроводящих шин на электродинамическую стойкость при коротком замыкании / Olexandr Kyrychenko, Igor Sidorika // Motrol Motorization and power industry in agriculture. – Vol. 18. – № 2. – Lublin, 2016. – С. 33-39.

5. Kyrychenko O. Electrodynamics stability of isolators and bus bars in a short circuit / O. Kyrychenko // Вісник аграрної науки Причорномор'я: науково-теоретичний фаховий журнал. – Миколаїв: МНАУ, 2015. – Вип. 3(73). – С. 192-199.

6. Кучерявая И. Н. Компьютерное моделирование

тепловых процессов в однофазном трансформаторе с учетом анизотропии тепловых свойств активных элементов / И. Н. Кучерявая // Техническая электродинамика. – Киев, 2014. – № 1. – С. 20 – 27.

7. Неклепов Б. Н. Электрическая часть электростанций / Б. Н. Неклепов. – М.: Энергия, 1976. – 552 с.

8. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

9. Электрическая часть электростанций / С. В. Усов, Б. Н. Михалев, А. К. Черновец. – Л.: Энергоатомиздат, 1978. – 616 с.

Аннотация

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ШИН РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

Кириченко А. С., Костюченко В. И.,
Захаров Д. А.

Выполнено моделирование стационарных тепловых полей токопроводящих шин прямоугольного и квадратного профиля с квадратным отверстием при различных вариациях силы тока. Получены электро-тепловые характеристики токопроводящих шин различного профиля в адиабатической постановке и с учетом рассеивания теплоты в окружающую среду. Установлено, что токопроводящая шина квадратного профиля с квадратным отверстием нагревается меньше чем токопроводящая шина прямоугольного профиля при равной силе тока в обеих шинах и одинаковой материалоемкости, разница в нагреве этих шин возрастает при увеличении величины силы тока вследствие неодинакового рассеивания тепла. Продемонстрировано удобство численных методов расчета для визуализации стационарных тепловых полей токопроводящих шин различного профиля.

Abstract

SIMULATION OF STATIONARY THERMAL FIELDS OF CURRENT-CONDUCTING BUSES WITH DIFFERENT PROFILES

O. Kyrychenko, V. Kostuchenko,
D. Zakharov

The modeling of stationary thermal fields of conductive tires of rectangular and square profile with a square aperture at different variations of current strength is performed. The electrothermal characteristics of conducting tires of various profiles in the adiabatic setting and taking into account the dissipation of heat in the environment are obtained. It has been established that the conductive square profile square tube is heated less than the conductive bus of the rectangular profile at equal strength of the current in both tires and the same material content, the difference in the heating of these tires increases with the increase of the value of the current due to unequal heat dissipation. The convenience of using numerical calculation methods for visualization of stationary thermal fields of conductive tires of various profiles is demonstrated.