

# **АЛЬТЕРНАТИВНІ X-ШИНИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ**

Шифр «Шина»

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність роботи** полягає в створенні більш ефективних систем передачі та розподілення електроенергії на основі струмопровідних шин нестандартної геометрії.

**Мета роботи** полягає у визначенні основних фізико-технічних характеристик струмопровідних шин з нестандартним профілем, а саме Х-шин.

**Об'єкт дослідження:** струмопровідна шина нестандартної Х-образної геометрії в перетині.

**Предмет дослідження:** фізичні властивості нестандартного струмопроводу, а саме механічні, температурні та електричні явища та їх впливи при різних початкових умовах.

**Методи дослідження:** порівняльний аналіз, аналітичний аналіз, імітаційне моделювання.

**Задачі дослідження:** визначення основних положень, встановлення особливостей характеристик стандартних шинопроводів у порівнянні зі стандартним шинопроводом прямокутного перетину, формування струмопроводу з альтернативною геометрією, визначення характеристик струмопроводу з нестандартною геометрією.

**Ключові слова:** шина струмопровідна, шинопровід, розподілення електроенергії, механічна стійкість, електродинамічна стійкість, термічна стійкість

### Загальна характеристика роботи

**Розділ 1.** Присвячений встановленню основних положень використання струмопровідних шин.

**Розділ 2.** Присвячений встановленню основних відмінностей в експлуатаційних характеристиках стандартних шинопроводів, визначення моделі альтернативної струмопровідної шини, окреслення методики дослідження.

**Розділ 3.** Присвячений імітаційному моделюванню альтернативних шин

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	4
Розділ 1. Загальні відомості про шинопроводи розподільних пристроїв..	5
Розділ 2. Аналітичний огляд шинопроводів.....	10
Розділ 3. Результати дослідження моделі x-шини.....	15
Висновок .....	22
Список літератури.....	23

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- РУ - Розподільча установка
- ВРУ - Високовольна розподільча установка
- ГРУ - Головна розподільча установка
- ЛЕП - Лінія електропередач
- ЕС - Електрична станція
- ТВП - Трансформатор власних потреб
- ТЕЦ - Тепло-електроцентраль
- КЕС - Конденсаційна електростанція
- КЗ - Коротке замикання
- ТП - Трансформаторна підстанція
- КЛ - Кабельна лінія

## ВСТУП

Одним з фундаментів на який спирається сучасна цивілізація являється електроенергетика. В цій галузі знань постійно активно працюють сотні тисяч талановитих науковців та інженерів. Серед багатьох важливих задач електроенергетики підвищення ефективності роботи електроустаткування стоїть на першому місці.

Пошук нових технологій також не обходить стороною електричні системи передачі електричної енергії які включають в себе ЛЕП, електричні з'єднання електроустаткування та лінії розподілення електроенергії (шинопроводи, струмопроводи, КЛ)

Актуальність роботи полягає в створенні більш ефективних систем передачі та розподілення електроенергії на основі струмопровідних шин нестандартної геометрії.

Метою даної роботи є визначення основних електротехнічних характеристик струмопровідних шин з нестандартним профілем, а саме Х-шин.

Об'єкт дослідження: струмопровідна шина нестандартної Х-образної геометрії в перетині.

Предмет дослідження: фізичні властивості нестандартного струмопроводу, а саме механічні, температурні та електричні явища та їх впливи при різних початкових умовах.

Методи дослідження: порівняльний аналіз, аналітичний аналіз, імітаційне моделювання.

Задачі дослідження: визначення основних положень, встановлення особливостей характеристик стандартних шинопроводів у порівнянні зі стандартним шинопроводом прямокутного перетину, формування струмопроводу з альтернативною геометрією, визначення характеристик струмопроводу з нестандартною геометрією.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ШИНОПРОВОДИ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИБОРІВ

Важливим моментом при проектуванні електричних установок є вибір способу електричних з'єднань. Широке застосування знаходять електричні з'єднання з використанням струмопровідних ізольованих та неізольованих шин з різними профілями та площами перетину. Площа перерізу шин повинна бути достатньою для передачі робочого струму найбільш потужного агрегату. В закритих РУ до 20 кВ включно, шини виконують з полос прямокутного перерізу. Провідники з прямокутним перерізом більш економічні, ніж з круглим, оскільки при рівній площі перерізу мають більшу бокову поверхню охолодження, менший коефіцієнт поверхневого ефекту і більший момент опору (по одній осі) [1].

Найбільші розміри перерізу однополосних алюмінієвих шин – 120×10мм з  $I_{\text{доп}} = 2070$  А. При великих струмах застосовують багатополосні шини – пакети з двох та трьох полос на фазу. В багатополосних шинах на змінному струмі внаслідок ефекту близькості струм по перерізу розподіляється нерівномірно. Так, в триполосному пакеті в крайніх полосах протікає приблизно по 40%, а в середній – тільки 20% повного струму фази. Це призводить до неефективного використання матеріалу в багатополосних шинах, тому застосовувати більш ніж три полоси не рекомендується. При робочих струмах, які перевищують допустимі для двополосних шин, необхідно застосовувати шини коробчастого профілю – пакет з двох швелерів на фазу, а при ще більших струмах - трубчасті шини квадратного та круглого перерізу.

Основне електричне обладнання електростанцій та підстанцій і апарати з'єднуються між собою провідниками різного типу, які утворюють струмопровідні частини електричної установки. Найбільш поширеним типом провідників в електроустановках електроенергетичного комплексу (ЕС, ГРУ, ВРУ, РУ) є шини, які виробляються з таких матеріалів як мідь, алюміній, сталь і

мають різні профілі. За допомоги шин виконуються електричні зв'язки між різним електрообладнанням та лініями електропередачі (ЛЕП).

Наприклад в межах турбінного відділення ТЕЦ, від виводів генератора до фасадної стіни струмопровідні частини виконуються у вигляді шинного моста з жорстких порожнистих алюмінієвих шин або комплектним пофазно-екранованим струмопроводом (в колах генераторів потужністю 60 МВт і вище). На ділянці між турбінним відділенням та ГРУ з'єднання виконується зазвичай шинним мостом. Всі з'єднання всередині закритого РУ 6–10 кВ, включаючи збірні шини, виконуються жорсткими голими алюмінієвими шинами прямокутного або коробчастого перерізу.

В деяких конструкціях ВРУ частина або вся ошиновка (рис. 1.1) може виконуватись алюмінієвими трубами.

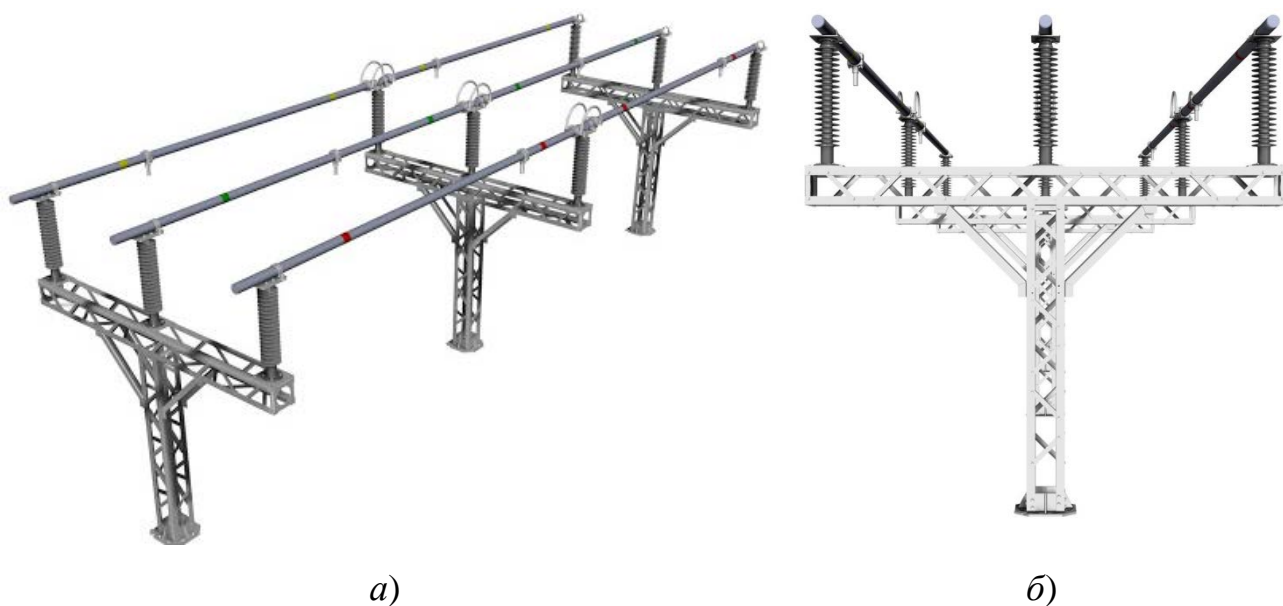


Рисунок 1.1 – Жорстка ошиновка алюмінієвими шинами круглого перетин:

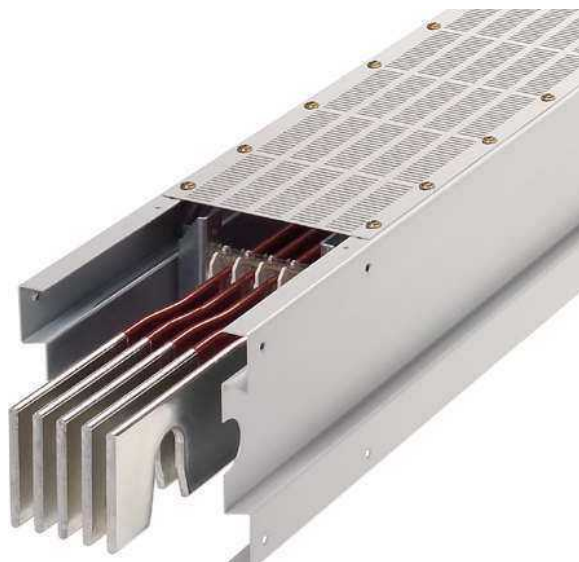
*а* – вигляд в аксонометрії, *б* – вигляд в проекції

На ділянках трансформаторів власних потреб (ТВП) з'єднання виконуються також жорсткими алюмінієвими шинами.

В колах ліній 6–10 кВ вся ошиновка до реактора і за ним, а також в шафах комплектних РУ виконується прямокутними алюмінієвими шинами. Безпосередньо до споживачів відходять кабельні лінії.

В блоці генератор–трансформатор на КЕС ділянка від генератора до блочного трансформатора та відпайка до ТВП виконуються комплектом пофазно-екранованим струмопроводом.

На підстанціях у відкритій частині можуть застосовуватись проводи АС або жорстка ошиновка алюмінієвими трубами. З'єднання трансформатора з закритим РУ 6–10 кВ або комплектом РУ 6–10 кВ може здійснюватись шинним мостом або закритим комплектом шинопроводом (рис. 1.2 а). В РУ 6–10 кВ застосовується жорстка ошиновка (рис. 1.2 б).



а)



б)

Рисунок 1.2 – Види шин: а - фрагмент комплекту шинопроводу, б - жорстка ошиновка трансформатора

В закритих РУ 6-10 кВ ошиновка і збірні шини виконуються жорсткими алюмінієвими шинами. При струмах до 3000 А застосовуються одно- та двополосні шини. При великих струмах рекомендуються шини коробчастого перерізу, тому що вони забезпечують менші втрати від ефекту близькості і поверхневого ефекту, а також кращі умови охолодження.

Для кращої тепловіддачі і зручності експлуатації шин красять: при змінному струмі фази А – жовтим, фази В – зеленим і фази С – червоним кольорами; при постійному струмі додатна шина червоним, від’ємна – синім кольором.

Вибір перерізу шин здійснюється за нагрівом (за допустимим струмом). При цьому враховуються не тільки нормальні, а й післяаварійні режими, а також ремонтні режими. Умова вибору,

$$I_{max} \leq I_{доп}, \quad (1)$$

де -  $I_{доп}$ , допустимий струм в шинах вибраного перерізу, який для неізолюваних проводів та покрашених шин визначається за виразом,

$$I_{доп} = I_{доп.ном} \cdot \sqrt{\frac{70 - \Theta_0}{45}}, \quad (2)$$

де  $I_{доп}$  - допустимий струм за таблицями при температурі повітря  $\Theta_{0,ном} = 25^\circ\text{C}$ ,

$\Theta_0$  – дійсна температура повітря

Перевірка шин на термічну стійкість при КЗ здійснюється за умовами,

$$\Theta_k \leq \Theta_{к.доп} \text{ або } q_{min} \leq q \quad (3)$$

де  $\Theta_k$  – температура шин при нагріванні струмом КЗ;

$\Theta_{к.доп}$  – допустима температура нагрівання шин при КЗ;

$q_{min}$  – мінімальний переріз за термічною стійкістю;

$q$  – вибраний переріз.

Одним з негативних явищ що впливають на експлуатаційні показники розподільних енергетичних установок, являється взаємний електродинамічний вплив струмів в сусідніх провідниках. Жорсткі шини, закріплені на ізоляторах,

є динамічною коливальною системою, яка знаходиться під впливом електродинамічних сил. В такій системі виникають коливання, частота яких залежить від маси і жорсткості конструкцій. Електродинамічні сили, що виникають при КЗ, мають складові, які змінюються з частотою 50 і 100 Гц. Якщо власні частоти коливальної системи шини–ізолятори збігаються з цими значеннями, то навантаження на шини і ізолятори зростають через резонанс. Якщо власні частоти менші за 30 і більше 200 Гц, то механічного резонансу не виникає. В більшості конструкцій шин, що практично застосовуються, ці умови дотримуються, тому [2] не вимагає перевірки на електродинамічну стійкість з врахуванням механічних коливань. При проектуванні нових конструкцій РУ з жорсткими шинами визначення частоти власних коливань здійснюється за виразом,

$$f_0 = \frac{K}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{j}{q}} \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує матеріал шин (для алюмінія – 173,2; для міді – 125,2);

$l$  – довжина прогону між ізоляторами, м;

$j$  – момент інерції поперечного перерізу шини відносно осі, яка перпендикулярна до напрямку згинальної сили,  $\text{г} \cdot \text{см}^2$ ;

$q$  – поперечний переріз шини,  $\text{см}^2$ .

Змінюючи довжину прогону і форму перерізу шин, добиваються того, щоб уникнути механічного резонансу, тобто  $f_0 > 200$  Гц.

## 2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ШИНОПРОВОДІВ

Основними параметрами шинопроводів являється їх геометричний профіль у поперечному перетині і площа перетину. Основні типи струмопровідних шин наведено на рис. 2.1. Струмопровідні шини за допомогою сталевого кріплення монтуються до керамічних опорних ребристих ізоляторів, які встановлено на поперечні до шин основи.

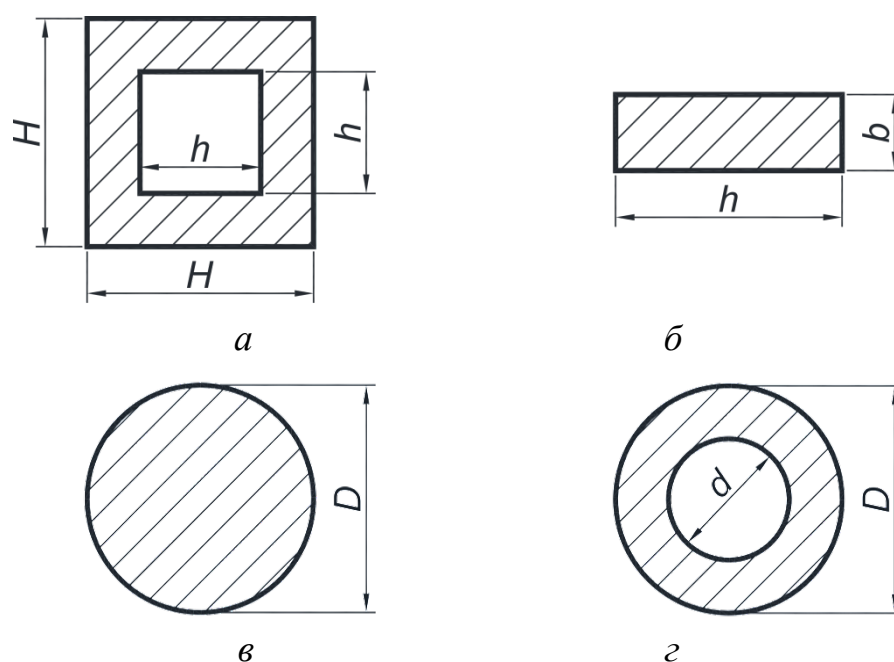


Рисунок 2.1 - Основні типи перерізів струмопровідних шин: *a* – квадрат з квадратним отвором; *б* – прямокутник; *в* – круг; *з* – круг с круговим отвором

Крім того, в деяких випадках, наприклад при нормальних струмах більше 3000А або при значних електродинамічних навантаженнях, використовують складні шинопроводи (рис. 2.2). У порівнянні з прямокутною шиною (з міді) максимально можливого перетину [2] у  $1250 \text{ мм}^2$ , шини коробчастого профілю (рис. 2.2 *a*) і шини з чотирьох смуг (рис. 2.2 *б*) мають відповідно питому щільність струму  $3,5 \text{ А/мм}^2$  і  $2,24 \text{ А/мм}^2$  проти  $2,47 \text{ А/мм}^2$ . В останньому випадку щільність струму менша ніж у прямокутних звичайних шинах.

Очевидно що шини (рис. 2.2 б) мають також обмежену електродинамічну стійкістю оскільки при значних струмових навантаженнях електродинамічні сили кожної з складових шин будуть спрямовані в середину пакета з деформацією вигін. Цій деформації пакет погано протидіє оскільки шини лежать плазом по відношенню до цих електродинамічних сил.

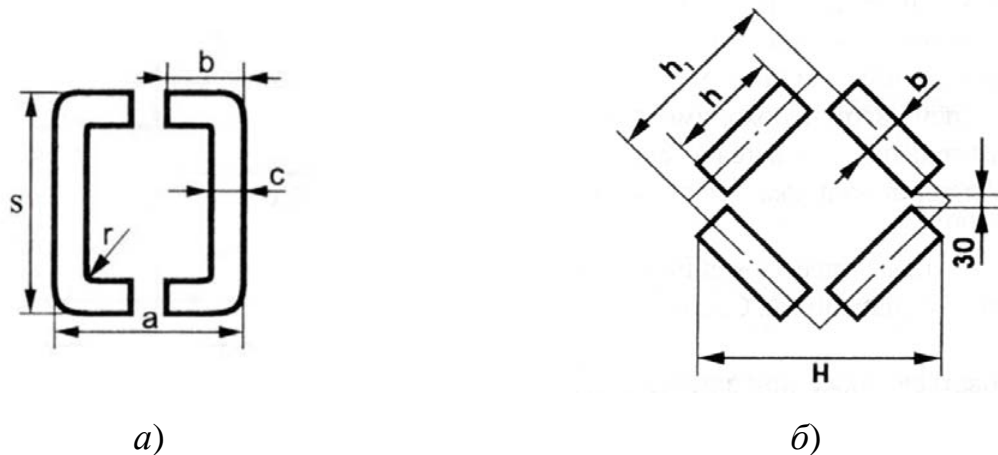


Рисунок 2.2 - Складні шинопроводи: а – шини коробчастого перерізу; б – чотирикутних шин з розташуванням смуг по сторонах квадрата («порожній пакет»)

Цей факт спонукає пошук інших варіантів шинопроводів, одним з яких може бути варіант використання Х-шини (рис. 2.3).

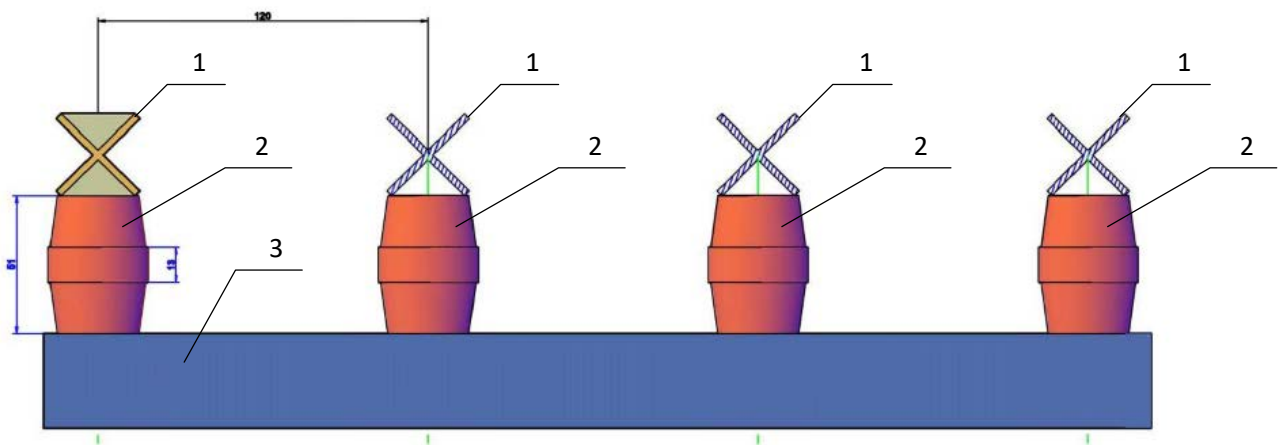


Рисунок 2.3 – Шинопровід з Х-профілем у поперечному перетині: 1 – Х-шина, 2 – ізолятор, 3 – траверза.

Очевидною перевагою X-шини перед шинами прямокутного перетину відповідної площини, є збільшена у 1,78 разів проща поверхні, що неодмінно покращить теплообмінні процеси. Крім того X-шини мають кращі механічні властивості а саме збільшену жорсткість до деформації на згин.

Інші фізичні властивості X-шин можна визначити за допомоги чисельних методів розрахунку [3].

Перш за все інтерес представляє термічне навантаження та термічна стійкість X-шин.

Температурне поле – це сукупність значень температури в усіх точках даної розглядуваної області та в часі.

Ізотермічна поверхня – це поверхня рівних температур. Властивості ізотермічних поверхонь: а) ізотермічні поверхні не перетинаються; б) в нестационарних процесах ізотермічні поверхні переміщуються в просторі.

При тепловому аналізі, як правило, розглядають тіла, так званої, простої або класичної форми. Таких тіл три: нескінченна або необмежена пластина (це пластина, у якій товщина в кілька разів менше довжини та ширини); нескінченний циліндр (це циліндр, у якого діаметр в кілька разів менше довжини циліндра) і куля.

Ізотермічні поверхні в нескінченній пластині – це паралельні площині; в нескінченному циліндрі – це вкладені один в одній циліндри меншого діаметру; в кулі – це вкладені одна в одну сфери.

Гradient температури (позначається  $grad T$  або  $\nabla T$ ) – вектор, спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні, в бік збільшення температури і чисельно рівний зміни температури на одиниці довжини.

$$grad (T) = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}, \frac{K}{m}, \quad (2.1)$$

де  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – одиничні вектори або орти в декартовій системі координат.

Для одномірних температурних полів градієнт температури дорівнює:

$$\text{grad } (T) = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} \frac{K}{m} \quad (2.2)$$

Кількість теплоти ( $Q_\tau$ ) – це кількість теплової енергії, яка отримана або віддана тілом або що проходить через це тіло за деякий час  $\tau$  в результаті теплообміну, вимірюють в джоулях [Дж] або калоріях [кал].

Тепловий потік (позначають  $\vec{Q}$ ) – це кількість теплоти, що проходить через задану  $i$  нормальну до напрямку розповсюдження теплоти поверхню в одиницю часу

$$\vec{Q} = \vec{n}_0 \frac{dQ_\tau}{d\tau}, \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

де  $\vec{n}_0$  – одиничний вектор;  $\tau$  – час, с.

Процес передачі теплоти теплопровідністю в твердому тілі супроводжується зміною температури як в просторі, так за часом:  $t = f(x, y, z, \tau)$ , де  $x, y, z$  – координати точки;  $\tau$  – час. Дана функція визначає температурне поле в розглядуваному тілі. Якщо температура тіла є функцією координат і часу, то температурне поле буде нестационарним, тобто залежним від часу,  $t = f(x, y, z, \tau); \partial t / \partial \tau \neq 0$ . Таке поле відповідає неусталеному тепловому режиму теплопровідності. Якщо температура є функцією тільки координат і не змінюється за часом, то температурне поле буде стаціонарним:  $t = f(x, y, z); \partial t / \partial \tau = 0$ . При стаціонарному теплообміні тепловий потік не змінюється за часом і його розраховують за формулою,

$$Q = \frac{Q_\tau}{\tau}, \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

В розрахунках теплообміну використовують три питомі теплові потоки: поверхневу густину теплового потоку, лінійну густину теплового потоку та об'ємну густину теплового потоку.

Поверхнева густина теплового потоку (позначають:  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>) – це тепловий потік, віднесений до площі поверхні тіла:

$$\vec{q} = \frac{d\vec{Q}}{dF}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.5)$$

де  $F$  – площа, м<sup>2</sup>.

В стаціонарному режимі теплообміну:

$$q = \frac{Q_\tau}{\tau F} = \frac{Q}{F} \quad (2.6)$$

звідки випливає,

$$Q = qF; Q_\tau = qF\tau \quad (2.7)$$

Лінійна густина теплового потоку (позначають:  $q_l$ , Вт/м) – це тепловий потік, віднесений до довжини протяжного тіла.

В стаціонарному режимі теплообміну,

$$Q = q_l l; Q_\tau = q_l l \tau \quad (2.8)$$

де  $\tau$  – час, с;  $l$  – довжина протяжного об'єкта, м.

Об'ємна густина теплового потоку (позначають:  $q_V$ , Вт/м<sup>3</sup>) – це тепловий потік віднесений до об'єму тіла.

В стаціонарному режимі теплообміну:

$$Q = q_V V; Q_\tau = q_V V \tau \quad (2.9)$$

де  $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ Х-ШИНИ

В зв'язку з необхідністю великого обсягу обчислювальних потужностей для спрощення розрахунків струмопровідних шин з Х-профілем проводився для однієї електричної фази.

Для проведення чисельного розрахунку необхідно було створити просторову модель [4] розглядуваного електротехнічного устаткування. Розрахункова геометрична модель струмопровідної шини з Х-профілем складається з металевої шини, яку за допомогою елементів кріплення з'єднано з ізоляторним пристроєм. В якості електротехнічних матеріалів для струмопровідної шини з Х-профілем використано мідь, для елементів кріплення – сталь, а для ізоляторного пристрою – фарфор.

На рис. 3.1 показано геометричну модель струмопровідної шини з Х-профілем.

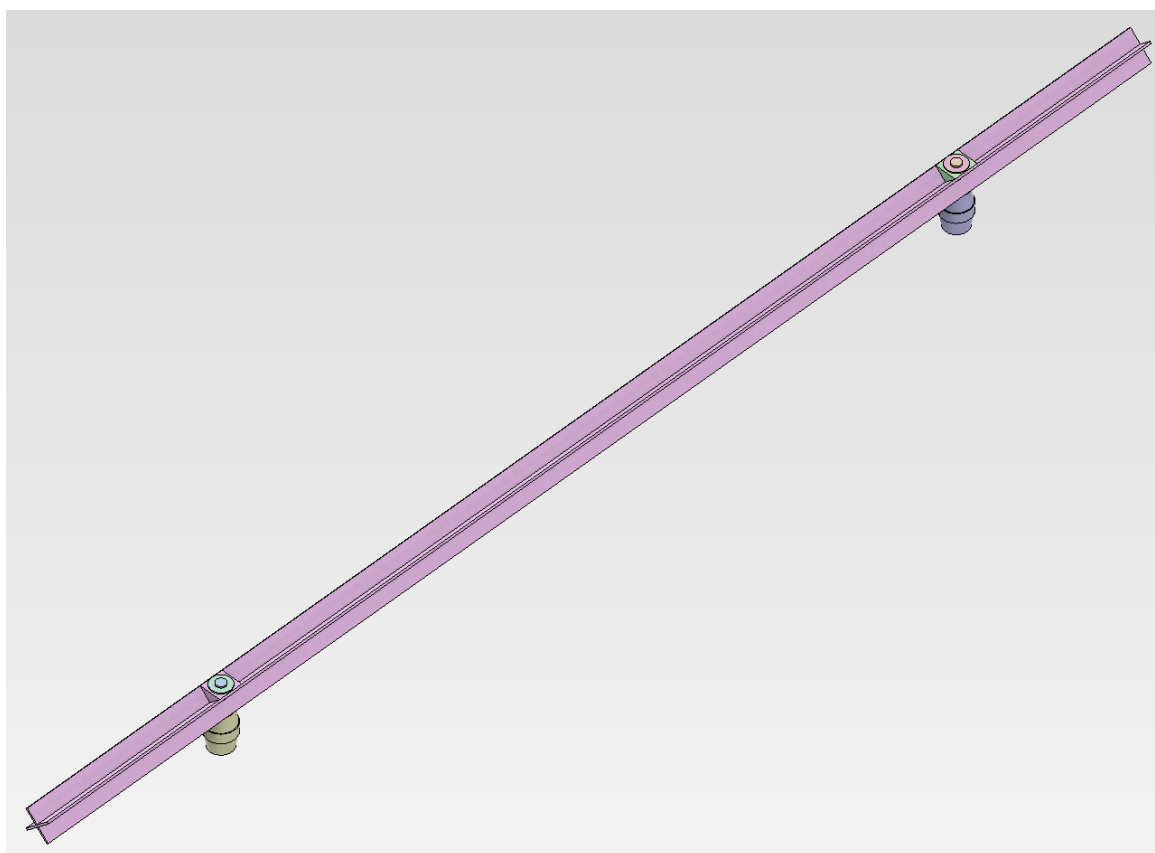


Рисунок 3.1 – Геометрична модель струмопровідної шини з Х-профілем

На рис. 3.2 у збільшенні зображено вузол кріплення струмопровідних шин з X-профілем до ізоляторного пристрою.

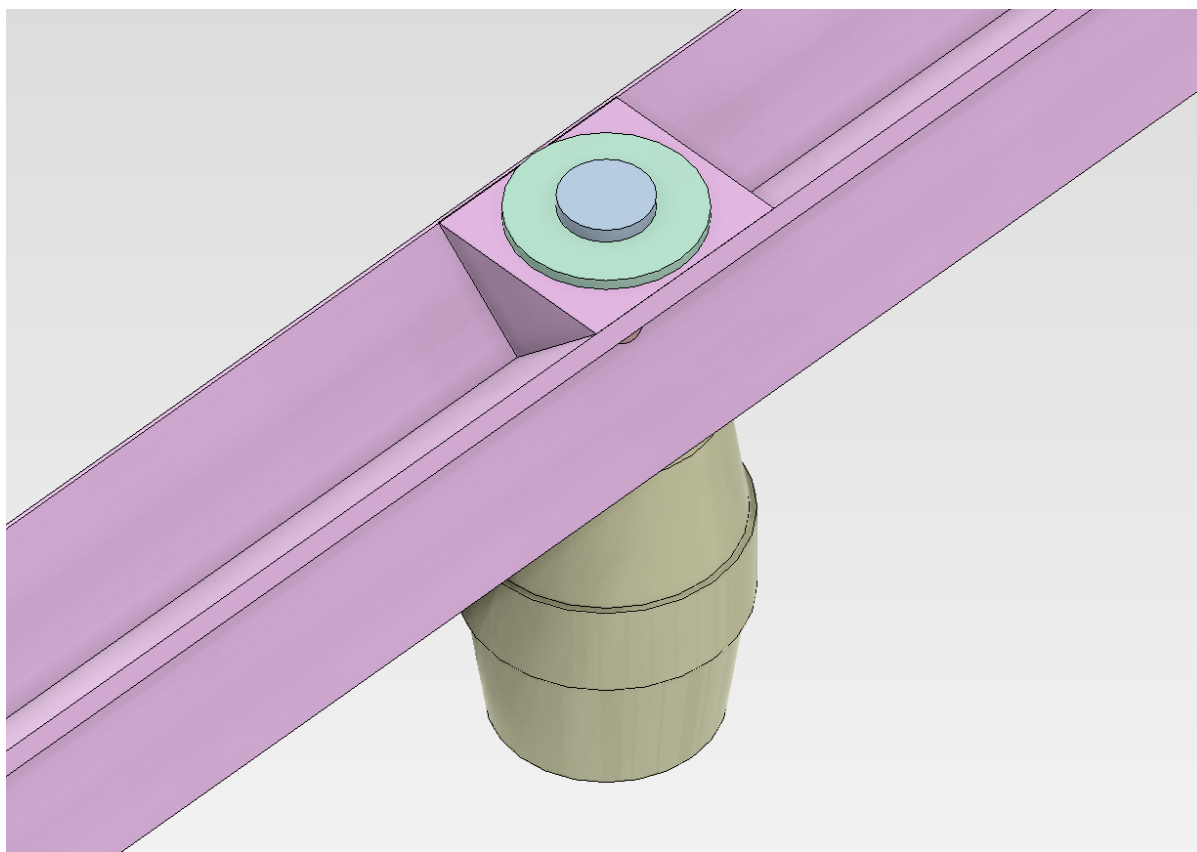


Рисунок 3.2 – Вузол кріплення струмопровідної шини з X-профілем до ізоляторного пристрою

В практиці чисельних розрахунків найбільшого поширення набули метод скінченних елементів і метод кінцевих різниць [5]. Кожен з них має свої переваги та недоліки. В даний час, як правило, перевагу надають методу скінченних елементів. В якості розрахункового методу використано метод скінченних елементів. Кінцево-елементну модель струмопровідної шини з X-профілем та вузла кріплення струмопровідних шин з X-профілем до ізоляторного пристрою продемонстровано відповідно на рис. 3.3 - 3.4. Кінцево-елементна модель генерується з використанням САПР автоматично. Слід зазначити, що розмір самої сітки суттєво впливає як на точність, так і на час розрахунку.



Рисунок 3.3 – Кінцево-елементна модель струмопровідної шини з Х-профілем

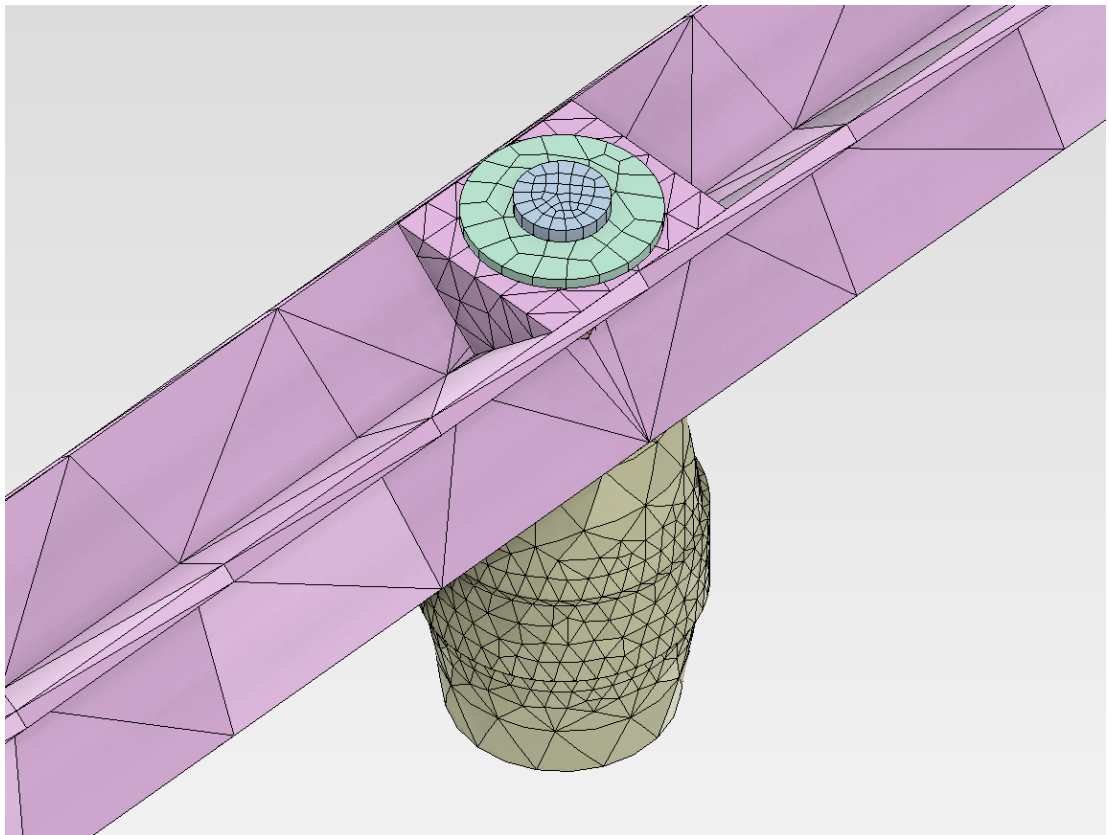


Рисунок 3.4 – Кінцево-елементна модель вузла кріплення струмопровідної шини з Х-профілем до ізоляторного пристрою

Після створення кінцево-елементної моделі струмопровідної шини з Х-профілем виникає потреба у визначенні основних електричних і теплових фізичних характеристик електротехнічних матеріалів. Після відповідних налаштувань можливим є створення реалістичної моделі (рис. 3.5), яка надає значної наочності.



Рисунок 3.5 – Реалістична модель мідної струмопровідної шини з Х-профілем разом зі сталевим кріпленням до фарфорового ізоляторного пристрою

Х-профіль струмопровідної шини утворено двома прямокутними шинами з однаковими габаритними розмірами  $2 \times 40$  мм. Довжина струмопровідної шини становить 1,5 м. Величина прольоту між ізоляторними пристроями – 1 м.

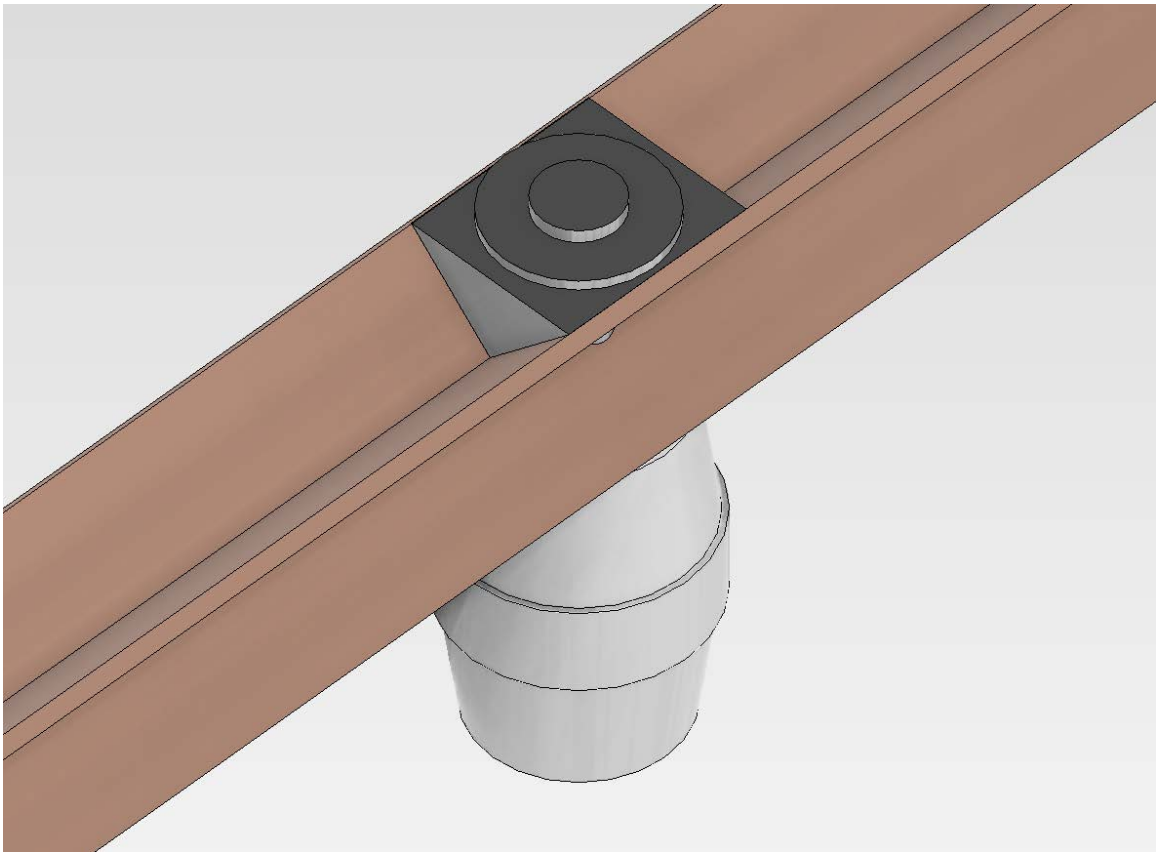


Рисунок 3.6 – Реалістична модель вузла кріплення мідної струмопровідної шини з X-профілем до фарфорового ізоляторного пристрою

На рис. 3.7 - 3.9 показано розподіл основних електричних і теплових величин по просторовій моделі струмопровідної шини з X-профілем при протіканні дійсного значення змінного струму величиною 250 А.

З рис. 3.7 видно, що електричний потенціал по моделі струмопровідної шини з X-профілем розподілений майже рівномірно від 0 до 5 В. Максимальна густина струму (рис. 3.8) становить  $2,09 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  ( $2,09 \text{ А/мм}^2$ ) що в 1,69 разів менше ніж припустима густина для прямокутних шин [2]. Таким чином перевантажувальна здатність X-шин краща.

Найбільш цікавим є розподіл температури в усталеному режимі роботи при струмі 250 А. Максимальне значення температури при струмі 250 А становить  $59,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , що не перевищує рекомендований діапазон  $70\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Розподіл температури в основному рівномірний, деяка невелика нерівномірність в розподілі температури в центрі шини та по її краях пов'язана

з наявністю так званих «теплових містків» в місцях кріплення струмопровідної шини до ізоляторного пристрою.

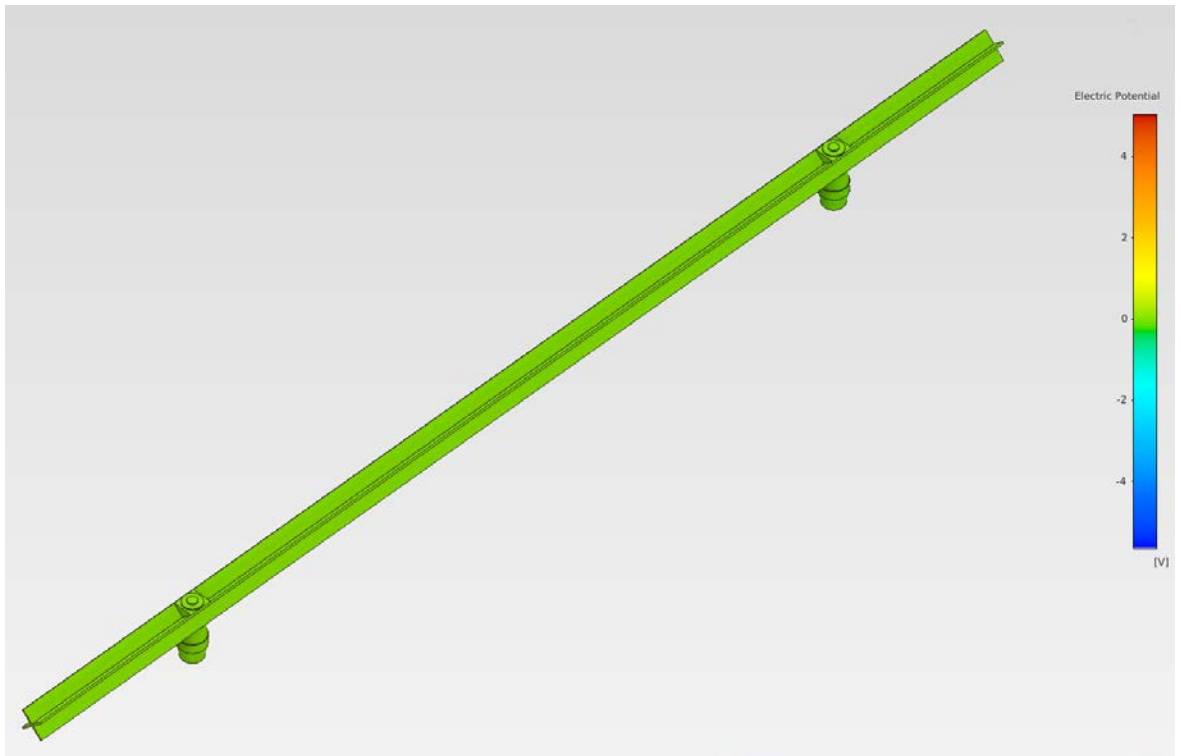


Рисунок 3.7 – Розподіл електричного потенціалу по моделі при струмі 250 А

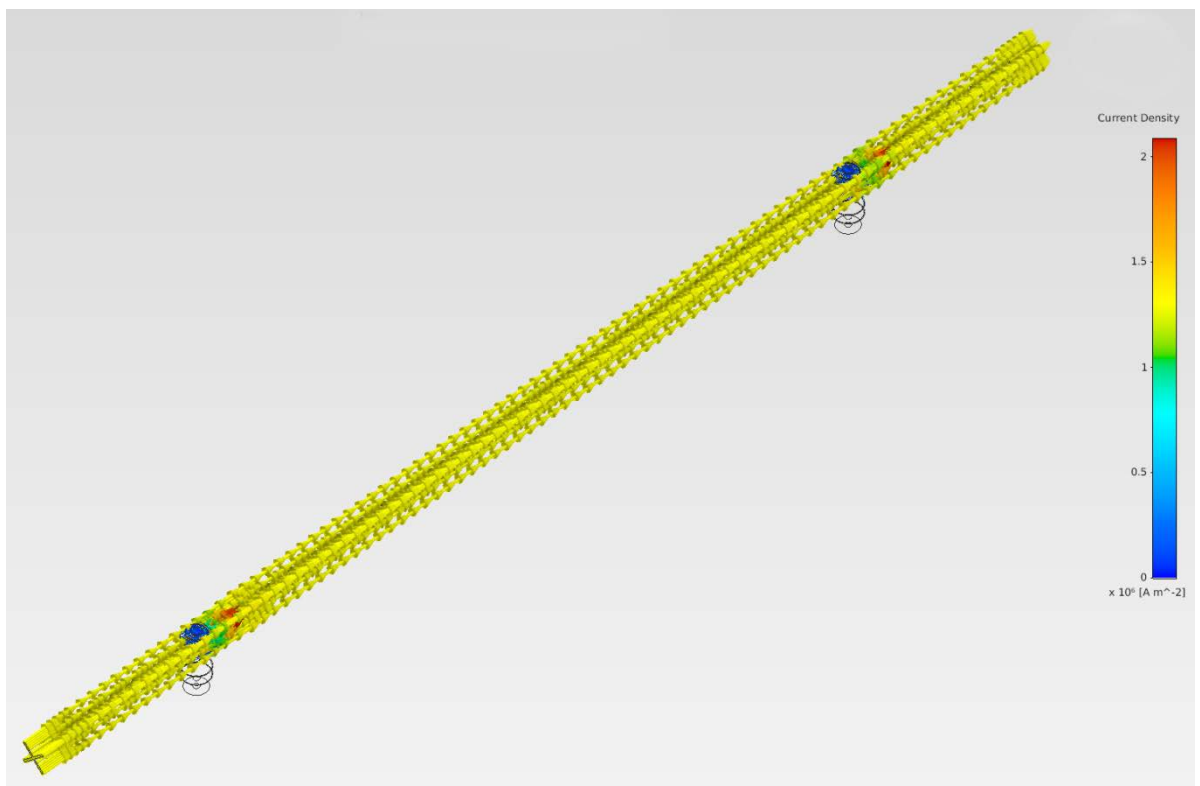


Рисунок 3.8 – Розподіл густини струму по моделі при струмі 250 А

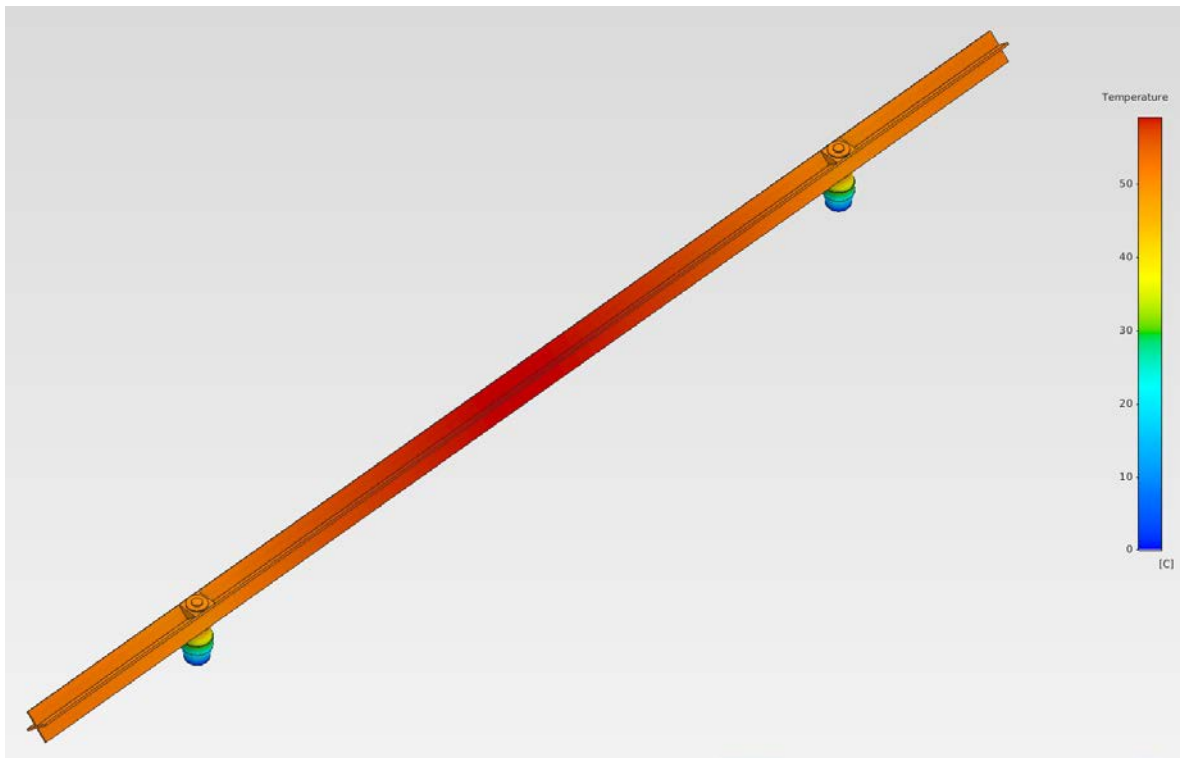


Рисунок 3.9 – Розподіл температури по моделі при струмі 250 А

Для різних варіацій дійсного значення змінного струму від 0 до 2000 А побудовано графік температурної залежності на рис. 3.10.

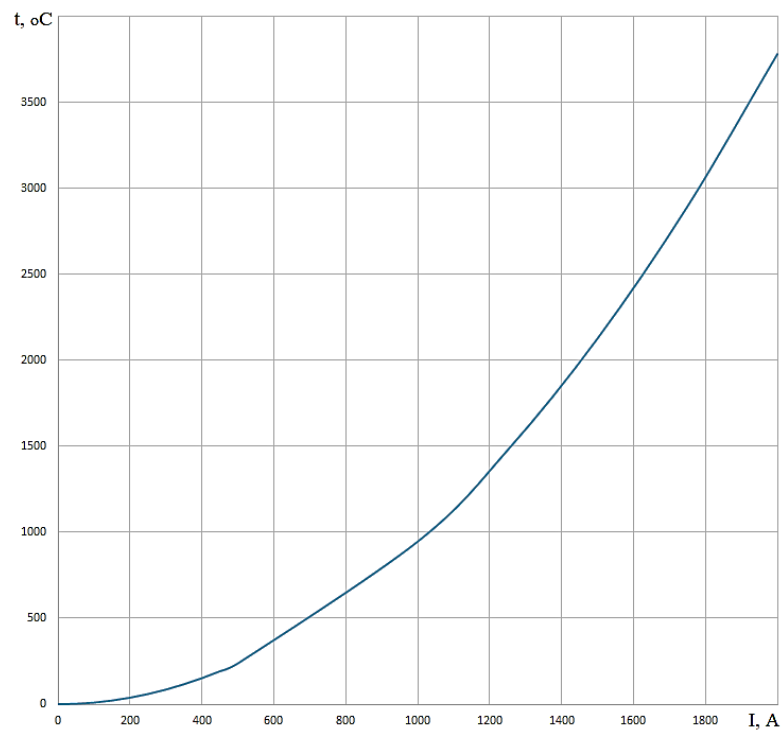


Рисунок 3.10 - Електро-теплова залежність температури по моделі струмопровідної шини з Х-профілем при зміні струму від 0 до 2000 А

## ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена дослідженню електричних струмопроводних шин для силової електроенергетики. Створена математична модель струмопроводних Х-шини з перерізом  $200 \text{ мм}^2$  (точніше  $193,75 \text{ мм}^2$  утвореної пересіченням двох стандартних шин прямокутного перетину  $100 \text{ мм}^2$ ) фізичні характеристики якої ( $\Delta U$  – В/м,  $q$  – А/мм<sup>2</sup>,  $t$  – °С) розраховано «сітковим» методом скінченних елементів при дії нормального струму 250 А та аварійного струму 2000 А.

Пропонується використовувати шини з Х-профілем для електричного з'єднання силового електроустаткування на ЕС, РУ, ТП яке працює у складних експлуатаційних умовах. До таких умов відносяться:

- 1) значні струмові навантаження як в нормальних так і в аварійних режимах завдяки збільшеній площі поверхні і кращим умовам охолодження а також кращій механічній стійкості.
- 2) обмежений простір для прокладання, та значна довжина шин, завдяки збільшеній перевантажувальній здатності по струму та механічній міцності,

Крім того при використанні Х-шини утвореної двома прямокутними елементами що перехрещуються за розмірами аналогічними прямокутним шинам, загальний перетин Х-шини виявляється зменшеним на 3,12% що дозволяє заощаджувати на електропроводних матеріалах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гук Ю. Б., Кантан В. В., Петрова С. С. Проектирование электрической части станций и подстанций. Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
2. Правила улаштування електроустановок: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – Київ: НПЦР ОЕС України, 2017. – 617 с.
3. Гліненко Л.К. Основи моделювання технічних систем / Л.К. Гліненко, О.Г. Сухоносів. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 176 с.
4. Аристов А.В. Имитационное моделирование электромеханических систем / А.В. Аристов, Л.А. Паюк. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 145 с.
5. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.