

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет ) \_\_\_\_\_ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ Електропостачання та енергоменеджменту \_\_\_\_\_

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_ грудня 2024 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій БАЛЮТА \_\_\_\_\_  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_ грудня 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»  
на тему: «Дослідження термокомпенсатора проводів повітряних ліній електро-  
передавання виконаного на основі новітніх матеріалів»

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЕЛ-2-8М

\_\_\_\_\_ Сопіженко Ярослав Володимирович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник Романюк Володимир Тарасович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент Наталія ЛУЦЬКА \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2024 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого

Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»  
(назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ЕПЕМ

/Сергій БАЛЮТА/

“01” жовтень 2024 року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Сопіженку Ярославу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження термокомпенсатора проводів повітряних ліній електропередавання виконаного на основі новітніх матеріалів

керівник роботи Романюк Володимир Тарасович, доктор філософії

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від “ 01 ” жовтня 2024 року № 859-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 28 листопада 2024 року

3. Вихідні дані до роботи література та тему компенсації температурного видовження проводів повітряних ліній електропередавання з використанням новітніх матеріалів, програмне забезпечення для аналізу методом скінченних елементів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

1. Термокомпенсатори, 2. Конструкції термокомпенсаторів, 3. Дослідження конструкції термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту.

5. Перелік графічного матеріалу Презентація до пояснювальної записки — 12 слайдів

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 01 жовтня 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ З№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу	01.10.2024	Виконано
2	Вступ	01-05.10.2024	Виконано
3	Розділ 1. Термокомпенсатори	05-17.10.2024	Виконано
4	Розділ 2. Конструкції термокомпенсаторів	17-31.10.2024	Виконано
5	Розділ 3. Дослідження конструкції термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту	01-20.11.2024	Виконано
6	Висновки	20-21.11.2024	Виконано
7	Оформлення Пояснювальної записки	25-28.11.2024	Виконано
8	Оформлення графічної частини роботи (презентація)	25.28.11.2024	Виконано
9	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	28.11.2024	Виконано

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Сопіженко Я.В.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Романюк В.Т.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Сопіженко Я.В. Дослідження термокомпенсатора проводів повітряних ліній електропередавання виконаного на основі новітніх матеріалів.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний Університет Харчових Технологій

Київ 2024

Проводи повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) видовжуються при нагріванні, при цьому збільшуються стріли провисання в прогонах лінії. Проводи можуть нагріватися через вплив навколишнього середовища, а також при протіканні через них струму. Теплове видовження проводів впливає на вибір опор ЛЕП та висоту закріплення проводів над землею. Відстань між проводом та землею або об'єктами під ЛЕП нормується виходячи із міркувань безпеки. Таким чином зменшувати цю відстань не можна. Однак можна зменшувати реакцію проводу на вплив температур.

Для цього можуть використовуватись компенсатори температурного видовження проводів, виготовлені на основі новітніх матеріалів. В цій роботі було обрано для дослідження перспективну конструкцію такого пристрою – термокомпенсатор (ТК) з кільцями з магнітом'якого композиту (ММК).

Досліджувалось електричне поле та термічні процеси елементів ТК, а саме зона, де кільце з ММК кріпиться до проводу лінії з метою визначення допустимого способу його фіксації на проводі.

Для проведення дослідження було обрано метод скінченних елементів, реалізований за допомогою програми Ansys.

Кращим способом фіксації кільця з ММК на проводі виявилась його фіксація з використанням полімерного матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. В такому випадку кільце працює в кращих умовах щодо електричного поля. Також при такому способі фіксації кільце знаходиться нерухомо на одному місці на проводі та захищене від пошкоджень внаслідок пересування вздовж проводу.

Термічний аналіз конструкції ТК з вказаним способом кріплення кілець з ММК показав, що у випадку максимально можливого виділення тепла в проводі повітряної ЛЕП (для довготривалої його експлуатації) температури та їх розподіл в елементах проаналізованої моделі не становлять загрози для цих елементів. Отже, з точки зору температурних процесів спосіб фіксації кілець з ММК на проводі повітряних ЛЕП з допомогою полімерних матеріалів (наприклад, таких як силікон) є допустимим.

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередавання, провід, температурне видовження, термокомпенсатор, сплав з ефектом пам'яті форми, магнітом'який композит, метод скінченних елементів, Ansys.

## ABSTRACT

Sopizhenko Yaroslav.V. Analysis of thermal compensator for overhead power lines' wires based on novel materials.

141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

National University of Food Technologies

Kyiv 2024

Overhead power line wires experience thermal elongation while heating up. This leads to an increase in the amount of wires' sag between power line towers. Wires can increase their temperature because of environmental factors and also because of current flow. Thermal elongation of power line wires determines power line towers type and height of power line wires fastening on these towers. The distance between the wire and the ground or the object under the wire is chosen based on safety norms. This means that this distance can not be reduced, but it is possible to reduce thermal elongation of power line wires.

In order to achieve the reduction of power line wires' thermal elongation, compensators of thermal elongation of power line wires based on novel materials can be used. A perspective design of thermal compensator with soft-magnetic composite (SMC) rings was chosen for analysis in this work.

Electric field and thermal processes of thermal compensator's elements were analyzed (in particular, the zone where the SMC ring is mounted on the wire was analyzed) in order to determine the suitable way of mounting the ring on the wire.

The finite element method was used to conduct the analysis. This method was realized using Ansys software.

According to the analysis, the best way to mount SMC rings on the wire turned out to be using a polymer material that fills the space between the ring and the wire. In this case, the ring operates in better conditions relative to the electric field. Also, with this method, the ring is mounted stationary in one place on the wire and is protected from damage due to movement along the wire.

Thermal analysis of the thermal compensator's design with the specified method of mounting SMC rings showed that in the case of the maximum possible heat

generation in the wire of the overhead power line (for its long-term operation), temperatures and their distribution in the elements of the analyzed model do not pose a threat to these elements. Therefore, from the temperature processes point of view, the method of mounting SMC rings on the overhead power line wire using polymeric materials (for example, silicone) is acceptable.

**Keywords:** overhead power line, wire, thermal elongation, thermal compensator, shape memory alloy, soft-magnetic composite, finite element method, Ansys.

## ЗМІСТ

Вступ.....	9
Розділ 1. Термокомпенсатори .....	15
1.1. Принцип роботи термокомпенсатора .....	15
1.2. Ефект пам'яті форми в металічних сплавах.....	18
Розділ 2. Конструкції термокомпенсаторів .....	22
2.1. Огляд конструкцій термокомпенсаторів.....	22
2.2. Конструкція термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту.....	35
Розділ 3. Дослідження конструкції термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту.....	37
3.1. Постановка задачі та вибір методів дослідження.....	37
3.2. Аналіз електричного поля кільця з магнітом'якого композиту термокомпенсатора, встановленого на проводі повітряної ЛЕП.....	41
3.3. Термічний аналіз кільця з магнітом'якого композиту термокомпенсатора, встановленого на проводі повітряної ЛЕП з допомогою полімеру.....	46
Висновки.....	51
Список використаних джерел.....	53

## ВСТУП

Повітряні ЛЕП піддаються впливу теплового розширення металів та сплавів. Проводи ЛЕП видовжуються при нагріванні, при цьому збільшуються стріли провисання в прогонах лінії. Проводи можуть нагріватися через вплив навколишнього середовища, а також при протіканні через них струму. Теплове видовження проводів впливає на вибір конструкції ЛЕП, зокрема на вибір опор та висоту закріплення проводів над землею. Відстань між проводом та землею або об'єктами під ЛЕП є досить важливою, оскільки вона нормується виходячи із міркувань безпеки. Таким чином зменшувати цю відстань не можна. Однак можна зменшувати реакцію проводу (зміну його довжини) на вплив температур. Це і є одним із можливих напрямків покращення характеристик повітряних ЛЕП. В цьому напрямку вже давно ведуться дослідження та існують розробки, які дозволяють певною мірою вирішувати проблему теплового розширення проводів ЛЕП.

Наприклад High Temperature Low Sag Conductors (HTLS) – високотемпературні провідники з малою стрілою провисання. Вони можуть працювати при підвищених температурах (до 210 °C), тобто вони здатні пропускати більше потужності за звичайні провідники (проводи). Такі проводи можуть використовуватись на наявних повітряних лініях, які мають проблеми зі стрілою провисання (обмеження по струму) та обмеження на використання нових вищих опор. HTLS проводи збільшують пропускну здатність лінії без необхідності модифікацій більшості типів опор. Такі провідники мають низький коефіцієнт теплового розширення через особливу конструкцію та використання відповідних матеріалів. Через це вартість таких проводів вища за традиційні варіанти. Також попри наявність прикладів успішного використання таких провідників, ця технологія ще знаходиться на стадії розробки та не є повністю зрілою [1].

Також відомі пристрої, які компенсують термічне видовження проводів при їх нагріванні і дозволяють їх рух в іншу сторону при охолодженні. Такі пристрої можуть мати вантаж, який механічно приєднується до проводу лінії, також можуть використовуватись пружинні механізми та ін. Принцип дії їх полягає в тому, що при нагріванні проводу та його видовженні, відповідний механізм підтягує цей провід, водночас при охолодженні та скороченні проводу, зусилля, що створюється проводом передається на механізм, який дозволяє рух вантажу, пружини та ін. в іншу сторону запобігаючи виникненню надмірних напружень. Таким чином провід лінії завжди знаходиться натягнутим. Такі механізми широко використовуються на лініях живлення електротранспорту, де для надійного контакту між контактною системою та проводом, провід повинен знаходитись в натягнутому стані без особливого провисання.

На ЛЕП такі компенсатори не знайшли широкого застосування через низку факторів: ускладнення конструкцій опор, додаткове навантаження на них, низька надійність деяких механізмів компенсаторів, інші експлуатаційні вимоги щодо компенсації температурного видовження проводів для повітряних ЛЕП на відміну від ліній живлення електротранспорту [2].

Спеціально для ЛЕП відомі деякі пристрої для компенсації температурного видовження проводів. Наприклад патент US5792983A (1998) “Sag compensator for suspended lines using rotary motion” [3].

Цей патент описує пристрої, які приєднуються до проводу лінії в двох точках та мають елемент, який при збільшенні температури розширюється/видовжується. Цей рух посилюється та передається через механізм (у вигляді ножиць або з використанням дисків чи шестерні) до проводу. Таким чином провід підтягується і компенсується його термічне видовження. Або патент US2014/0021327A1 (2014) “Adjustable suspension of transmission lines” [4].

В ньому описується лінія, в якій основний провід лінії приєднується до допоміжного, який розташований вище. Кріплення забезпечується рухомими елементами, які регулюють стрілу провисання основного проводу. Недоліками

таких пристроїв є приводна система, а саме використання класичних двигунів, соленоїдів, гідравлічних/пневматичних приводів, які ускладнюють конструкцію компенсаторів, знижують їх надійність та створюють додаткове навантаження на провід. В патенті US5792983A використовується температурне видовження металічних елементів, однак рух таких елементів дуже незначний та його потрібно посилювати спеціальними механізмами, що ускладнюють конструкцію компенсатора та негативно впливають на його надійність.

Стріла провисання (її коливання) впливає на надійність лінії електропередавання. Якщо стріла провисання надто мала – напруження в проводі може перевищити напруження, яке витримує провід і призвести до його розриву. Якщо стріла провисання надто велика – це може призвести до небезпечного наближення проводів до об'єктів під ними, таких як дерева та інша рослинність і спричинити замикання. Також надто велика стріла провисання може призвести до замикання між проводами лінії при розгойдуванні проводів вітром.

Експерти свідчать, що надмірне провисання проводів повітряних ЛЕП є однією з головних причин виникнення аварійних відключень [5-8].

Не зважаючи на це, зазвичай у звітах з дослідження надійності електричних мереж (наприклад Eaton Blackout Tracker для Канади або США, Nordic grid disturbance statistic та інші) зміна стріли провисання безпосередньо не вказується як причина виходу з ладу ЛЕП. Однак потрібно зауважити, що у 1996 році найбільший блекаут у західній частині США був спричинений перегрітою ЛЕП, проводи якої увійшли в контакт з деревом [9].

Також літом 2003 року проводи декількох ліній поблизу Клівленда замкнулись на дерева, що призвело до масштабного блекауту в північно-східній частині США. За оцінками тоді це вплинуло на роботу 50 мільйонів споживачів в США та Канаді [10].

За даними енергетичної компанії Портленда за 15% часу відключень відповідальні поломки обладнання, зокрема спричинені надмірним провисанням провідників ЛЕП [11].

Австралійський звіт “Моніторинг стану провідників на повітряних ЛЕП” визначає два режими поломок – той, у якому причиною поломки був феномен, який не контролюється енергетичними компаніями (тварини, екстремальні погодні умови, вогонь, блискавка, вандалізм та ін.) та той, у якому причиною поломки був феномен, який контролюється енергетичними компаніями. Нижче представлена статистика другого режиму поломок.



Рис. 1. Причини (які контролюються енергетичними компаніями) виходу з ладу повітряних ЛЕП з австралійського звіту про стан провідників на повітряних ЛЕП [12]

Надмірне провисання провідників у 6% випадків є причиною виходу з ладу ЛЕП. Основною ж причиною є корозія – 30%. Однак потрібно враховувати, що австралійські електричні мережі в основному знаходяться в прибережній зоні та підпадають під вплив вологого солоного повітря. Відповідно в інших умовах цей фактор буде менш актуальний [12].

Отже, через компенсацію температурного видовження проводів ЛЕП можна не порушуючи обмежень економити кошти при спорудженні нових ЛЕП зменшуючи висоту опор або збільшуючи відстань між ними; можна

збільшувати пропускну здатність наявних ЛЕП без їх масштабної реконструкції; а також, збільшувати надійність ЛЕП через обмеження стріли провисання.

Недоліки вказаних вище способів та засобів для боротьби з температурним видовженням проводів можна обійти конструкціями компенсаторів температурного видовження проводів, що використовують новітні матеріали, зокрема сплави з ефектом пам'яті форми (ЕПФ). Далі для позначення таких пристроїв використовуватиметься термін термокомпенсатори (ТК).

Попри те, що ТК розроблялись в різних країнах, широкого поширення вони не знайшли. В принципі, така ситуація характерна для будь-яких пристроїв на основі сплавів з ЕПФ. Спочатку потрібно сказати, що не зважаючи на проведені дослідження сплавів з ЕПФ в першій половині ХХ століття, сильний інтерес до них розвинувся лише після відкриття нікель-титанового сплаву (тобто 1960-і роки) [13].

Однак L. McD. Schetky вже в 1994 році писав, що на той момент сплави з ЕПФ в порівнянні з класичними сплавами (сталі, алюмінієві, цинкові, мідні сплави) на ринку представлені лише в кількостях, які можна назвати експериментальними. Проблемами, які цьому сприяли він називає високу їх вартість (однак навіть після появи дешевших сплавів з ЕПФ на основі міді не було відповідного зростання в їх поширенні); обмежені фізичні властивості та низьку кількість літератури на цю тему [14].

З моменту відкриття нітинолу та його першого успішного використання в літаках F-14 було зареєстровано тисячі і тисячі патентів про застосування сплавів з ЕПФ. Однак, справді комерційно успішних пристроїв (на 2000 рік) було дуже мало [15].

А в роботі 2006 року наголошується на тому, що сплави з ЕПФ повільно впроваджуються, однією з проблем, що цьому сприяють є мала кількість інженерних даних на цю тему [16].

На момент написання цієї роботи, не було знайдено жодного прикладу комерційно-успішної конструкції ТК, хоча є приклади експериментальних випробувань. Кількість літератури на цю тему є низькою. Таким чином, ця

робота присвячена дослідженню та подальшому розвитку конструкцій ТК (для дослідження обрана перспективна конструкція, вибір якої обґрунтований у другому розділі роботи) з використанням сучасних технологій. Отримані результати потенційно сприятимуть підвищенню інтересу до ТК, їх розвитку та впровадженню на практиці. А застосування ТК, як було сказано вище, робить дешевшим спорудження нових ЛЕП, полегшує підвищення пропускну здатності наявних ЛЕП та здатне підвищити їх надійність. Так обґрунтовується **вибір теми та її актуальність.**

**Мета дослідження:** розвинути та уточнити дизайн ТК з кільцями з ММК (визначити допустимий спосіб фіксації кілець з ММК на проводі ЛЕП).

**Завдання дослідження:** проаналізувати термічні процеси та електричне поле елементів конструкції ТК з кільцями з ММК.

**Об'єкт дослідження:** ТК з кільцями з ММК.

**Предмет:** електромагнітні та термічні процеси, що відбуваються в ТК з кільцями з ММК, встановленому на проводі повітряної ЛЕП.

**Методи дослідження:** метод скінченних елементів.

**Наукова новизна одержаних результатів:** вперше проаналізовано електричне поле та термічні процеси, що відбуваються в зоні кріплення кільця з ММК на проводі лінії для конструкції ТК з кільцями з ММК.

**Практичне значення одержаних результатів:** отримані результати уточнюють проаналізовану конструкцію ТК та спрощують реалізацію її на практиці, зокрема через вибір та обґрунтування допустимого способу фіксації кілець з ММК на проводі лінії.

**Особистий внесок магістранта.** Основні результати дослідження отримані здобувачем у співавторстві з науковим керівником. Зокрема, здобувач виконував моделювання в програмі Ansys використовуючи метод скінченних елементів. Результати інших авторів, які наведені в роботі мають відповідне посилання.

**Апробація результатів роботи.** Результати досліджень були оприлюднені на VIII Міжнародній науковій конференції “Науковий простір: актуальні

питання, досягнення та інновації”, ГО «Міжнародний центр наукових досліджень», Житомир, 2024.

**Публікації.** За результатами досліджень було опубліковано тези [46].

## РОЗДІЛ 1. ТЕРМОКОМПЕНСАТОРИ

### 1.1. Принцип роботи термокомпенсатора

Для прикладу візьмемо найпростішу конструкцію ТК з патенту SU754541 (1980) “Воздушная линия электропередачи” [17]:

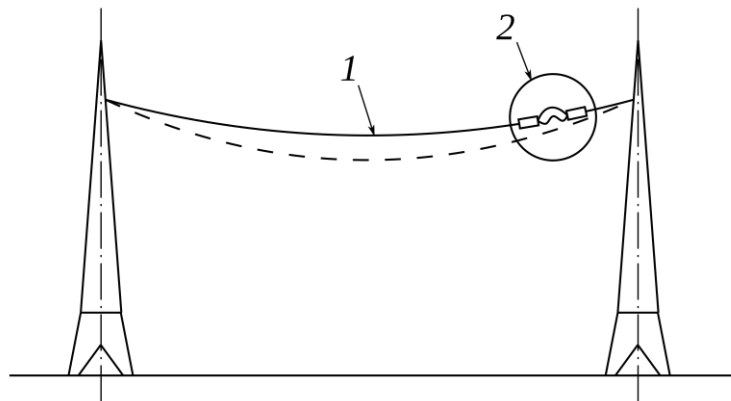


Рис. 1.1. Схематичне зображення ЛЕП із встановленим ТК з патенту SU754541

1 – провід ЛЕП; 2 – вузол ТК.

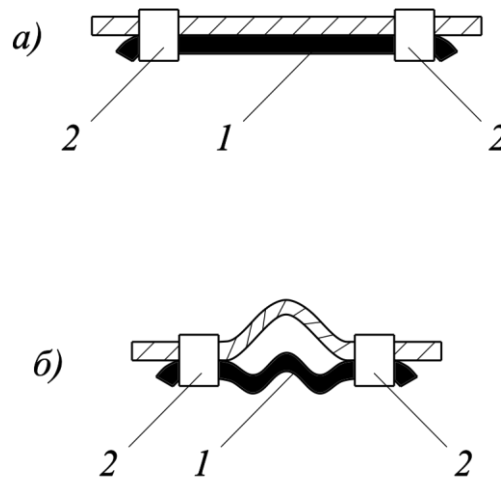


Рис. 1.2. Вузол ТК

1 – термочутливий елемент зі сплаву з ЕПФ; 2 – точки кріплення термочутливого елемента до проводу;  
а) ТК до спрацювання; б) ТК після спрацювання.

На рис. 1.1 зображено прогін ЛЕП. Провід ЛЕП 1 закріплений між двома опорами, він містить вузол ТК 2. На рис. 1.2 детальніше зображений вузол ТК.

При виготовленні термочутливого елемента, йому надається стиснута форма (рис. 1.2 (б)), при встановленні його на ЛЕП, він випрямляється.

При нормальній температурі навколишнього середовища ТК має вигляд як на рис. 1.2 (а), термочутливий елемент ТК знаходиться у низькотемпературному стані. При максимальній температурі навколишнього середовища термочутливий елемент переходить у високотемпературну фазу та “згадує” свою оригінальну форму – стискається (рис. 1.2 (б)), при цьому напруження в проводі збільшується і він займає позицію з меншою стрілою провисання (суцільна лінія на рис. 1.1) на відміну від випадку без термокомпенсації (штрихова лінія). При зменшенні температури до точки початку прямого мартенситного перетворення термочутливий елемент починає випрямлятися внаслідок навантаження, створюваного проводом і врешті решт займає початкове положення і стає готовим до наступного спрацювання.

Через складність виготовлення термочутливих елементів зі сплавів з ЕПФ, їх наявність на ринку та інших факторів форма термочутливих елементів ТК може бути різною, наприклад термочутливий елемент може бути набраний з тонших дротів, або ТК може мати два термочутливі елементи (переріз їх може бути круглий або прямокутний), як показано на рисунку:

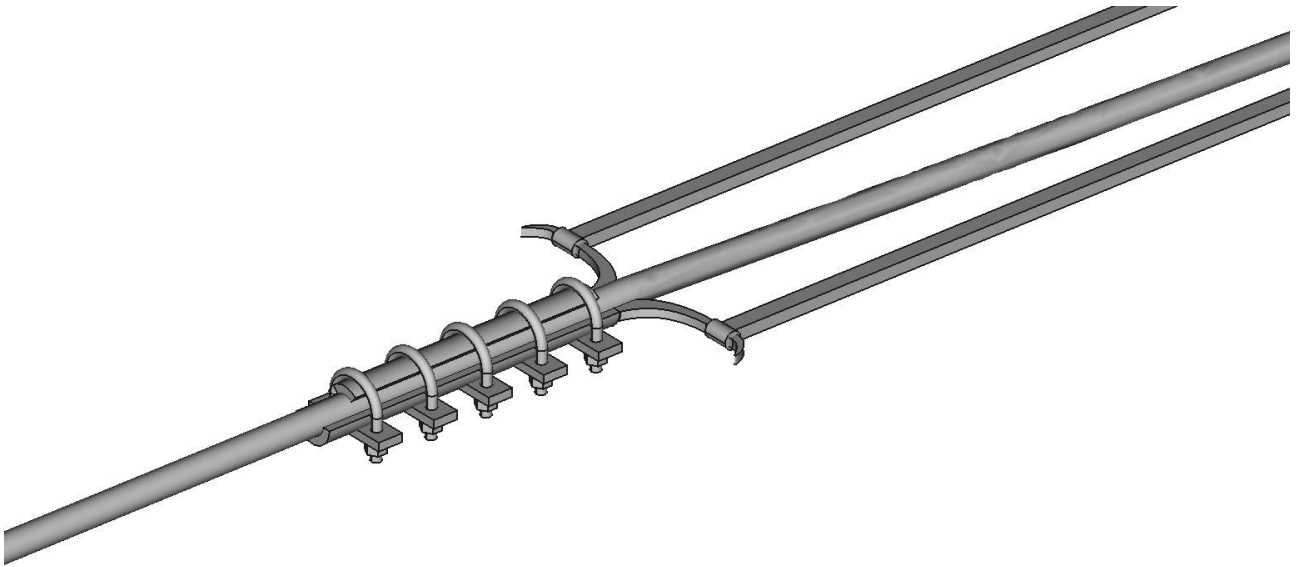


Рис. 1.3. Вузол кріплення ТК з двома термочутливими елементами прямокутного перерізу до проводу ЛЕП

Для встановлення ТК на ЛЕП використовується спеціальний пристрій, як показано на рисунку:

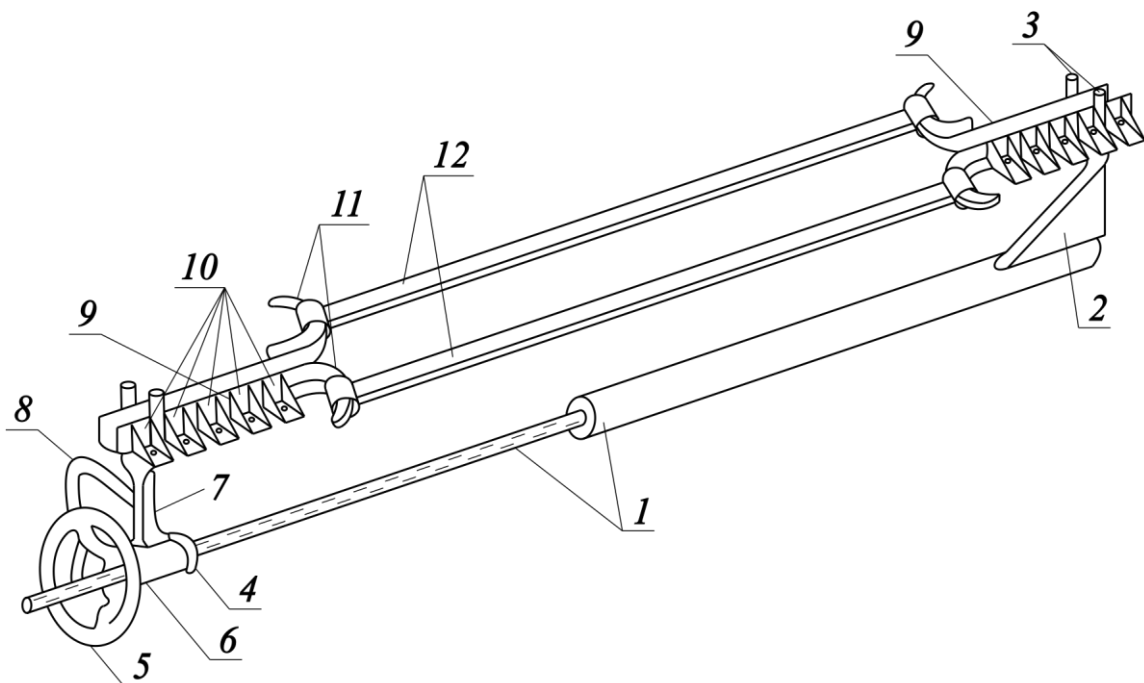


Рис. 1.4. Монтажний пристрій зі встановленим ТК [18]

Монтажний пристрій зі встановленим ТК зображено на рис. 1.9. Пристрій складається зі штанги 1, з одного боку її нарізана нарізь, з іншого – встановлений кронштейн 2 з вилкою 3. На різьбовій стороні розміщена втулка 4 з внутрішньою нарізкою та маховиком 5. На втулці розміщений повідок 6 з кронштейном 7 та вилкою. Збоку повідка 6 і кронштейна 7 розміщена ручка 8. Площини вилок перпендикулярні до штанги. На вилки встановлені напівкруглі корпуси 9 вузлів кріплення. До бокових стінок корпусів прикріплені кронштейни 10 з отворами, розміщеними симетрично до осі корпуса. Корпус з одного боку має кронштейни 11, до яких прикріплені термочутливі елементи ТК 12. Відстань між зубцями вилок дорівнює ширині корпуса, а товщина зубців вилок дорівнює відстані між боковими кронштейнами 10 [18].

Провід ЛЕП проходить через корпус вузла кріплення 9. Натяжні болти притискають провід до корпуса. При монтажі ТК на провід ЛЕП, його попередньо нагрівають до температури закінчення зворотного мартенситного перетворення, а провід підтягують на величину його абсолютного температурного видовження в заданому температурному діапазоні незалежно від температури навколишнього середовища і ТК кріплять до петлі провoda, яка виникла в процесі монтажу [2].

Таким чином отримується ЛЕП зі встановленими ТК, які компенсують його температурне видовження при максимальній температурі навколишнього середовища.

## **1.2. Ефект пам'яті форми в металічних сплавах**

ЕПФ був відкритий в першій половині ХХ століття. Практичне значення цього ефекту стало зрозумілим в другій половині ХХ століття, коли спеціалісти з військово-морської лабораторії США (Naval Ordnance Laboratory (NOL)) відкрили новий сплав нікелю та титану – нітинол (Nitinol) [19].

Після відкриття цей сплав почали активно вивчати та в наш час нітинол залишається найпопулярнішим сплавом з ЕПФ через відмінні електричні та механічні характеристики, міцність, стійкість до втоми, стійкість до корозії та біосумісність [20].

ЕПФ полягає в тому, що матеріал, який володіє ним, після деформації, самостійно повертається до своєї оригінальної форми внаслідок нагрівання.

Метали (металічні сплави) мають кристалічну структуру, тобто атоми в об'ємі матеріалу розташовані у певному порядку.

Сплави з ЕПФ можуть знаходитись в двох різних фазах – аустеніт (високотемпературна фаза – кубічний тип ґратки) та мартенсит (низькотемпературна фаза – гексагональний або моноклінний тип ґратки).

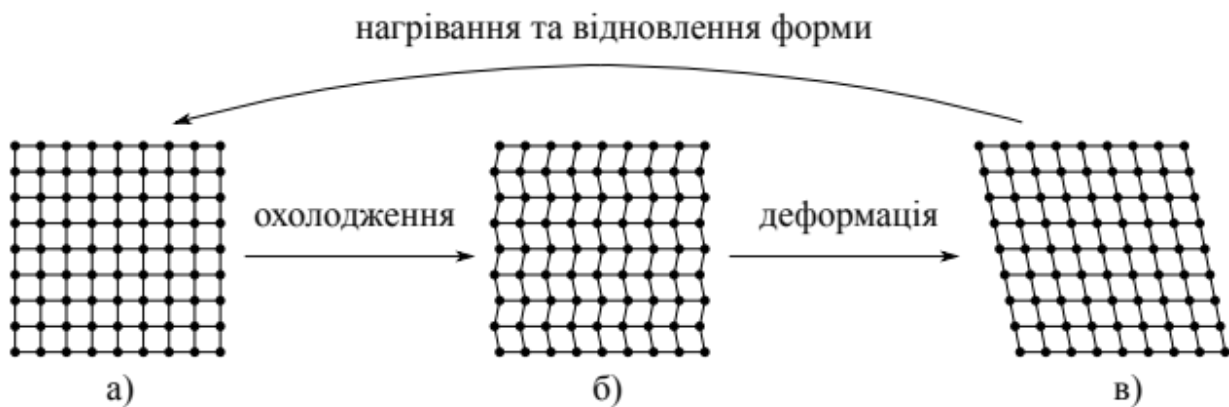


Рис. 1.5. Спрощене зображення кристалічних ґраток в сплаві з ЕПФ  
а) аустеніт; б) двійниковий мартенсит; в) деформований мартенсит.

На рис. 1.5 (б) бачимо, що елементи мартенситної фази можуть бути орієнтовані ліворуч або праворуч. При деформації матеріалу в мартенситній фазі, її елементи змінюють свою орієнтацію. На рис. 1.5 (в) показаний варіант структури матеріалу після деформації, як бачимо в даному випадку всі елементи структури орієнтовані ліворуч. Зверніть увагу, що при деформації за таким механізмом не відбувається порушення оригінальних міжатомних зв'язків. Якщо такий деформований зразок нагріти вище температури кінця оберненого мартенситного перетворення –  $A_f$  (рис. 1.6), мартенсит повністю перетворюється на аустеніт. При цьому атоми потрапляють на свої попередні місця (оскільки оригінальні зв'язки між атомами не були порушені) та на макроскопічному рівні спостерігається повертання форми матеріалу до тієї, яку матеріал мав до деформації (рис. 1.5).

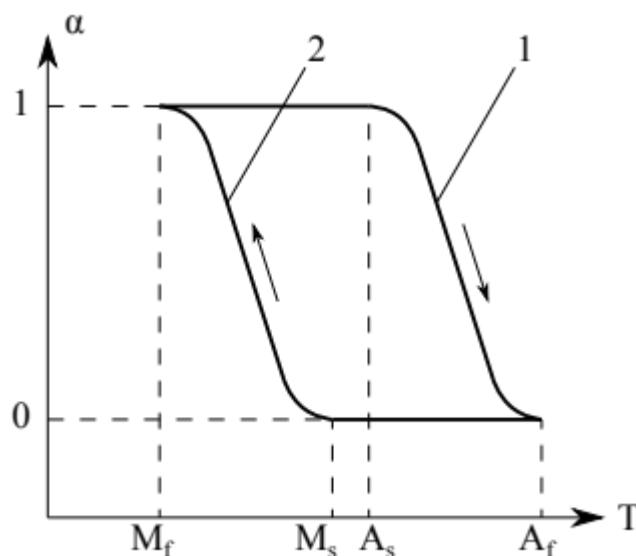


Рис. 1.6. Діаграма фазових перетворень в сплаві з ЕПФ

$\alpha$  – частка мартенситу в об’ємі матеріалу;

1 – обернене мартенситне перетворення, при нагріванні;

2 – пряме мартенситне перетворення, при охолодженні;

$A_s$ ,  $A_f$  – температури початку та кінця оберненого мартенситного перетворення;

$M_s$ ,  $M_f$  – температури початку та кінця прямого мартенситного перетворення.

Після охолодження відбувається ще одне фазове перетворення – аустеніт перетворюється в двійниковий мартенсит (пряме мартенситне перетворення). При цьому на макроскопічному рівні нічого не спостерігається, оскільки двійниковий мартенсит займає такий самий об’єм як і аустеніт. Зразок стає готовим до нового циклу деформація – відновлення форми [19].

Для того, щоб надати зразку форму, до якої він повертатиметься, його потрібно деформувати до цієї форми, жорстко зафіксувати, нагріти ( $\sim 500$  °C для нітинолу) та витримати деякий час.

Розглянутий вище ЕПФ є “одностороннім” (one-way SME), тобто сплави з ЕПФ в цьому випадку можуть повертатися лише до одної “запам’ятованої” оригінальної форми. Існує також двосторонній ЕПФ (two-way SME), в цьому випадку матеріали “пам’ятають” дві форми, у високотемпературній та

низькотемпературній фазах. На жаль двосторонній ЕПФ не є “вродженою” властивістю сплавів з ЕПФ, його можна досягти особливою багаторазовою термомеханічною обробкою [19].

Деформація, що може бути відновлена при двосторонньому ЕПФ є меншою ніж при односторонньому (наприклад для нітинолу 3,2% в порівнянні з 8%) [21].

## РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЇ ТЕРМОКОМПЕНСАТОРІВ

### 2.1. Огляд конструкцій термокомпенсаторів

Перші (або одні із перших) згадки про ТК відносяться до кінця 70-х, початку 80-х років ХХ століття та пов'язані з вченими Національного університету харчових технологій. Наприклад, тези про компенсацію температурного видовження проводів з використанням ТК [22], також тези про перспективи використання сплавів з ЕПФ в енергетиці. Зокрема, в цій роботі відзначається можливість використання елементів, виготовлених із матеріалів з ЕПФ через їхні переваги перед іншими матеріалами для компенсації температурного видовження проводів повітряних ЛЕП та інших задач в електроенергетиці [23].

Далі наведені одні з перших патентів на цю тему.

Патент SU700888 (1979) “Воздушная линия электропередачи” [24]. В ньому описується концепт лінії електропередавання (рис. 2.1) з ТК. Особливістю цього патенту є те, що ТК 5 приєднується одним кінцем до проводу в одному прогоні, іншим – до проводу в іншому прогоні. В місцях з'єднання ТК з проводом встановлюються ізоляційні елементи. Метою такого виконання є зменшення навантаження на ТК та ефективного їх використання для боротьби з снігом та льодом (можна приєднати до ТК зовнішнє джерело живлення і швидка його деформація призведе до скидання з проводів снігу та льоду) та для зменшення коливань проводів при вітрових навантаженнях.

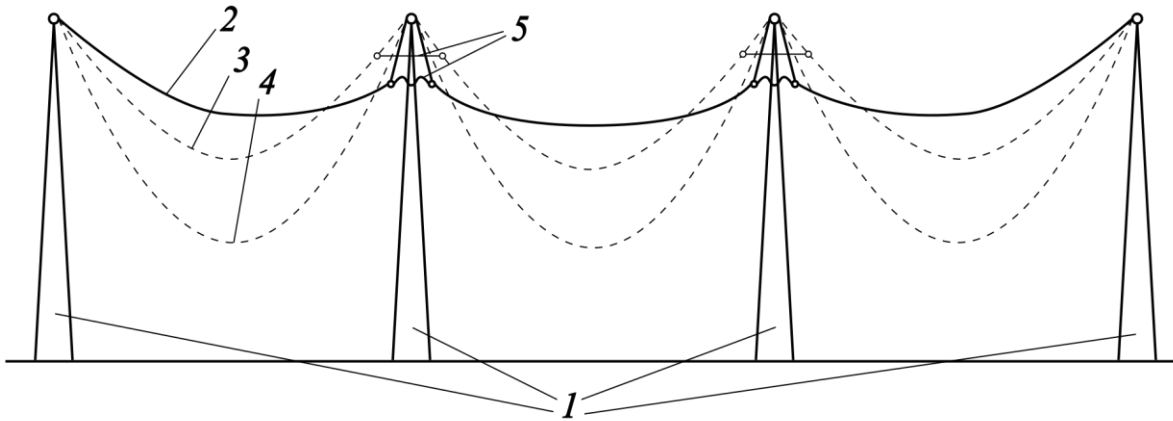


Рис.2.1. ЛЕП з ТК з патенту SU700888

1 – опори ЛЕП; 2 – провід з ТК при підвищеній температурі навколишнього середовища; 3 – провід з ТК у вихідному стані; 4 – провід без ТК при підвищеній температурі навколишнього середовища.

Патент SU754541. В цьому патенті описується ЛЕП із встановленими на проводах ТК найпростішої конструкції. Вона і її принцип роботи раніше вже згадувались (рис. 1.1). Ця конструкція випробовувалась на реальних ЛЕП, наприклад на фото (рис. 2.2) зображений дослідний зразок ТК, випробування якого на практиці проводились в українських мережах [14].

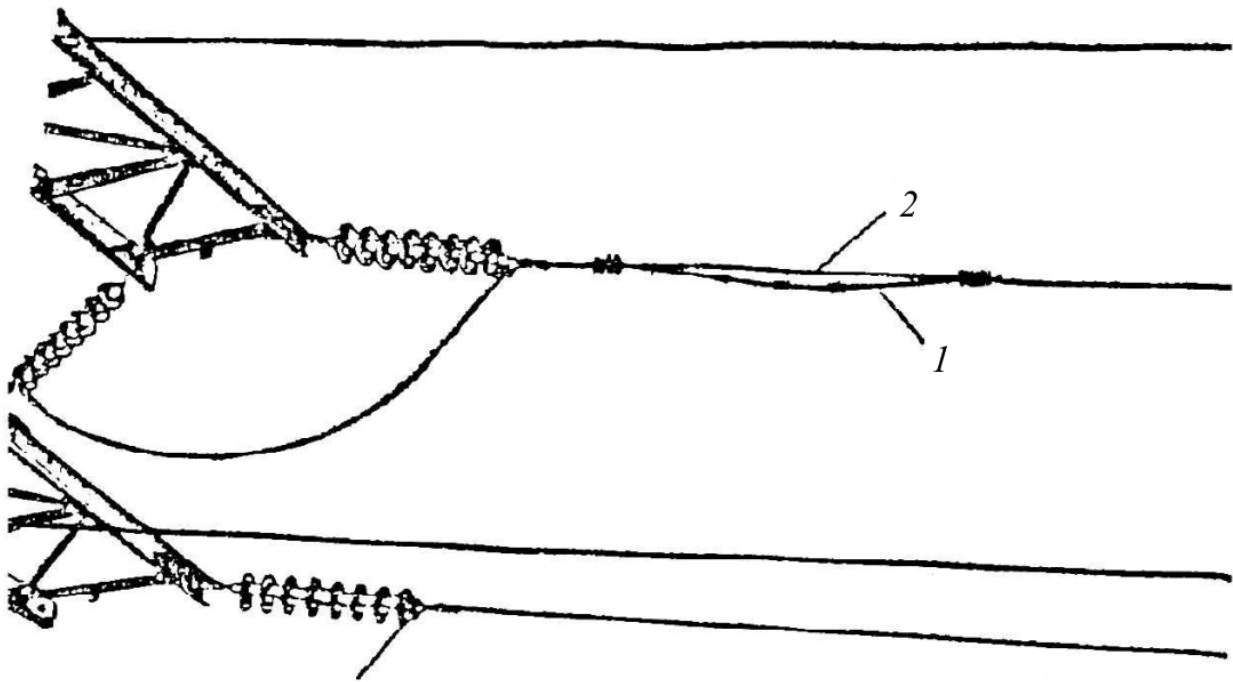


Рис 2.2. ТК на ЛЕП 110 кВ

1 – провід; 2 – ТК [2]

Патент SU868905 (1981) “Термокомпенсатор” [25]. На відміну від вже розглянутих конструкцій ТК, у цьому випадку термочутливий елемент має вигляд пружини, яка при спрацюванні розширюється (видовжується), а при повертанні у початкове положення стискається. Такий термочутливий елемент монтується в телескопічному корпусі, а в якості опор можуть використовуватись провід ЛЕП і допоміжні троси. Різні варіанти такої конструкції зображені на рисунку:

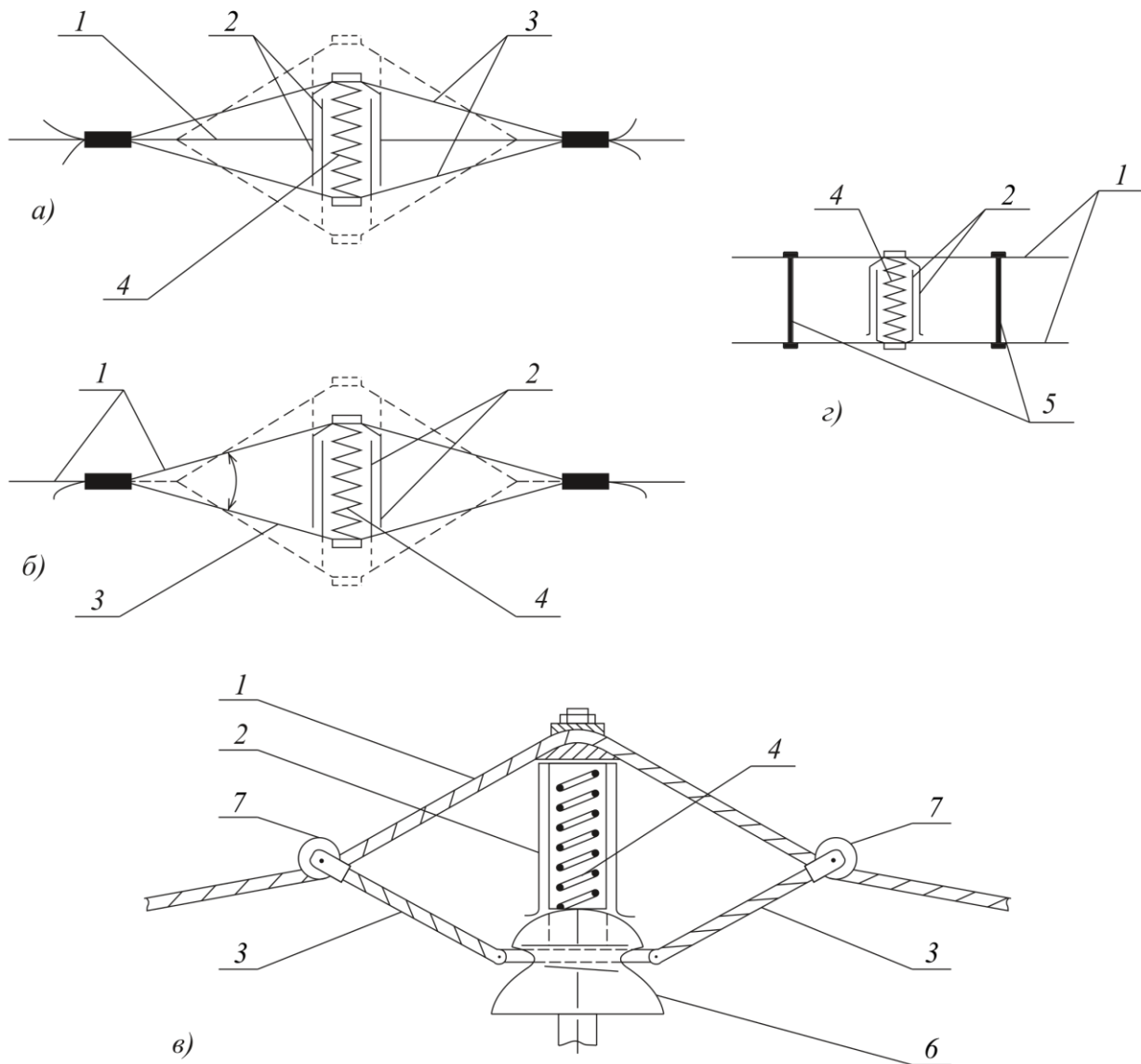


Рис 2.3. Різні варіанти ТК з патенту SU868905

1 – провід ЛЕП; 2 – телескопічний корпус термочутливого елемента;

3 – допоміжні троси; 4 – термочутливий елемент; 5 – розпірки;

6 – ізолятор; 7 – ролики;

- а) ТК з одним допоміжним тросом; б) ТК з двома допоміжними тросами; в) ТК з кріпленням на ізоляторі; г) ТК на ЛЕП з розщепленою фазою

Також є патент SU1280662 (1986) “Воздушная линия электропередачи” [26] – повітряна ЛЕП з ТК, встановленими на середній та нижній фазах. В цьому патенті описується ЛЕП, в якій ТК середньої фази зменшує стрілу провисання на величину вдвічі меншу ніж ТК нижньої фази. ТК відповідно встановлюються

лише на нижній та середній фазах. Це робиться для підвищення економічності ЛЕП.

В книзі [2] описується подальший розвиток дизайнів ТК, які пристосовані до конкретних випадків. Стисло розглянемо ці конструкції.

ТК з кріпленням до гірлянди ізоляторів (рис. 2.4). Така конструкція пристосована для використання на ділянках ЛЕП при переходах через перешкоди. Також такий ТК може виконувати функції демпфера.

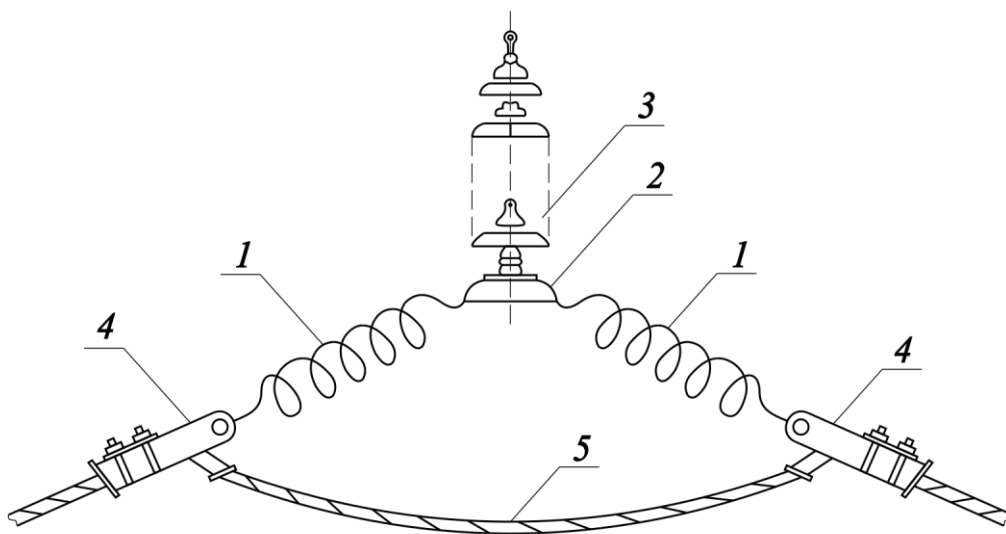


Рис 2.4. ТК з кріпленням до гірлянди ізоляторів

1 – термочутливі елементи; 2, 4 – затискачі; 5 – провід

Комбінований ТК (рис. 2.5). Така конструкція ТК передбачає наявність вантажу, через що можна зменшити масу термочутливого елемента, а також відрегулювати моменти спрацювання та відпускання ТК, оскільки температура спрацювання елемента з ЕПФ залежить від величини навантаження.

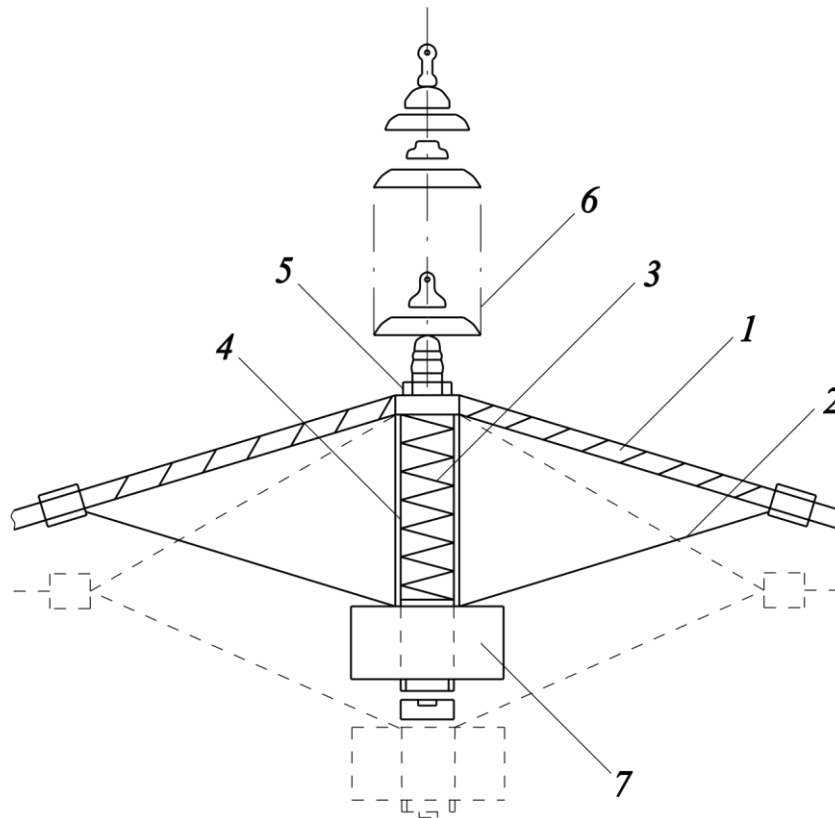


Рис 2.5. Комбінований ТК

1 – провід, 2 – трос, 3 – термочутливий елемент, 4 – телескопічний корпус для термочутливого елемента, 5 – затискач, 6 – ізолятори, 7 – вантаж

ТК зі значним ходом (рис. 2.6). Відзначається, що ТК такої конструкції при спрацюванні створюють одночасно зусилля на розтягування (стискування) та скручування, що створює оптимальні умови для видалення снігу та льоду з проводів.

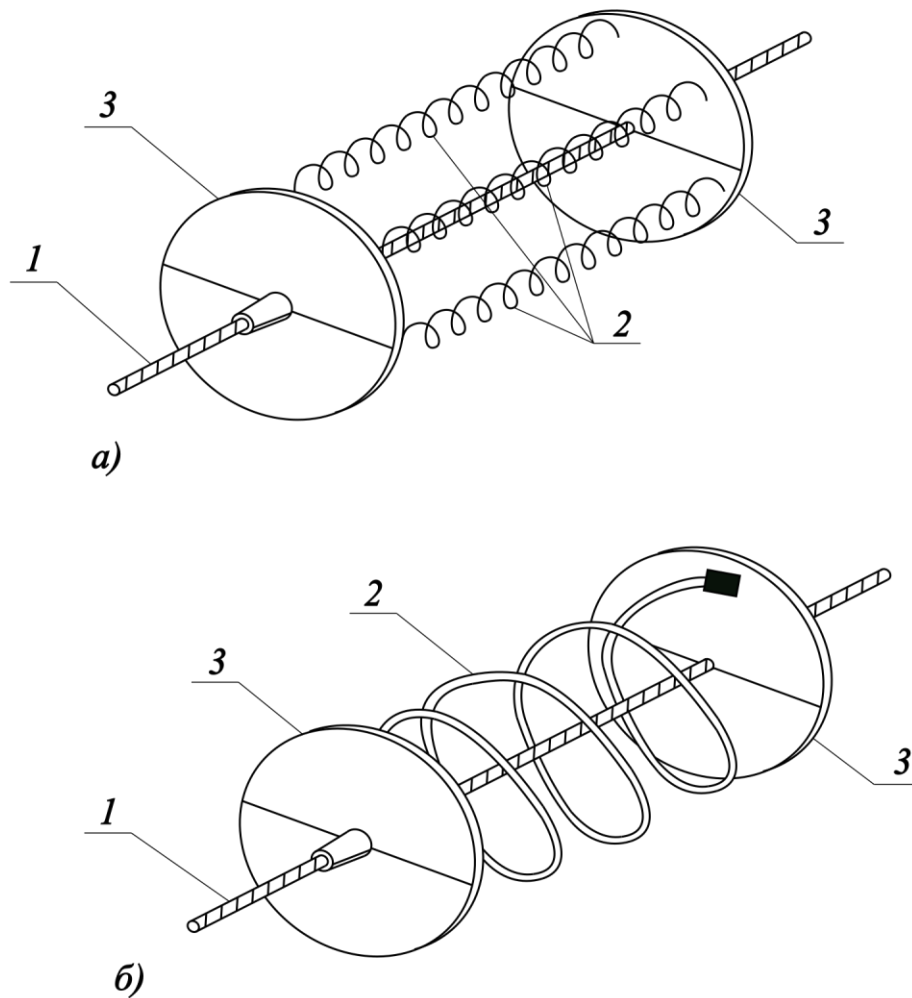


Рис 2.6. ТК зі значним ходом

1 – провід; 2 – термочутливий елемент; 3 – затискач;

а) силовий елемент виконаний з декількох пружин; б) силовий елемент виконаний з однієї пружини

ТК для ЛЕП з розщепленням фаз (рис. 2.7). В цьому випадку термочутливі елементи виконуються у вигляді пружини, яка кріпиться між сусідніми розпірками на розщепленій фазі.

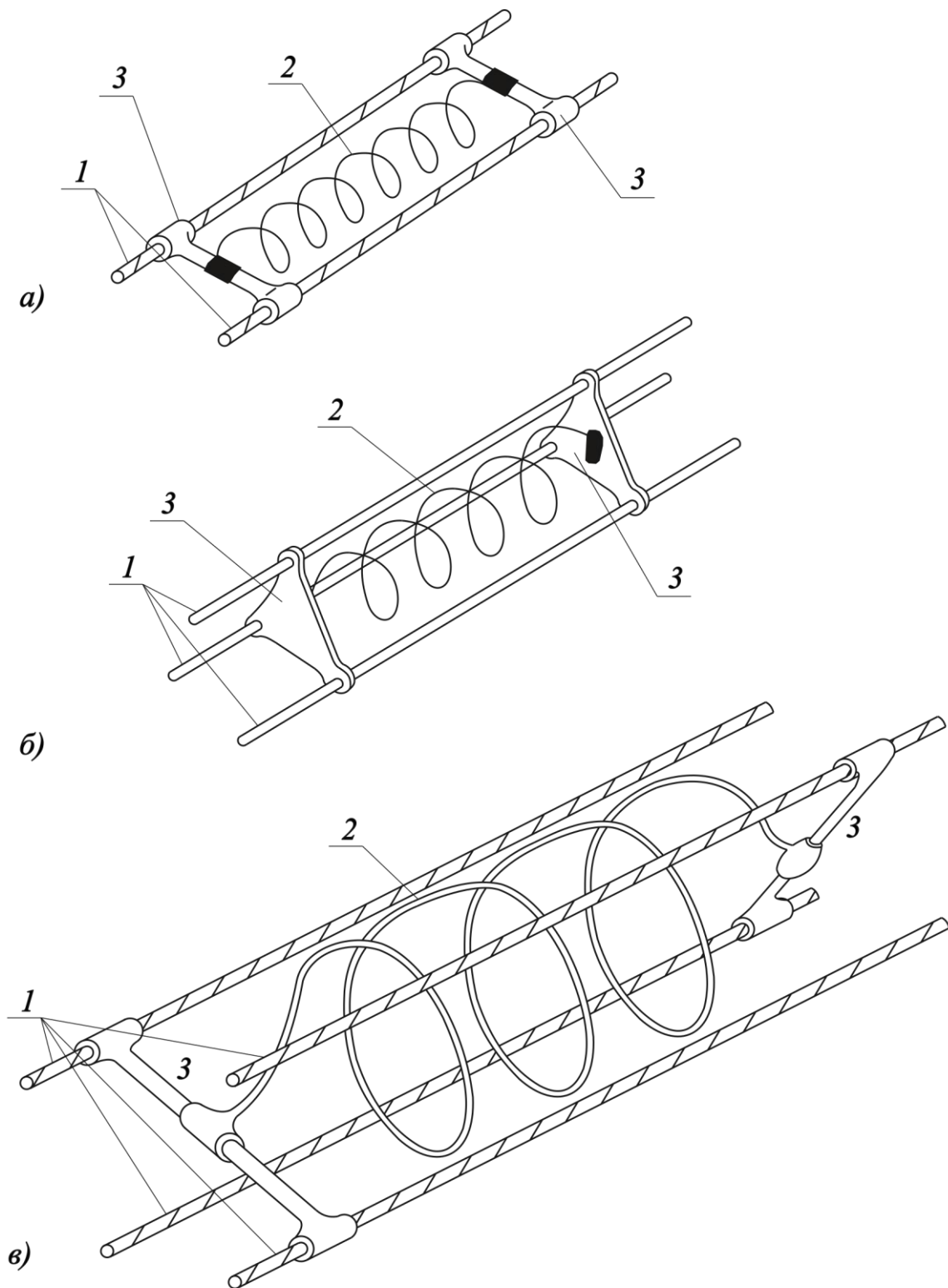


Рис 2.7. ТК для ЛЕП з розщепленням фаз

1 – проводи фази; 2 – термочутливий елемент; 3 – розпірки;  
 а) розщеплення фази на два провідники; б) розщеплення фази на три провідники; в) розщеплення фази на три провідники

ТК, закріпленений на ізоляторі (рис. 2.8). На рисунку показані різні варіанти кріплення ТК до ізоляторів.

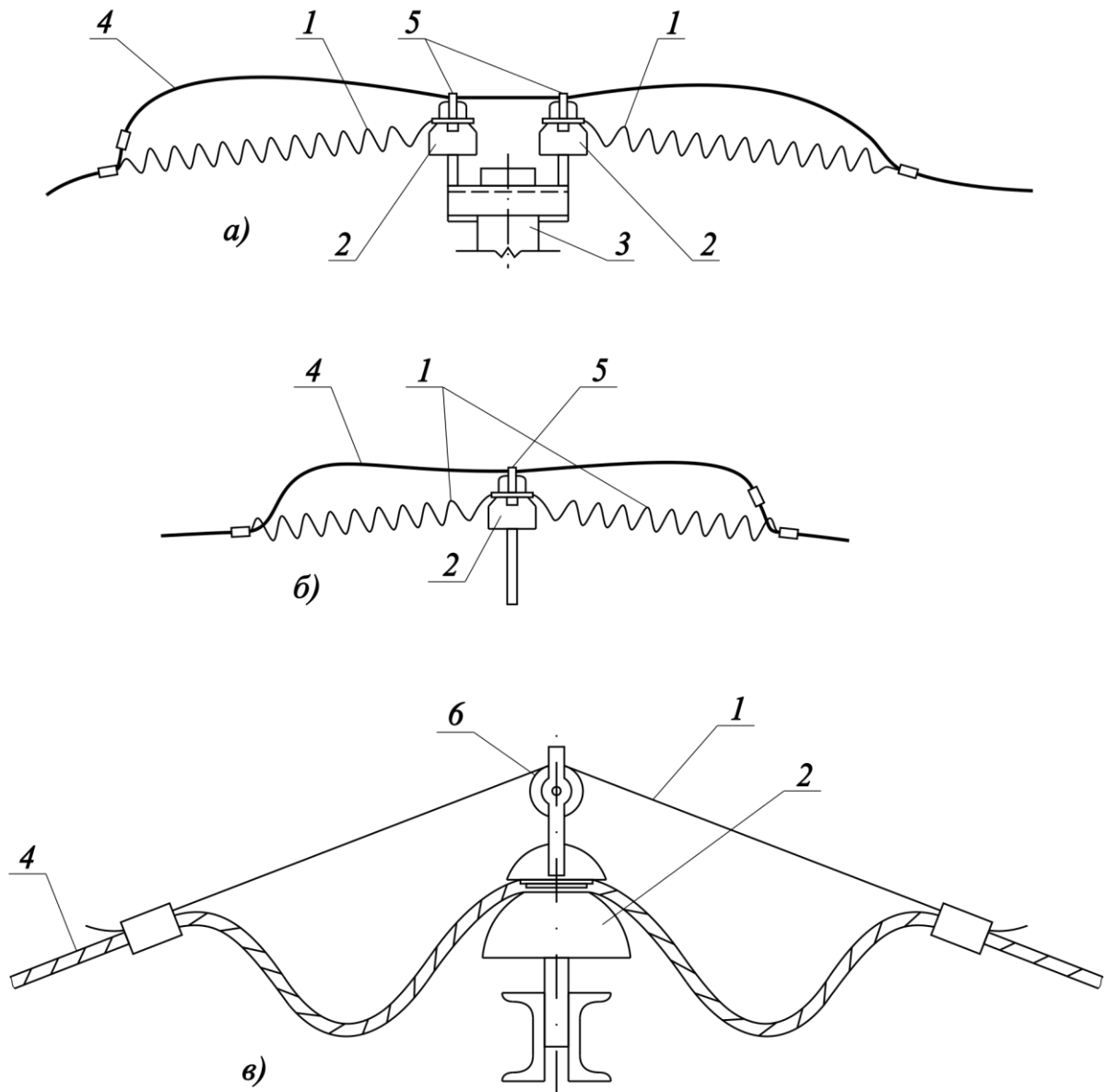


Рис 2.8. ТК, закріпленений на ізоляторі

1 – термочутливі елементи; 2 – ізолятор; 3 – анкерна опора; 4 – провід; 5 – притискні скоби; 6 – ролик;

а) кріплення ТК до ізолятора на анкерній опорі; б) кріплення ТК до одного ізолятора на проміжній опорі; в) кріплення струнного ТК до ізолятора.

Цією темою займалися і в інших країнах світу. В Україні випробування ТК на практиці проводилися в 1990-х роках. Схожі системи розроблялися також в Японії [14].

В японському патенті JPS592521A (1984) “Aerial transmission line extending absorber” [27] описується ЛЕП з ТК.

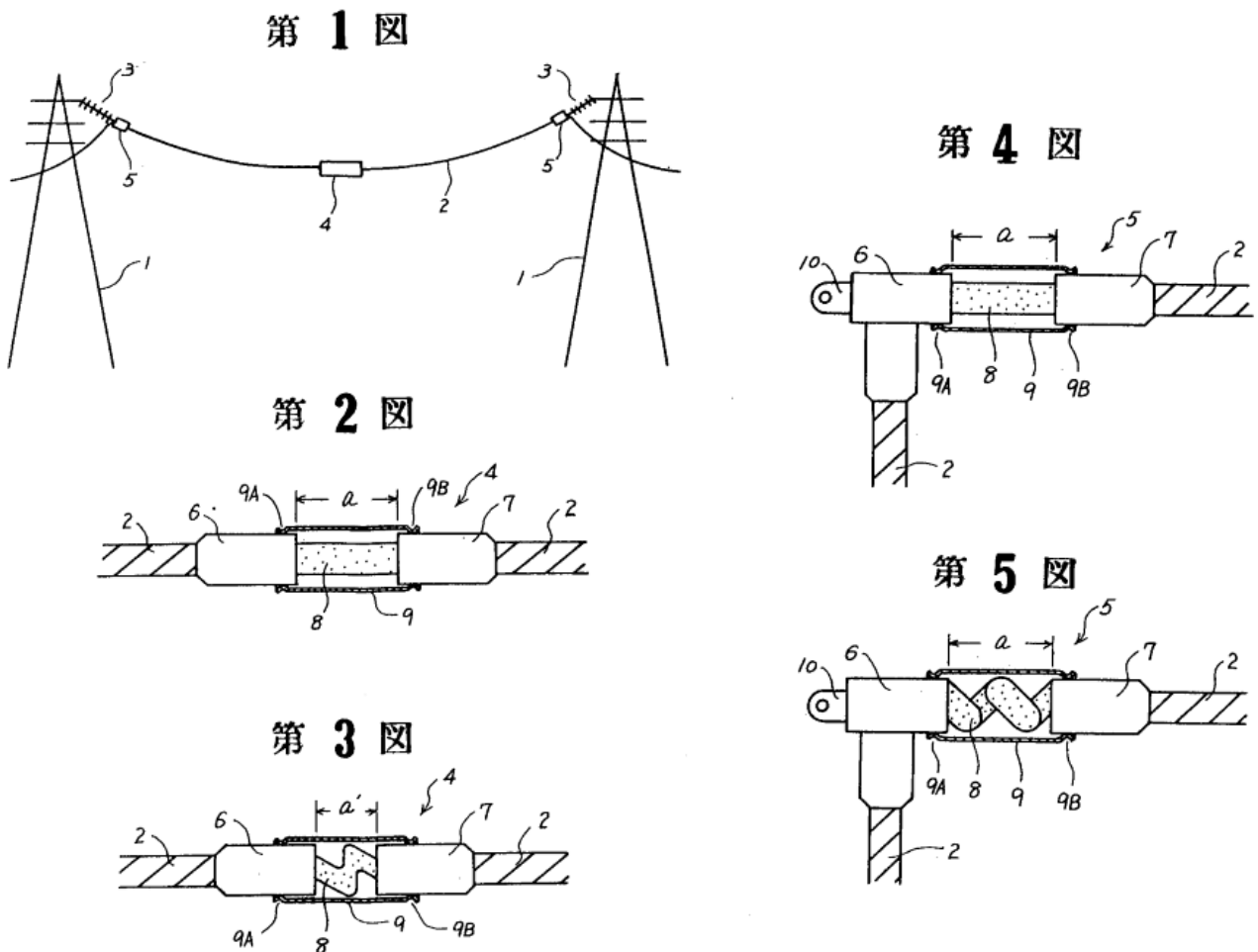


Рис. 2.9. Ілюстрації ЛЕП з ТК з патенту JPS592521A

Особливістю цього варіанту є те, що ТК встановлюється в розрив лінії.

Далі розглянемо розвиток дизайну ТК з патенту SU754541.

Патент RU2072601 (1997) “Воздушная линия электропередачи” [28] (розроблений українськими вченими). На частини проводів ЛЕП, паралельно до яких прикріплюються ТК монтуються феромагнітні екрани. Це робиться для того, щоб ТК спрацьовували при нагріванні струмом, що протікає по лінії, а також при підвищенні температури навколишнього середовища. Феромагнітні

екрани збільшують опір проводу, при цьому через ТК протікає більший струм ніж у випадку без екранів.

Далі варто розглянути, мабуть, найцікавішу закордонну розробку – патент США US6864421B1 (2005) “Sag compensating device for suspended lines” [29]. Він містить два варіанти ТК. У тексті патенту згадуються українські конструкції, відповідно автори від них відштовхувались.

Перший варіант конструкції ТК з патенту US6864421B1 це т.зв. “SLiM” – Sagging Line Mitigator (рис. 2.10). Всередині корпусу монтується термочутливий елемент, який набирається з дротів зі сплаву з ЕПФ. Під час спрацювання термочутливий елемент зменшує свою довжину. Цей рух посилюється та передається проводу лінії через важільний механізм. Пристрій встановлюється в розрив лінії.

Другий варіант конструкції ТК це “Smart Conductor” (рис. 2.11). Принцип роботи її такий самий, як і в попередньому пристрої, але без використання важільного механізму. Зусилля від термочутливого елемента, який в цьому випадку монтується в трубчастому алюмінієвому корпусі передається безпосередньо до проводу лінії. При цьому робочий хід ТК суттєво менший ніж у попередньому випадку. Пристрій також встановлюється в розрив лінії.

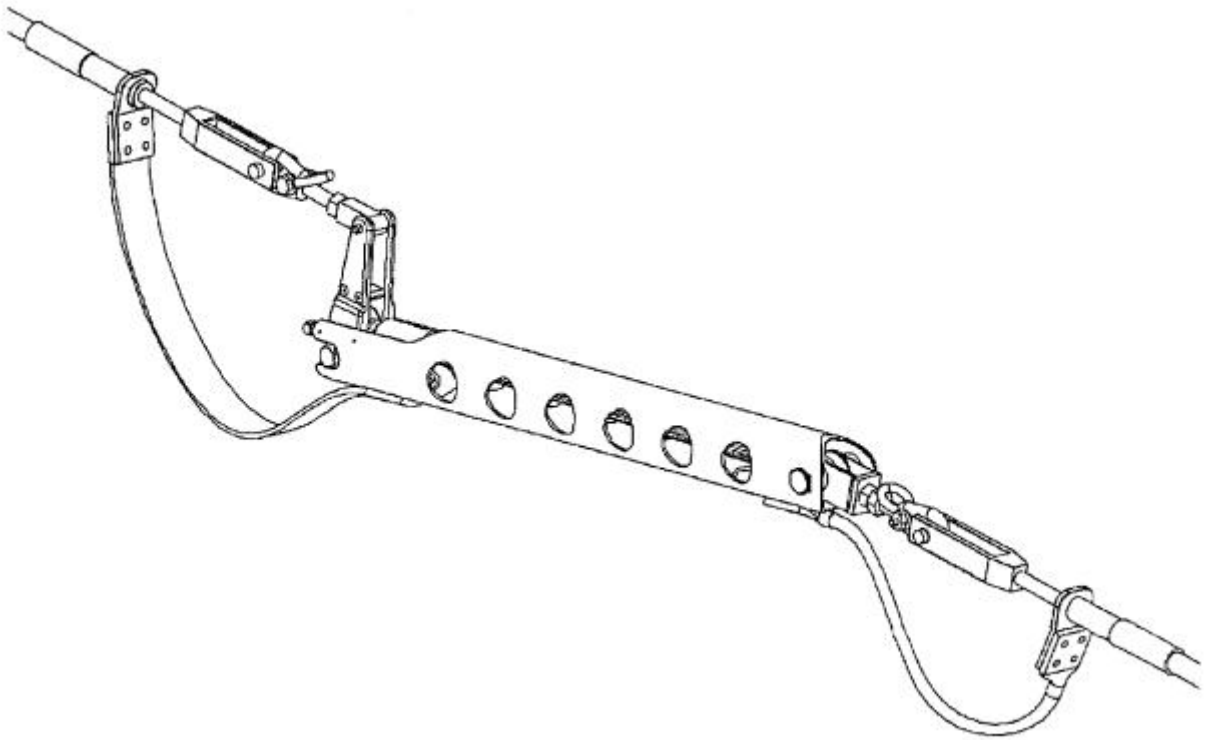


Рис 2.10. Sagging Line Mitigator з патенту US6864421B1

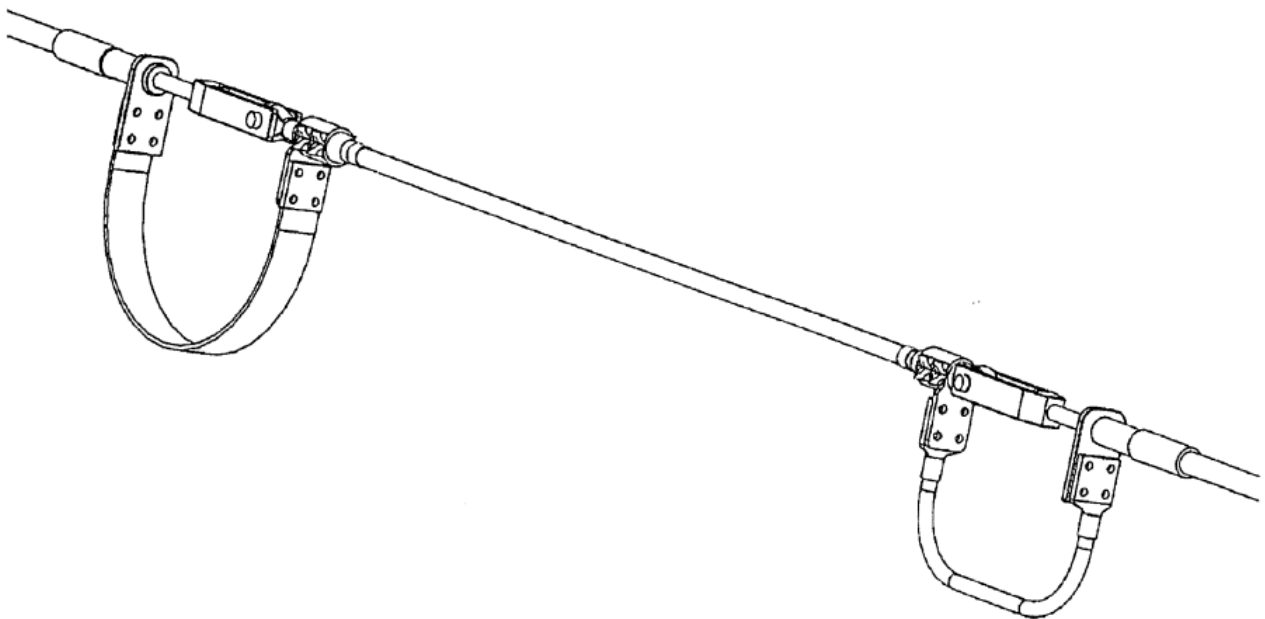


Рис 2.11. Smart Conductor з патенту US6864421B1

Одним із ТК, які найближче підійшли до комерційного впровадження є SLiM. SLiM було розроблено в американській компанії Material Integrity Solutions (MIS). Його детально досліджували та тестували в таких компаніях:

MIS, Pacific Gas and Electric Company, Hydro Quebec Institute of Research (IREQ) та Kinectrics. SLiM було встановлено та протестовано в електричних мережах San Diego Gas and Electric (персонал відзначив простоту встановлення цього пристрою) та Sichuan Electric Power Company (Китай) [30].

Веб-сторінка Sagging Line Mitigator (SLiM), на офіційному сайті компанії-виробника Power Transmission Solutions [31].

Дослідження SLiM та його випробування показали хороші результати, які підтверджують доцільність його застосування на практиці [32].

Стаття про SLiM в журналі [33].

Стаття про SLiM на сайті [34].

Публікації про SLiM [35].

Публікація на конференції про SLiM [36].

SLiM було досліджено в Південній Африці Кевіном Лусі (Kevin Lussi). Результати цього дослідження стали основою для його магістерської дисертації [37, 38].

Магістерська дисертація про SLiM (Бразилія) [39].

Бакалаврська робота про SLiM (Бразилія) [40].

Вищезгадані дисертації та дипломні роботи стосуються переважно механічної частини ТК.

На цей момент SLiM знаходиться на етапі пошуку фінансування для масового виробництва. Етапи розробки, перевірки сторонніми організаціями, експериментального встановлення були виконані, однак на ринку цей пристрій ще не представлений [41].

Порівняння цього ТК з українським варіантом показало, що американський ТК має суттєво ускладнену конструкцію, він має рухомі елементи, що робить його більш вразливим та менш надійним, враховуючи те, що ТК працюють в складних умовах. Американський ТК має велику кількість елементів з різних матеріалів, що робить процес його виготовлення складнішим та фінальний продукт дорожчим за український варіант. Також процес встановлення

американського ТК вимагає розрізання проводу лінії, на відміну від українського варіанту [18].

Також можна згадати патент США US2014/0021327A1 (2014) “Adjustable suspension of transmission lines”. В ньому описується система регулювання стріли провисання повітряних ліній електропередавання, телефонного зв’язку, тощо (рис. 2.12). Суть полягає в тому, що провід лінії приєднується до допоміжного проводу, який підвішується над проводом, висота підвішування якого регулюватиметься. З’єднання проводів відбувається через рухомі елементи (з використанням двигунів, гідравлічно, зокрема і з використанням сплавів з ЕПФ). В цьому варіанті матеріали з ЕПФ не відіграють вирішальну роль для роботи системи.

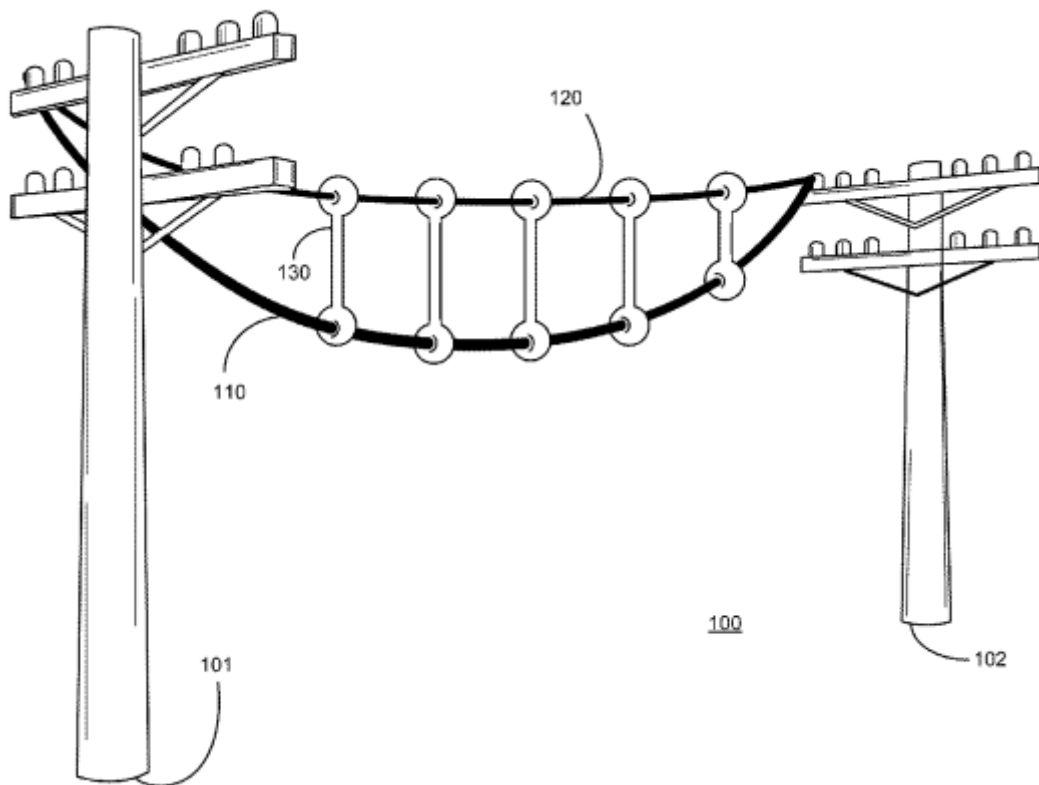


Рис 2.12. Ілюстрація ЛЕП з системою регулювання стріли провисання з патенту  
US2014/0021327A1

101, 102 – опори, 110 – провід ЛЕП, 120 – допоміжний провід, 130 – рухомі елементи.

## **2.2. Конструкція термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту**

Більшість ТК, описаних в попередньому підрозділі, мають суттєвий недолік – вони спрацьовують лише при нагріванні через вплив навколишнього середовища.

Отже може виникнути така ситуація, коли провід має температуру, при якій потрібно скомпенсувати його видовження, а ТК не спрацьовує, бо його термочутливий елемент має набагато нижчу температуру за точку спрацювання.

Якщо термочутливий елемент ТК має електричний контакт з проводом, через цей елемент протікатиме частина струму лінії, однак, як правило, величини цього струму не достатньо для його нагрівання до температури спрацювання. Деякі ТК пропускають через термочутливий елемент струм достатній для його спрацювання, однак вони мають конструкцію, що вимагає розрізання проводу лінії для встановлення їх на провід, що знижує надійність лінії через появу додаткових контактних з'єднань та значно ускладнює їх монтаж.

Для розв'язання цієї проблеми існують конструкції ТК, які мають феромагнітні елементи, які встановлюються на частину проводу, паралельно до якої прикріплений термочутливий елемент ТК.

Остання конструкція ТК з феромагнітними елементами це ТК з кільцями з магнітом'якого композиту (ММК) [42].

ММК складається з порошкоподібних феромагнітних частинок, вкритих ізоляційним шаром, що спресовуються при виготовленні виробів із цього матеріалу. ММК має низку важливих переваг, а саме: можливість виготовлення деталей складної форми, використання меншої кількості сировини при виготовленні деталей з цього матеріалу, отримання виробів з ізотропними магнітними та термічними властивостями матеріалу в трьох вимірах, можливість змінювати характеристики матеріалу в широких межах та ін. Це дозволяє успішно використовувати ММК ефективно замінюючи електротехнічну сталь та ферити.

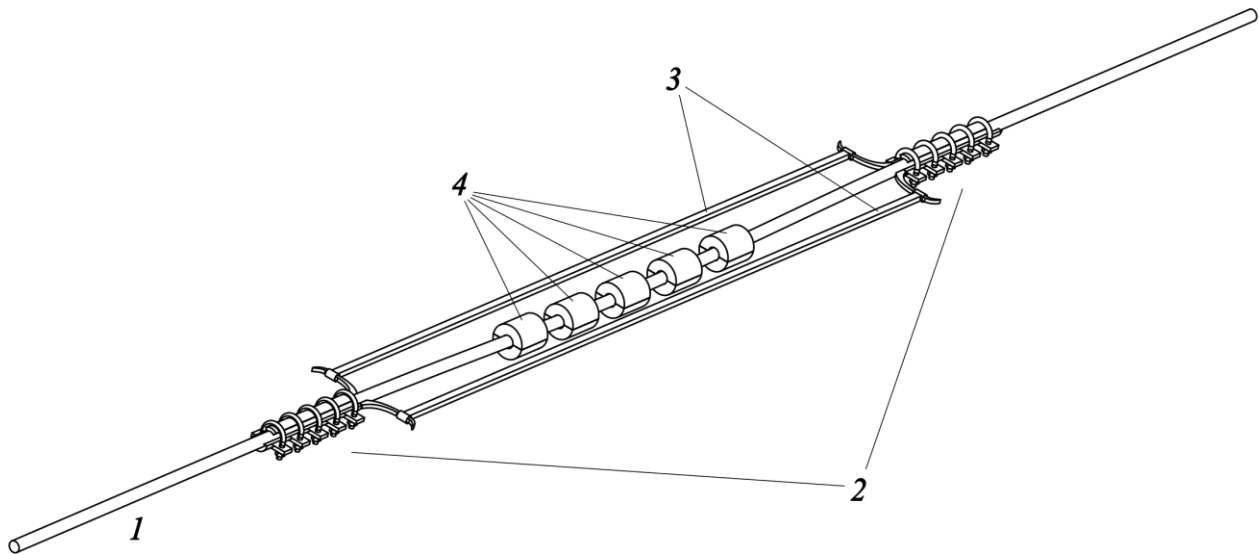


Рис. 2.13. ТК з кільцями з ММК

1 – провід ЛЕП, 2 – вузли кріплення ТК до проводу, 3 – термочутливі елементи ТК, 4 – кільця з ММК, які складаються з півкілець

На рис. 2.13 кільця з ММК 4 збільшують реактивний (індуктивний) опір проводу 1, при цьому через ТК, а саме через його термочутливі елементи 3 протікає більший струм ніж у випадку без кілець. Характеристики кілець обираються таким чином, щоб забезпечити нагрівання термочутливих елементів ТК до температури спрацювання за певного обраного значення струму лінії та умов навколишнього середовища.

При монтажі кожне півкільце кріплять на проводі та склеюють з відповідним півкільцем магнітним клеєм.

Для подальшого аналізу була обрана саме ця конструкція.

## **РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТЕРМОКОМПЕНСАТОРА З КІЛЬЦЯМИ З МАГНІТОМ'ЯКОГО КОМПОЗИТУ**

### **3.1. Постановка задачі та вибір методів дослідження**

Як вже було сказано вище, використання компенсаторів температурного видовження проводів повітряних ЛЕП дозволяє автоматично зменшувати стрілу провисання проводу ЛЕП при збільшенні його температури. Це дає змогу збільшувати навантаження наявних ЛЕП або при спорудженні нових ЛЕП, не порушуючи обмежень зменшувати висоту опор або збільшувати відстань між ними, що покращує економічні показники ЛЕП. Також через обмеження стріли провисання проводів ЛЕП при підвищених температурах можна досягти підвищення надійності систем електропостачання.

Перспективну конструкцію має ТК з кільцями з ММК. Одним із важливих виборів при реалізації вказаної конструкції на практиці є вибір способу фіксації кілець з ММК на проводі лінії. Є кілька очевидних варіантів. Перший це фіксація кільця на проводі з допомогою матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. Другий спосіб фіксації полягає у відсутності проміжних елементів між кільцем та проводом. В цьому випадку кільце може вільно пересуватись вздовж проводу в межах ТК.

Різні способи фіксації кільця з ММК по-різному впливатимуть умови роботи ТК. В цій роботі досліджується вплив двох різних способів фіксації кілець з ММК на проводі повітряної ЛЕП на електричне поле.

За результатами аналізу електричного поля аналізуватиметься температурний режим роботи ТК (секції з кільцем з ММК, встановленим на проводі) для того, щоб перевірити чи обраний спосіб фіксації кільця з ММК не створює проблем для проводу, кільця з ММК та інших елементів з точки зору величини та розподілу температур під час роботи лінії.

Для проведення дослідження було обрано метод скінченних елементів. Це метод чисельного розв'язування диференціальних рівнянь з частинними похідними. Щоб розв'язати задачу, метод скінченних елементів поділяє велику

систему на менші, простіші частини, які називаються скінченними елементами. Це досягається певною дискретизацією простору, що реалізується побудовою сітки об'єкта: числової області для розв'язку, яка має кінцеве число точок. Формулювання крайової задачі методом скінченних елементів дозволяє отримати систему алгебраїчних рівнянь. Метод апроксимує невідому функцію над предметною областю [43].

Розберемо цей процес детальніше [44].

Одним із перших кроків в методі скінченних елементів це ідентифікація диференційних рівнянь з частинними похідними. Диференційні рівняння з частинними похідними, або диференційна форма відома також як сильна форма, а інтегральна форма відома як слабка. Для прикладу розглянемо диференційне рівняння нижче. Рівняння множиться на пробну функцію  $v(x)$  з обох сторін та інтегрується в межах  $[0,1]$ .

$$u''(x) = f(x) \quad (1)$$

$$\int u''(x)v(x) = \int f(x)v(x) \quad (2)$$

Далі використовуючи інтегрування частинами, ліва сторона рівняння може бути спрощена до:

$$u'(x)v(x)|_0^1 - \int u'(x)v'(x) = \int f(x)v(x) \quad (3)$$

Як бачимо, попереднє диференційне рівняння вимагало, щоб  $u(x)$  була диференційована принаймні двічі, тоді як інтегральне рівняння – лише один раз. Цей принцип працює і для багатовимірних функцій, але похідні замінюються градієнтами та дивергенціями.

Після того, як була встановлена інтегральна або слабка форма, наступний крок це дискретизація слабкої форми. Інтегральна форма має бути чисельно розв'язана, тому інтегрування конвертується в суму, яка може бути чисельно розв'язана. Також однією з основних цілей дискретизації є конвертування інтегральної форми в набір матричних рівнянь, які можуть бути розв'язані використовуючи матричну алгебру.

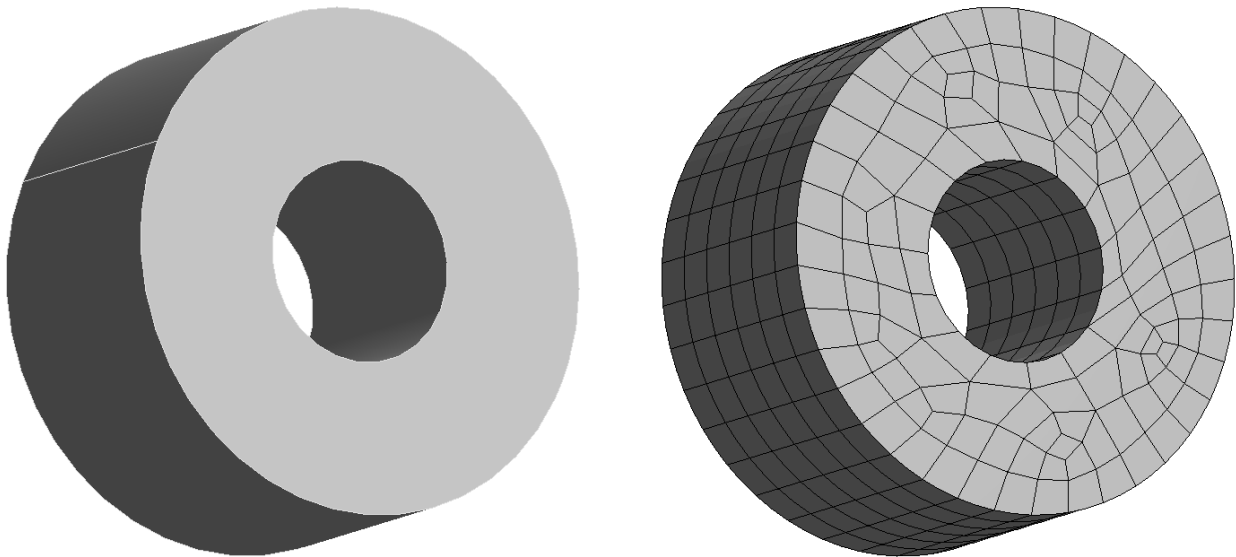


Рис. 3.1. Приклад поділу об'єкта, обраного для аналізу на «елементи» за допомогою сітки («mesh»)

Модель для аналізу поділяється на дрібні фрагменти («елементи»), в кутах кожного елемента знаходяться вузли. Невідома функція  $u(x)$  розраховується у вузлових точках. Інтерполяційні функції визначені для кожного елемента з метою інтерполяції значень всередині елемента використовуючи вузлові значення. Отже, невідома функція може бути записана як:

$$u(x) = \sum_{n=1}^{nen} N_i u_i, \quad (4)$$

де  $nen$  – кількість вузлів у елементі;

$N_i, u_i$  – інтерполяційна функція та невідомі, пов'язані з вузлом  $i$  відповідно.

Так само інтерполяція може бути застосована до інших функцій –  $v(x)$  та  $f(x)$ , які присутні у слабкій формі, щоб можна було записати цю слабку форму як:

$$\left( \sum_{n=1}^{nen} N_i u_i \right)' \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i v_i \right) \Big|_0^1 - \int \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i u_i \right)' \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i v_i \right)' = \int \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i f_i \right) \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i v_i \right) \quad (5)$$

$$\left( \sum_{n=1}^{nen} N_i' u_i \right) \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i v_i \right) \Big|_0^1 - \int \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i' u_i \right) \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i' v_i \right) = \int \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i f_i \right) \left( \sum_{n=1}^{nen} N_i v_i \right) \quad (6)$$

Схеми додавання можна записати як матричні добутки;

$$\sum_{n=1}^{nen} N_i f_i = [M]\{f\} \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{nen} N'_i f_i = [M']\{f\} \quad (8)$$

Слабку форму тепер можна спростити до матричної форми  $[K]\{u\}=\{f\}$ :

$$\{v\}^T [[M]^T [M']]|_0^1 \{u\} - \{v\}^T [\int [M']^T [M']] \{u\} = \{v\}^T [\int [M]^T [M]] \{f\} \quad (9)$$

$$[[M]^T [M']]|_0^1 - \int [M']^T [M']] \{u\} = [\int [M]^T [M]] \{f\} \quad (10)$$

$\check{[K]}$   $\check{[R]}$

Зверніть увагу, що пробна функція  $v(x)$  вже не фігурує в результуючому матричному рівнянні.  $[K]$  відома як матриця жорсткості,  $\{u\}$  це вектор вузлових невідомих, а  $\{R\}$  це вектор залишків.

Після встановлення метричних рівнянь, вони передаються розв'язувачу, який розв'язує систему рівнянь.

Метод скінченних елементів був реалізований за допомогою програмного засобу Ansys. Ansys має інструменти для моделювання багатьох фізичних процесів. З допомогою цього засобу можна виконувати симуляції поведінки різних об'єктів (споруд, елементів механізмів, електронних компонентів та ін.) та оцінювати механічні напруження всередині матеріалів, розподіл температур, потоки рідин, тощо. У нашому випадку використовувалось двовимірне та тривимірне моделювання електромагнітних та термічних процесів, що входить в основний функціонал засобу. Результатами моделювання є візуалізація розподілу електромагнітного (в нашому випадку електричного) поля та розподілу температур, що є дуже зручним для подальшого аналізу. Ansys широко використовується в різних сферах науки та промисловості, тому цим обґрунтовується вибір методу дослідження та засіб його реалізації [45].

### **3.2. Аналіз електричного поля кільця з магнітом'якого композиту термокомпенсатора, встановленого на проводі повітряної ЛЕП.**

Як вже було сказано, одним із важливих виборів при реалізації вказаної конструкції на практиці є вибір способу фіксації кільця з ММК на проводі лінії. Аналізувались два випадки. Перший це фіксація кільця на проводі з допомогою матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. Для прикладу пропонується використовувати пружний полімерний матеріал, такий як силікон або подібні полімери. З використанням таких речовин кільце буде зафіксоване на проводі в одному місці та буде захищене від пошкоджень, які можуть виникнути при переміщенні кільця вздовж проводу внаслідок дії вітру та інших факторів. Другий спосіб фіксації полягає у відсутності проміжних елементів між кільцем та проводом. В цьому випадку кільце може вільно пересуватись вздовж проводу в межах ТК.

Різні способи фіксації кільця з ММК по-різному впливатимуть умови роботи ТК. Далі в цій роботі досліджується вплив двох різних способів фіксації кільця з ММК на проводі повітряної ЛЕП на електричне поле з метою визначення кращого способу.

Аналіз електричного поля проводився з використанням методу скінченних елементів за допомогою програмного засобу *Ansys Electronics Desktop Student 2024 R2 (тип аналізу Maxwell 2D, Electrostatic)*.

Для аналізу обрана частина проводу АС 120/19 (діаметр – 15.2 мм) зі встановленим на ньому кільцем з магнітом'якого композиту (ММК). Габарити кільця – довжина 25 мм, внутрішній діаметр 20 мм, зовнішній діаметр 50 мм. ЛЕП з напругою 110 кВ (мінімальний клас напруги, при якому, як правило, коронний розряд починає створювати проблеми). Марка проводу обрана як одна із рекомендованих правилами улаштування електроустановок для ЛЕП цього класу напруги.

Моделі мають вигляд перерізів, які знаходяться в повітрі окресленому квадратом зі стороною 250 мм, на його сторони накладене обмеження (“Boundary”) типу “Baloon” за напругою. Провід знаходився під напругою 110 кВ (“Excitations”). Параметри “Solution Setup” та сітка (“Mesh”) були залишені за замовчуванням. Характеристики матеріалів, які використовувались при моделюванні подані в таблиці:

Таблиця 1. Характеристики матеріалів

Матеріал	Діелектрична проникність	Електропровідність, См/м	Джерело
Повітря	1.0006	0	Взято зі стандартної бібліотеки.
Алюміній	1	38000000	Взято зі стандартної бібліотеки.
Полімер	3	$10^{-15}$	Взято зі стандартної бібліотеки (матеріал “rubber_hard”, характеристики якого близькі до силікону.
ММК	12	0.001	Діелектрична проникність взята з матеріалу “ferrite”, а електропровідність була зменшена в 10 разів, оскільки ММК великою мірою складаються з ізоляційного матеріалу.

Примітка: характеристики ММК є приблизними, але експерименти зі зміною діелектричної проникності в межах 8-30 та електропровідністю в межах 0-0,01 не призводили до значимих змін в результатах моделювання.

Результати моделювання подані на рисунках:

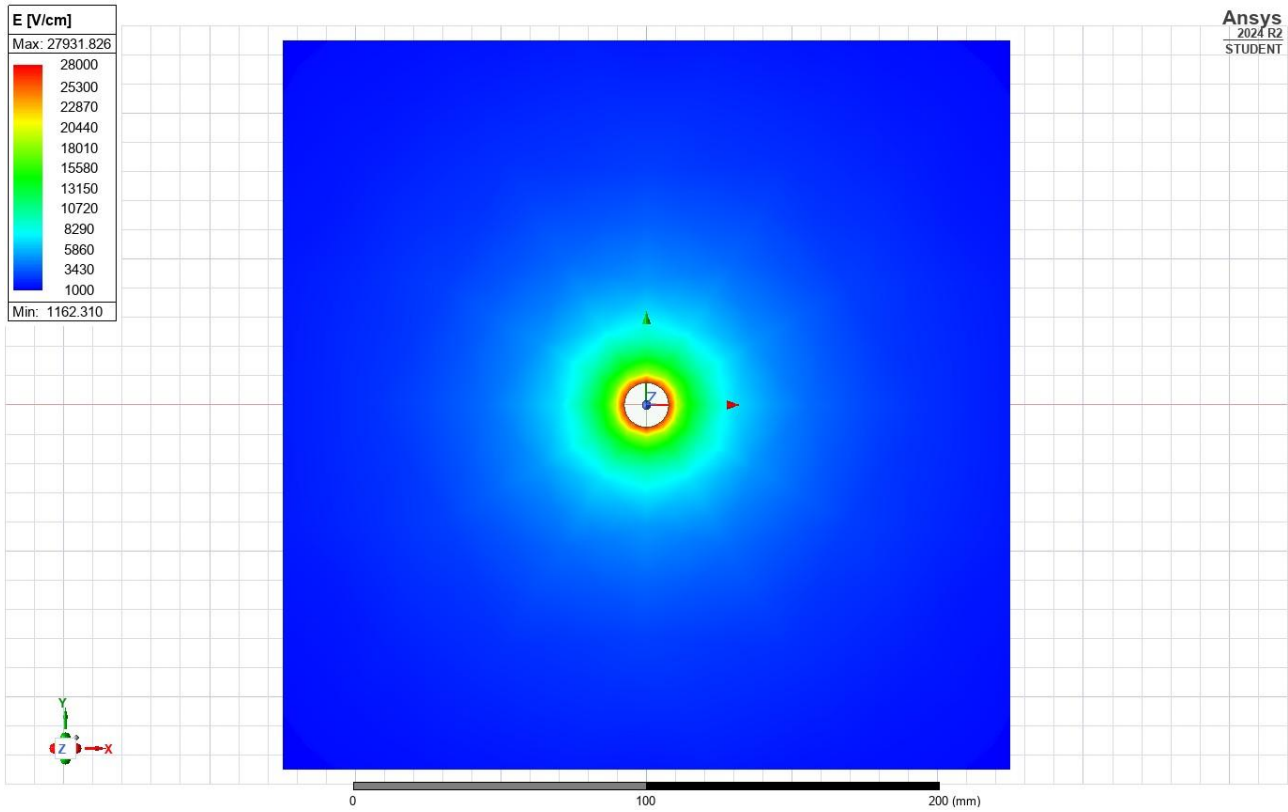


Рис. 3.2. Контрольний випадок (модель проводу).

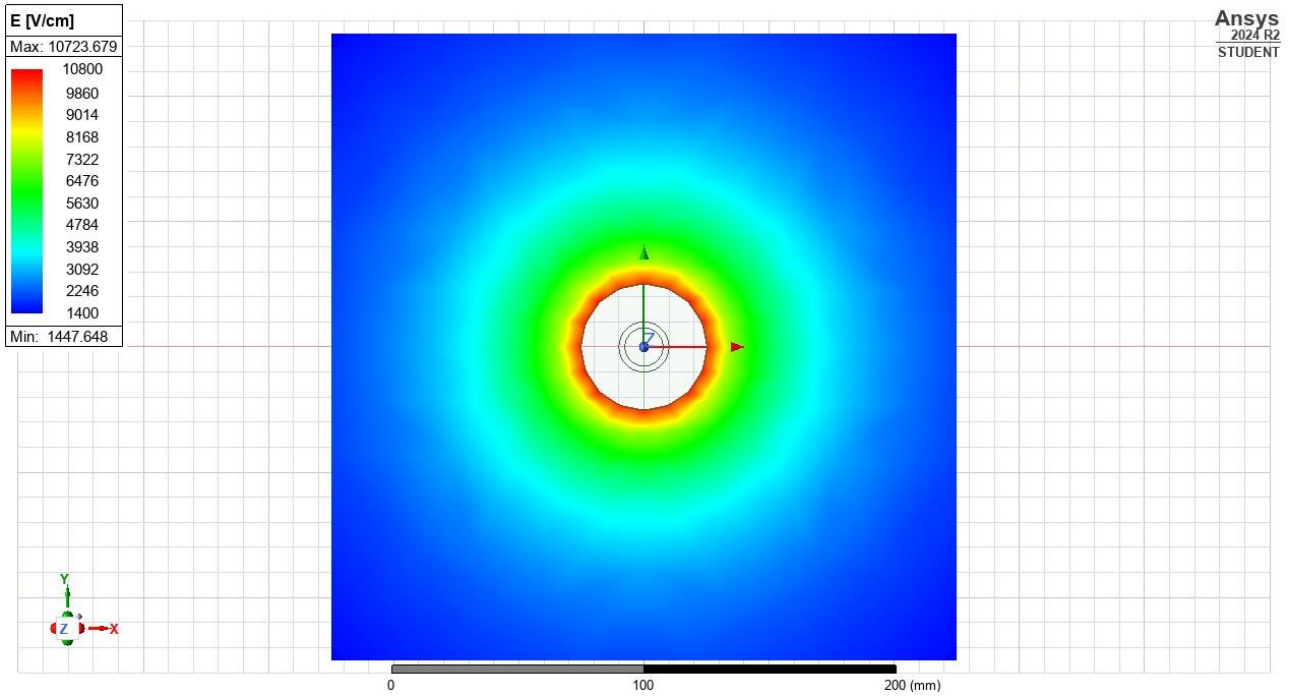


Рис. 3.3. Результат моделювання для кільця, зафіксованого на проводі з використанням полімерного матеріалу.

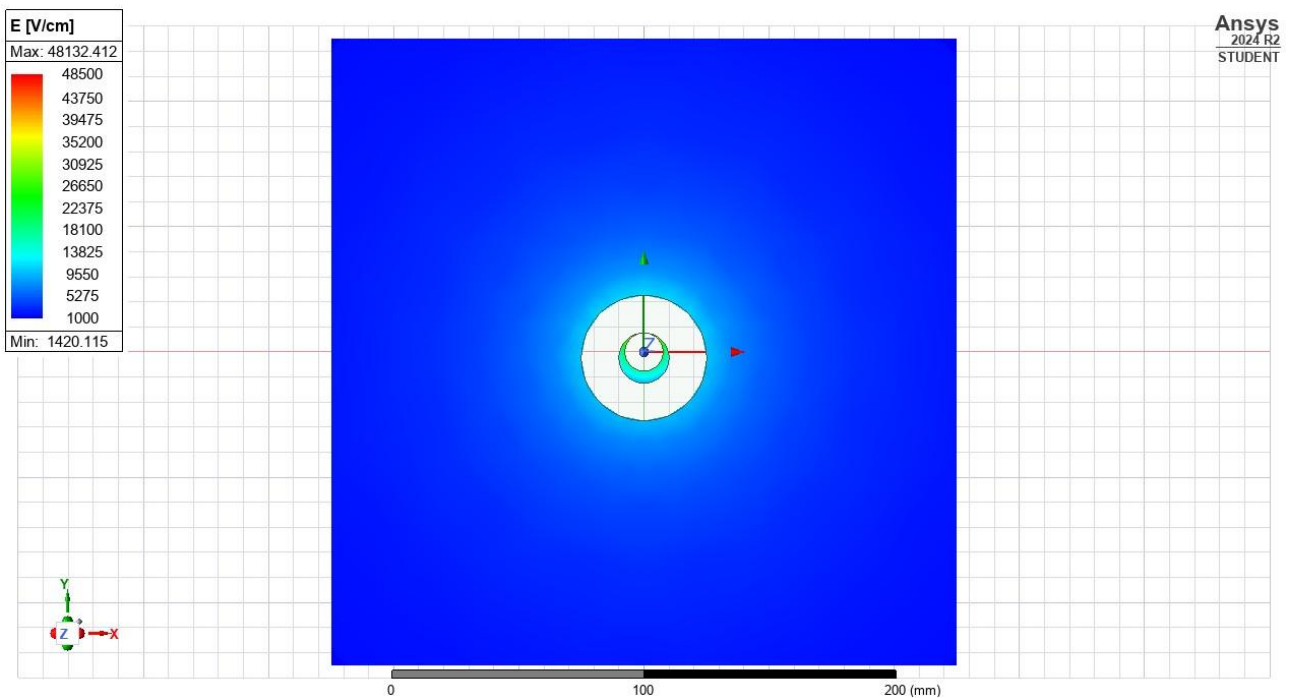


Рис. 3.4. Результат моделювання для кільця вільно розміщеного на проводі.

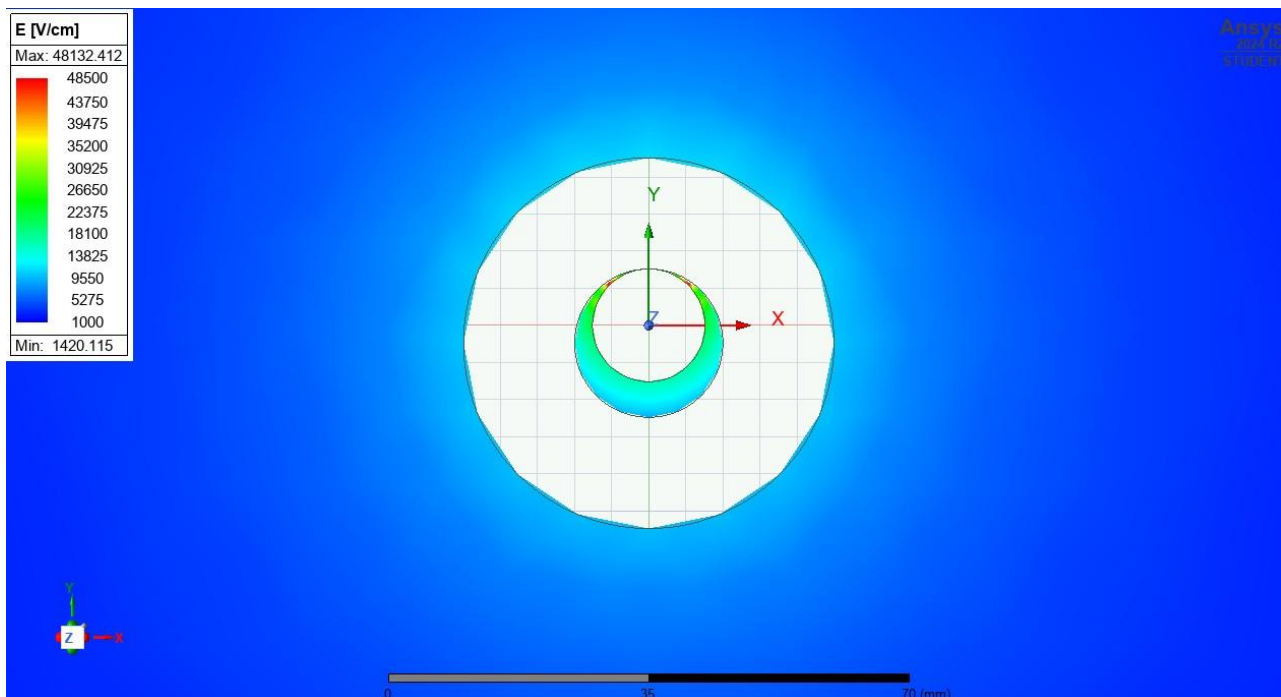


Рис. 3.5. Результат моделювання для кільця вільно розміщеного на проводі (збільшено).

Аналіз результатів. Для випадку фіксації кільця з ММК на проводі за допомогою полімерного матеріалу, максимальна напруженість електричного поля виявилась суттєво меншою (на 61.6 %) ніж в контрольному випадку. Це пояснюється тим, що в цьому випадку площа поверхні розподілу електричного поля є значно більшою.

У випадку вільного розміщення кільця з ММК на проводі, бачимо концентрацію електричного поля в точці контакту між кільцем та проводом. При цьому максимальна напруженість електричного поля значно більша ніж в контрольному випадку (на 72.3 %) та перевищує значення напруженості електричного поля для появи коронного розряду (30 кВ/см).

Отже, кращим способом фіксації кільця з ММК на проводі є фіксація з використанням полімерного матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. В такому випадку кільце працює в кращих умовах щодо електричного поля. Електричне поле зосереджується на поверхні кільця та максимальна напруженість електричного поля в такому випадку є меншою ніж максимальна напруженість електричного поля на проводі без кільця. Також при

такому способі фіксації кільце знаходиться нерухомо на одному місці на проводі та захищене від пошкоджень внаслідок пересування вздовж проводу.

У випадку вільного розміщення кільця з ММК на проводі, виникають зони появи коронного розряду між проводом та кільцем. Це може створювати проблеми для роботи ЛЕП у вигляді підвищення втрат через коронний розряд та у вигляді локального нагрівання проводу та кільця з ММК, що може призвести до їх пошкодження. Також при такому способі фіксації кільця з ММК на проводі, воно є незахищеним від пошкоджень, які можуть виникати внаслідок переміщення його вздовж проводу [46].

### **3.3. Термічний аналіз кільця з магнітом'якого композиту термокомпенсатора, встановленого на проводі повітряної ЛЕП з допомогою полімеру.**

Крім електричного поля, іншим важливим фактором є температурний режим кільця з ММК, проводу та матеріалу, за допомогою якого кільце фіксується на проводі.

Термічний аналіз проводився з використанням методу скінченних елементів за допомогою програмного засобу *Ansys Student 2024 R2 (тип аналізу Steady State Thermal)*.

Для аналізу обрана (як і в попередньому випадку) частина проводу АС 120/19 (діаметр – 15.2 мм) довжиною 75 мм зі встановленим на ньому кільцем з ММК в центральній його частині. Габарити кільця – довжина 25 мм, внутрішній діаметр 20 мм, зовнішній діаметр 50 мм. Простір між кільцем та проводом заповнений полімерним матеріалом. Модель тривимірна (рис. 3.6). В табл. 2 подані параметри елементів моделі. Елементи моделі знаходились у стані конвекції (всі зовнішні поверхні елементів крім кінців проводу).

Температура навколишнього середовища – 22 °С. Коефіцієнт тепловіддачі (film coefficient) – 45 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [47].

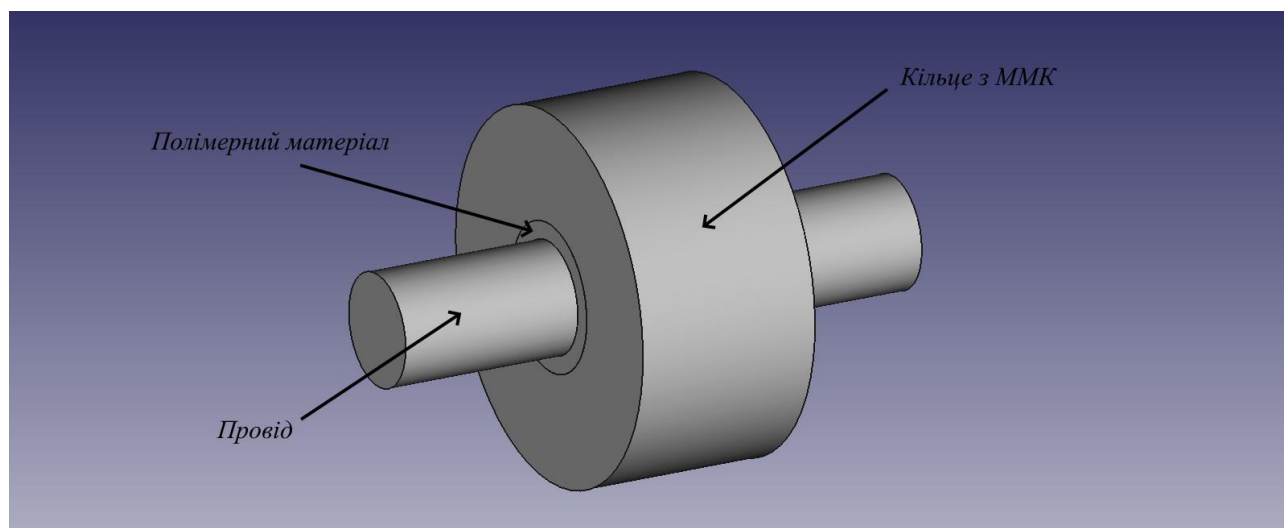


Рис. 3.6. Тривимірна модель для аналізу

Таблиця 2.

### Параметри елементів моделі

Елемент моделі	Матеріал	Ізотропна теплопровідність, Вт/(м·К)	Джерело
Провід	Алюміній	237	Типове значення для алюмінію
Полімерний матеріал	Силікон або подібний полімер	0.5	[48]
Кільце з ММК	ММК	10	[49]

Було зроблено дві моделі. Перша модель це контрольний випадок – провід без будь-яких елементів на ньому. Ця модель використовувалась для того, щоб підібрати потужність, яка повинна розсіюватись в цьому відрізку проводу для нагрівання його до максимальної допустимої температури експлуатації проводу (близько 90 °C). Результат моделювання для цього випадку показаний на рис. 3.7.

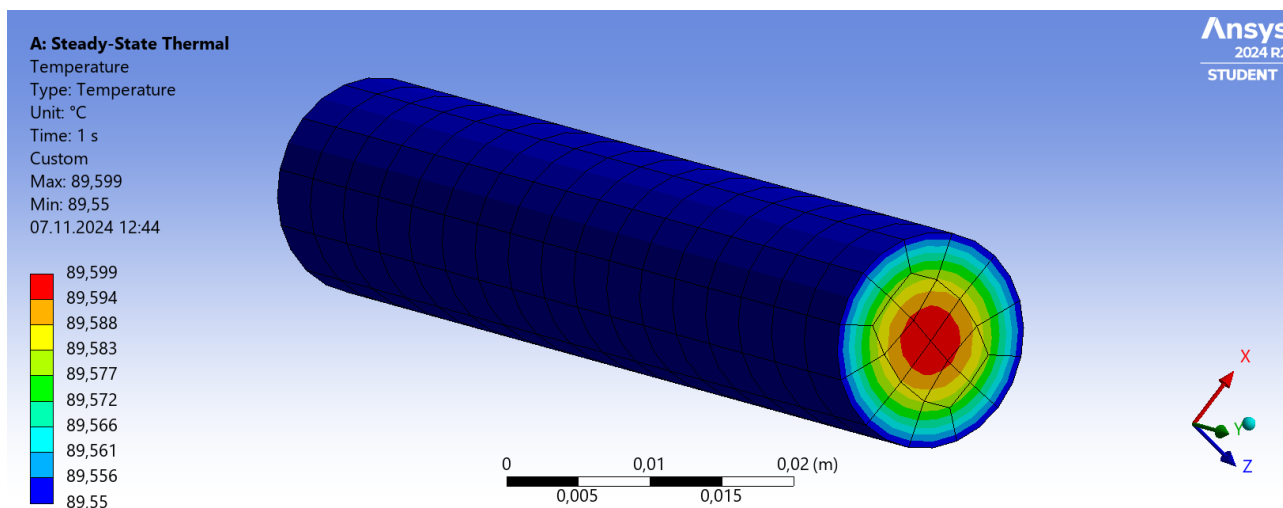


Рис. 3.7. Результат моделювання для першого випадку

З рисунку видно, що провід досить рівномірно розігрітий до температури приблизно 89,6 °C. Для такого результату була підібрана потужність 10,88 Вт.

Друга модель – провід з усіма елементами, як на рис. 3.6, який працює в умовах максимально допустимого виділення тепла (потужність, яка була знайдена з першої моделі). Результати моделювання наведені на рис. 3.8.

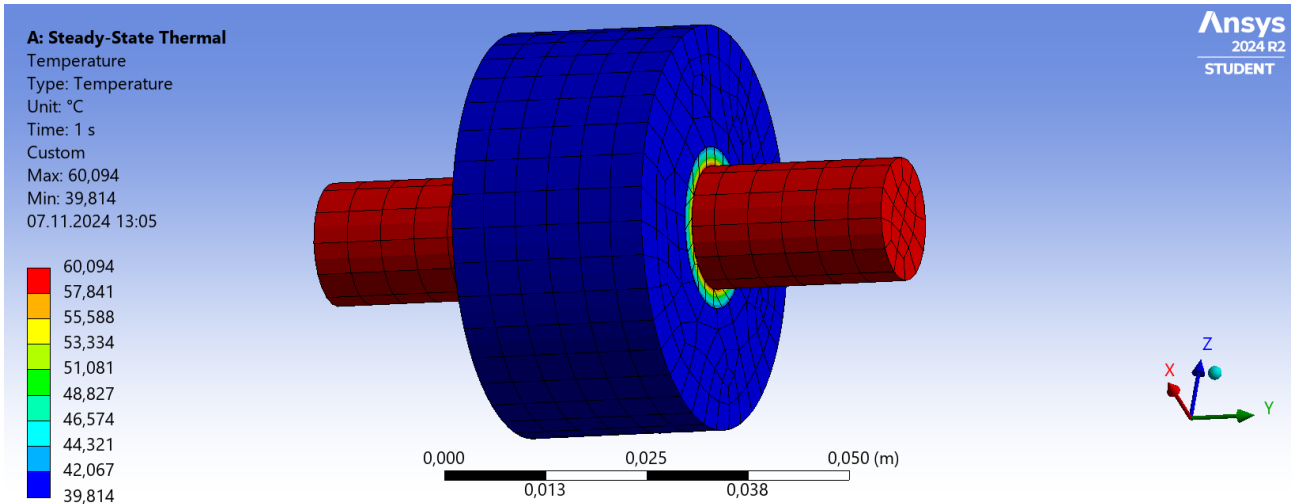


Рис. 3.8. Результат моделювання для другого випадку

Для демонстрації внутрішньої структури моделі на рис. 3.9 зображений переріз моделі з рис. 3.8.

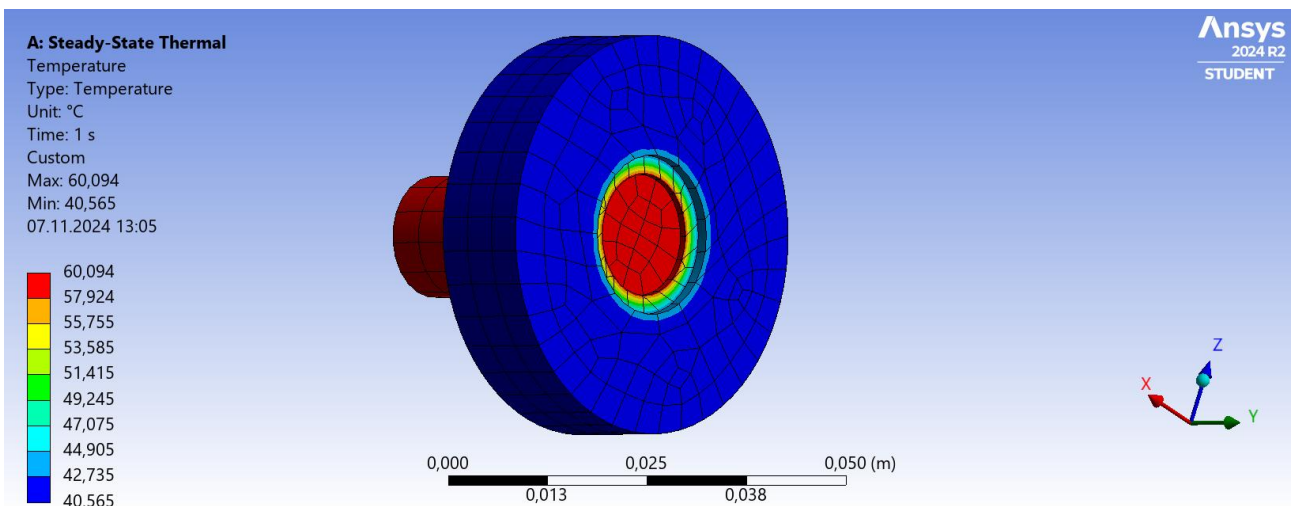


Рис. 3.9. Внутрішній переріз моделі

Аналіз результатів. Максимальна температура елементів моделі виявилась приблизно на 30 °C меншою ніж у контрольному випадку, що пояснюється збільшенням площі поверхні охолодження. Кільце з ММК має досить рівномірну температуру близько 40 °C, що не становить загрози для цього матеріалу. Полімерний матеріал, який заповнює простір між кільцем та проводом має дещо вищу температуру (максимум близько 60 °C), але це також не суттєве значення (наприклад, силікон може експлуатуватися при температурі

більше ніж 200 °С [48]. Провід при цьому має приблизно на 30 °С меншу температуру ніж у контрольному випадку.

Отже, у випадку максимально можливого виділення тепла в проводі повітряної ЛЕП (для довготривалої його експлуатації) температури та їх розподіл в елементах проаналізованої моделі не становлять загрози для цих елементів. Отже, з точки зору температурних процесів спосіб фіксації кілець з ММК на проводі повітряних ЛЕП з допомогою полімерних матеріалів (наприклад, таких як силікон) є допустимим.

## ВИСНОВКИ

Через компенсацію температурного видовження проводів ЛЕП можна не порушуючи обмежень економити кошти при спорудженні нових ЛЕП зменшуючи висоту опор або збільшуючи відстань між ними; можна збільшувати пропускну здатність наявних ЛЕП без їх масштабної реконструкції; а також, збільшувати надійність ЛЕП через обмеження стріли провисання. Для цього використовують різні варіанти ТК.

Перспективною конструкцією ТК є ТК з кільцями з ММК. Кільця з ММК збільшують опір проводу, при цьому через термокомпенсатор, а саме через його термочутливі елементи протікає струм достатній для їх нагрівання та спрацювання. Така конструкція дозволяє ТК працювати при нагріванні проводу лінії як від впливу навколишнього середовища так і від протікання по ньому струму.

Одним із важливих виборів при реалізації вказаної конструкції на практиці є вибір способу фіксації кілець з ММК на проводі лінії. Є кілька очевидних варіантів. Перший це фіксація кільця на проводі з допомогою матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. Другий спосіб фіксації полягає у відсутності проміжних елементів між кільцем та проводом. В цьому випадку кільце може вільно пересуватись вздовж проводу в межах термокомпенсатора.

Кращим способом фіксації кільце з ММК на проводі виявилась фіксація з використанням полімерного матеріалу, який заповнює простір між кільцем та проводом. В такому випадку кільце працює в кращих умовах щодо електричного поля. Електричне поле зосереджується на поверхні кільця та максимальна напруженість електричного поля в такому випадку є меншою ніж максимальна напруженість електричного поля на проводі без кільця. Також при такому способі фіксації кільце знаходиться нерухомо на одному місці на проводі та захищене від пошкоджень внаслідок пересування вздовж проводу.

У випадку вільного розміщення кільця з ММК на проводі, виникають зони появи коронного розряду між проводом та кільцем. Це може створювати проблеми для роботи ЛЕП у вигляді підвищення втрат через коронний розряд та у вигляді локального нагрівання проводу та кільця з ММК, що може призвести до їх пошкодження. Також при такому способі фіксації кільця з ММК на проводі, воно є незахищеним від пошкоджень, які можуть виникати внаслідок переміщення його вздовж проводу.

У випадку максимально можливого виділення тепла в проводі повітряної ЛЕП (для довготривалої його експлуатації) температури та їх розподіл в елементах проаналізованої моделі не становлять загрози для цих елементів. Отже, з точки зору температурних процесів спосіб фіксації кільце з ММК на проводі повітряних ЛЕП з допомогою полімерних матеріалів (наприклад, таких як силікон) є допустимим.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ENTSO-E. (2024). High Temperature Low Sag Conductors (HTLS). <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/high-temperature-low-sag-conductors-htls>
2. Шестеренко, В. Є. (2004). *Системи електроживлення та електропостачання промислових підприємств*. Нова Книга.
3. Shirmohamadi, M. (1998). *Sag compensator for suspended lines using rotary motion*. (U.S. Patent No. 5,792,983). U.S. Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/025067237/publication/US5792983A?q=pn%3DUS5792983A>
4. Hyde, R. A., Kare, J. T., & Wood, JR. L. L. (2014). *Adjustable suspension of transmission lines*. (U.S. Patent No. US 2014/0021327 A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/049945744/publication/US2014021327A1?q=pn%3DUS2014021327A1>
5. Zengin, A. T., Erdemir, G., Akinci, T. C., & Seker, S. (2020). Measurement of power line sagging using sensor data of a power line inspection robot. *IEEE Access*, 8, 99198–99204. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998154>
6. Wald, M. L. (2004, March 4). WHAT'S NEXT; To Avert Blackouts, a Sag-Free Cable. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2004/03/04/technology/what-s-next-to-avert-blackouts-a-sag-free-cable.html>
7. ZMS CABLE IMPORT AND EXPORT Co.,LTD. (2022, April 25). *7 Common Faults In 10KV Overhead Cable Transmission Lines, As Well As The Causes Of Faults And Preventive Measures*. <https://kvcable.com/7-common-faults-in-10kv-overhead-cable-transmission-lines/>

8. Zuo, J., Fan, J., Ouyang, Y., Liu, H., Liu, Y., & Hao, C. (2022). Transmission Line SAG measurement and simulation research based on Non-Contact Electric Field Sensing. *Sensors*, 22(21), 8379. <https://doi.org/10.3390/s22218379>
9. iEngineering Group. (2022, May 13). *Sagging in overhead conductor lines*. <https://www.linkedin.com/pulse/sagging-overhead-conductor-lines-iengineeringgroup>
10. Barnett, D. C. (2013, August 13). Walking Back The Largest U.S. Power Blackout, 10 Years Later. *NPR*. <https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=211735357>
11. P&R Tech. (2021, May 14). *Risks of Aging Power Lines: How to Prevent Disasters with Line Monitoring Technology*. <https://pr-tech.com/blog/old-aging-power-lines-preventing-disasters/>
12. Naranpanawe, L., Ma, H., & Saha, T. (2018). *Overhead Conductor Condition Monitoring (Milestone Report 1)*. The University of Queensland. <https://www.energynetworks.com.au/news/conductor-condition-monitoring-milestone-1-report/>
13. Christian, J. W. (2002). *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044019-4/50031-3> (p. 1102)
14. Schcetky, L. McD. (1994). The current status of industrial applications for shape memory alloys. In R. Yamamoto, E. Furubayashi, Y. Doi, R. Fang, B. Liu, K. Otsuka, C.T. Liu, K. Shimizu, Y. Suzuki, J. Van Humbeeck, Y. Fukai, S. Ono, & S. Suda (Eds.), *Proceedings of the Symposium K: Environment Conscious Materials of the 3rd IUMRS International Conference on Advanced Materials* (pp. 1131-1141). Sunshine City, Ikebukuro, Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8381-4.50265-1>
15. Wu, M. H., & Schetky McD. (2000). Industrial applications for shape memory alloys. In *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies: Proceedings* (pp. 171-182). Pacifig Grove, California. [https://assets.website-files.com/59fcbaf103e295000131288b/5a3192500672a700015ad6c7\\_Nitinol\\_Industrial\\_Applications\\_SMST00.pdf](https://assets.website-files.com/59fcbaf103e295000131288b/5a3192500672a700015ad6c7_Nitinol_Industrial_Applications_SMST00.pdf)

16. Braunovic, M., Myshkin, N. K., & Konchits, V. V. (2006) *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. CRC Press. (с. 583)

17. Романенко, М. Т., Шестеренко, В. Е., Гурбич, Р. Ф., Бологов, П. И., & Бологова, Л. М. (1980). *Воздушная линия электропередачи*. (Авторское свидетельство СССР No. 754541). Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/020751503/publication/SU754541A1?q=SU754541>

18. Ukrayinets, A., Shesterenko, V., & Romaniuk, V. (2019). Performance analysis of means of mitigating overhead power lines wires sag designed in Ukraine and USA. *Ukrainian Journal of Food Science*, 7(1), 130-140.  
<https://doi.org/10.24263/2310-1008-2019-7-1-14>

19. Arun D.I., Chakravarthy P., Arockia Kumar R., Santhosh B. (2018), *Shape Memory Materials*. CRC Press

20. Datta, S., Raza, M. S., Saha, P., & Pratihari, D. K. (2019). Effects of process parameters on the quality aspects of weld-bead in laser welding of NiTiInol sheets. *Materials and Manufacturing Processes*, 1–12.  
<http://doi.org/10.1080/10426914.2019.1566608>

21. Olabi, A. (Ed.). (2021). *Encyclopedia of Smart Materials*. Elsevier.

22. Романенко М.Т. Компенсаторы температурных удлинений проводов и тросов из материала с эффектом памяти формы / Романенко М.Т., Шестеренко В.Е. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Сверхупругость, эффект памяти и их применение в новой технике». – Воронеж: ВПИ, 1982. – С.114–115.

23. Вакуленко, С. Е., Мазуренко, А. Г., Романенко, М. Т., Фаткуллина, Л. П., & Алешина, Т. В. (1985). Перспективы применения материалов с эффектом памяти формы в энергетике. В *Сверхупругость, эффект памяти формы и их применение в новой форме: тезисы докл. всесоюз. науч. конф.* (с. 201). Томск.  
<http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/14464>

24. Цвях, В. М., Бибко, В. Г., Лях, В. В., Гурбич, Р. Ф., Романенко, М. Т., Шестеренко, В. Е., Мартынов, В. В., & Хандрос, Л. Г. (1979). *Воздушная линия*

*электропередачи.* (Авторское свидетельство СССР No. 700888).  
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/020755328/publication/SU700888A1?q=SU700888>

25. Орлов, Н. Н., Шестеренко, В. Е., & Вакуленко, С. Е. (1981).  
*Термокомпенсатор.* (Авторское свидетельство СССР No. 868905).  
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/020829313/publication/SU868905A1?q=SU868905>

26. Вакуленко, С. Е., Орлов, Н. Н., & Романенко, М. Т. (1986). *Воздушная линия электропередачи.* (Авторское свидетельство СССР No. 1280662).  
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021122778/publication/SU1280662A1?q=pn%3DSU1280662A1>

27. Kimata, R., Mitsuri, R., & Asamura, M. (1984). *Aerial transmission line extending absorber.* (Japan Patent No. 59-2521). Japan Patent Office (?).  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/014518606/publication/JPS592521A?q=JPS592521A>

28. Вакуленко, С. Е., Романенко, М. Т., Куник, А. М., & Тарасенко, Т. Н. (1997). *Воздушная линия электропередачи.* (Патент российской федерации No. 2072601). российское агенство по патентам и товарным знакам.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021586692/publication/RU2072601C1?q=RU2072601>

29. Shirmohamadi, M. (2005). *Sag compensating device for suspended lines.* (U.S. Patent No. US 6864421 B1). U.S. Patent and Trademark Office.  
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/032069667/publication/US6864421B1?q=US6864421B1>

30. Power Transmission Solutions. (2009?). *SLiM: Sagging Line Mitigator.*  
<http://www.ptransolutions.com/images/SLiM-FullSize-Brochure-2009-r0.pdf>

31. Power Transmission Solutions. (2010). *Sagging Line Mitigator (SLiM)*. <http://www.ptransolutions.com/slim.html>
32. Power Transmission Solutions. (2010). *PTS-SLiM Announcements – As of April, 2010*. [http://www.ptransolutions.com/images/PTS\\_Announcements\\_Apr10.pdf](http://www.ptransolutions.com/images/PTS_Announcements_Apr10.pdf)
33. Shirmohammadi, D., & Kopperdahl, D. (2004). *21st Century T&D*, 1(3), 28-30. [http://www.geni.org/globalenergy/library/media\\_coverage/EnergyCentral/building-a-21st-century-grid/EnergyCentralNXTbook.pdf](http://www.geni.org/globalenergy/library/media_coverage/EnergyCentral/building-a-21st-century-grid/EnergyCentralNXTbook.pdf)
34. CleanTech.Org. (2004). *Sag Line Mitigator is Ready*. <https://www.cleantech.org/2004/08/24/sag-line-mitigator-is-ready/>
35. Power Transmission Solutions. (2010). *News & Announcements*. <http://www.ptransolutions.com/announcements.html>
36. Adapa, R., Shirmohamadi, M., & Gray, R. (2005). SLiM (Sagging Line Mitigator) – Mitigating Excess Sag in Overhead Transmission Lines. In *2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa* (pp. 168-175). Durban, South Africa. <https://doi.org/10.1109/PESAFR.2005.1611808>
37. Power Transmission Solutions. (2010). *Successful adoption / Installations of SLiM Device*. <http://www.ptransolutions.com/history.html>
38. Lüssi, K. M. (2010). *A study and implementation analysis of an anti-sagging device for power transmission lines using shape memory alloys* [Master's thesis, University of KwaZulu-Natal]. Institutional repository of the University of KwaZulu-Natal. <http://hdl.handle.net/10413/764>
39. Niemeyer, R. C. (2016). *Modelagem e análise de um dispositivo mitigador de flecha para linhas de transmissão de energia elétrica baseado em ligas com memória de forma* [Master's thesis, University of Brasilia]. Institutional repository of the University of Brasilia. <http://dx.doi.org/10.26512/2016.02.D.21087>
40. Silva, N. M. (2012). *Análise de um sistema de mitigação de catenária em linha de transmissão de energia elétrica baseado em ligas com memória de forma* [Bachelor's thesis, University of Brasilia]. Institutional repository of the University of Brasilia. <https://bdm.unb.br/handle/10483/4172>

41. Power Transmission Solutions. (2010). *History & Future plans*. <http://www.ptransolutions.com/history.html>

42. Шестеренко, В. Є., & Романюк, В. Т. (2024). Спосіб монтажу термокомпенсатора температурного подовження проводів ліній електропередавання. (Патент України на корисну модель № 155976). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796661/>

43. Daryl L. Logan (2011). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.

44. Ajay Harish. (2024, March 14). *Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained*. SimScale. <https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>

45. ANSYS. (2024). *The Ansys Story*. <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>

46. Романюк, В. Т., Шестеренко, В. Є. & Сопіженко, Я. В. (2024). Аналіз електричного поля термокомпенсатора з кільцями з магнітом'якого композиту. В *VIII Міжнародній науковій конференції “Науковий простір: актуальні питання, досягнення та інновації”* (с. 298-302). UKRLOGOS Group. <https://doi.org/10.62731/mcnd-29.11.2024>

47. Ansys. (2020). Film Coefficient: Thermal Convection in Heat Transfer – Lesson 2. <https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2020/08/Lesson-2-Film-Coefficient-tp.pdf>

48. AZoNetwork. (2024). *Silicone Rubber*. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>

49. Svensson, L., Frogner, K., Jeppsson, P., Cedell, T., & Andersson, M. (2012). Soft magnetic moldable composites: Properties and applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(18), 2717–2722. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.03.049>