



2023

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 29 № 6

*Журнал
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
видається з 1938 року*

КИЇВ ✦ НУХТ ✦ 2023

УДК 621.315.177

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD AROUND THERMAL COMPENSATORS

V. Romaniuk

National University of Food Technologies

Key words:

Thermal compensator
Power line
Electric field
Finite element method
Ansys

Article history:

Received 10.11.2023
Received in revised form
27.11.2023
Accepted 08.12.2023

Corresponding author:

V. Romaniuk

E-mail:

v.t.romaniuk@gmail.com

Citation: В. Т. Романюк (2023). Дослідження електричного поля навколо термокомпенсаторів.

Наукові праці НУХТ, 29(6), 72—81.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-7

ABSTRACT

An important aspect of an overhead power line's operation is the characteristics of the electric field. Any equipment or elements that are connected to power line wires can affect the electric field with negative consequences for the power line and the power system, in particular through additional zones of corona discharge formation.

Thermal elongation compensators based on shape memory alloys for overhead power line wires (thermal compensators) have the potential to be widely used in power systems. These devices automatically reduce the sag of the power line wire when its temperature increases. This makes it possible to increase the current carrying capacity of existing power lines or, when constructing new power lines, reduce the height of power line towers or increase the distance between them without violating any restrictions. In this way, it is possible to improve the economic performance of power lines. It is also possible to increase the reliability of power supply systems by limiting the excessive sagging of power line wires at high temperatures. Thermal compensators were developed in several countries. The study of the electric field was carried out for only one thermal compensator closest to commercial success.

The electric field around the Ukrainian thermal compensator's design from the SU754541 patent and its variants are analyzed in the article. As a result of the analysis using the finite element method with Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2 software (Maxwell2D Electrostatic analysis), it was determined that the factor that affects mostly the corona discharge formation on the elements of the thermal compensators is the diameter of the temperature sensitive elements with a circular cross-section. When their diameter decreases, the value of the maximum electric field intensity increases. The thermal compensators with the most successful designs in relation to the corona discharge among those investigated were the thermal compensator of an alternative design with the temperature sensitive elements of a rectangular cross-section and the thermal compensator of the simplest design with the temperature sensitive element of the same diameter as the diameter of the power line wire.

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-6-7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НАВКОЛО ТЕРМОКОМПЕНСАТОРІВ

В. Т. Романюк

Національний університет харчових технологій

Важливим аспектом роботи повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) є характеристики електричного поля. Будь-яке обладнання чи елементи, які підключаються до проводів ЛЕП, можуть впливати на електричне поле з негативними наслідками для ЛЕП та енергосистеми, зокрема через додаткові зони утворення коронного розряду.

Одним із пристроїв, які мають потенціал для поширення в енергосистемах, є компенсатор температурного видовження проводів ЛЕП на основі сплавів з ефектом пам'яті форми — термокомпенсатор (ТК). Використання таких пристроїв автоматично зменшує 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. Розробкою ТК займались у декількох країнах світу. Дослідження електричного поля проводилось лише для однієї конструкції, найбільш близької до комерційного успіху.

У статті досліджується електричне поле навколо ТК простішої української конструкції з патенту SU754541 і його варіантів. У результаті аналізу з використанням методу скінченних елементів за допомогою програми *Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2* (тип аналізу *Maxwell2D Electrostatic*) було визначено, що фактором, який найбільше впливає на утворення коронного розряду на елементах ТК є діаметр термочутливих елементів круглого перерізу. При зменшенні їх діаметра збільшувалось значення максимальної напруженості електричного поля. ТК з найбільш вдалим дизайном стосовно корони серед досліджених виявились ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, а також ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу.

Ключові слова: термокомпенсатор, лінія електропередавання, електричне поле, метод скінченних елементів, *Ansys*.

Постановка проблеми. Коронний розряд на повітряних лініях електропередавання (ЛЕП) може виникати в різних точках, наприклад, безпосередньо на проводах, у місцях кріплення проводів до ізоляторів тощо. Одним із пристроїв, що встановлюються на проводи повітряних ЛЕП, є компенсатор температурного видовження проводів на основі сплаву з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) — термокомпенсатор (ТК). Такі пристрої здатні автоматично зменшувати стрілу провисання проводу ЛЕП шляхом його підтягування при нагріванні до певної температури.

Їх використання 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. Експерти стверджують, що надмірне провисання проводів повітряних ЛЕП є однією з головних причин виникнення аварійних відключень (Zengin, Erdemir, Akinci, & Seker, 2020; Zuo та ін., 2022; Wald, 2004; ZMS, 2022). Варто зазначити, що наймасштабніші блекаути були викликані саме цією причиною. Наприклад, у 1996 р. найбільший блекаут у західній частині США був спричинений перегрітою ЛЕП, проводи якої увійшли в контакт з деревом (iEngineering, 2022). Також літом 2003 р. 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 млн споживачів в США та Канаді (Barnett, 2013).

Отже, крім покращення економічних показників ЛЕП, боротьба з надмірним провисанням проводів ЛЕП з використанням ТК може підвищити надійність систем електропостачання.

ТК української конструкції з патенту SU754541 «Повітряна лінія електропередачі» і його варіанти виготовляються з провідних матеріалів та мають електричний контакт з проводом, вони також можуть мати значні розміри (довжина від 1 до 8 метрів). Такі ТК можуть встановлюватися на ЛЕП різних класів напруг (Шестеренко, 2004).

Специфічна геометрія цих пристроїв має потенційні точки виникнення коронного розряду, тому є сенс проаналізувати електричне поле навколо ТК, встановлених на проводах ЛЕП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ТК розроблялись у декількох країнах. Перші згадки про пристрої на основі сплавів з ЕПФ для компенсації температурного видовження проводів повітряних ЛЕП з'явилися в 1970—1980-х роках (Романенко, & Шестеренко, 1982; Вакуленко, Мазуренко, Романенко, Фаткулліна, & Алешина, 1985), також патент SU700888 «Поовітряна лінія електропередачі».

Активна робота над ТК проводилась в 1980—1990-х роках в Україні, Японії (патент JPS592521A «Aerial transmission line extending absorber») та Канаді (Schetky, 1994; Schetky, 1994). Незважаючи на це, ТК української конструкції і його варіанти не мають у літературі згадок про дослідження електричних полів.

Серед закордонних конструкцій найбільш успішною є конструкція з патенту США — US6864421B1 «Sag compensating device for suspended lines». Ця конструкція, ймовірно, є єдиною, для якої проводилось дослідження електричного поля. В технічному звіті (Shirmohamadi, 2002) описується дослідження електричного поля навколо вказаного ТК з використанням програмного засобу для аналізу методом скінченних елементів. Аналізується лише одна конструкція на відповідність вимогам щодо корони. У нашому ж випадку проводитиметься аналіз для різних умов декількох конструкцій ТК з їх порівнянням.

Метою статті є визначення параметрів ТК, які найбільше сприяють виникненню коронного розряду, а також визначення найбільш вдалої конструкції з точки зору коронного розряду.

Матеріали і методи. Метод скінченних елементів з використанням програми Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2.

Викладення основних результатів дослідження. Перша модель для аналізу показана на рис. 1, 2.

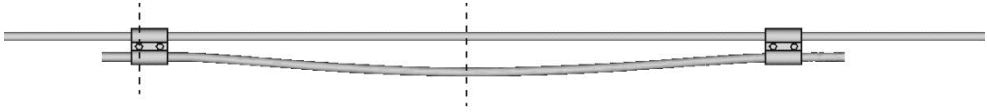


Рис. 1. ТК, встановлений на проводі ЛЕП

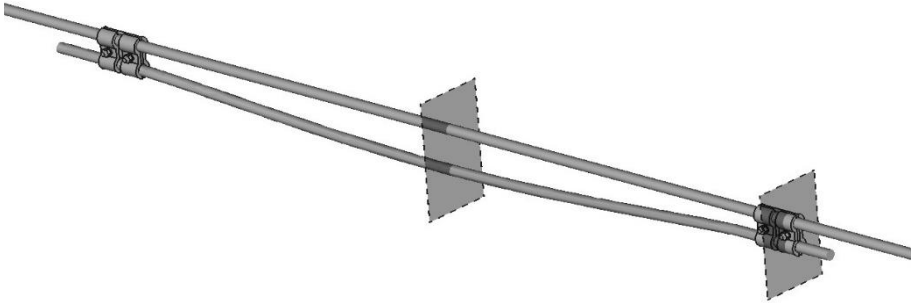


Рис. 2. ТК, встановлений на проводі ЛЕП, аксонометрична проекція

Штриховими лініями на рисунках позначені два обрані для аналізу перерізи, а саме: центральна частина моделі та частина з найбільшою кількістю кутів — вузол кріплення ТК до проводу лінії. Детальніше вузол кріплення зображений на рис. 3.

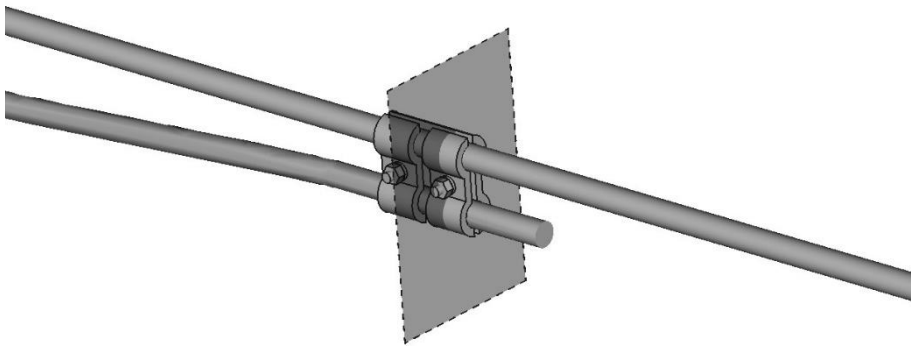


Рис. 3. Вузол кріплення ТК до проводу лінії

Пристрій може бути прикріплений до проводу різними способами. Для аналізу обраний сталевий затискач з болтами. Затискачі з подібним дизайном поширені та легкодоступні. Товщина стінок затискача обрана 5 мм, відстань між центрами осі проводу й термочутливим елементом — 34 мм, болти М6×25 з відповідною гайкою та шайбою.

Вище показаний ТК у найпростішому виконанні. З різних міркувань (доступність елементів зі сплавів з ЕПФ з необхідними розмірами та формою або складність їх виготовлення та обробки; необхідне зусилля, створюване термочутливим елементом або елементами тощо) цей пристрій може мати дещо інший вигляд, як описано в статті (Ukrayinets, Shesterenko, & Romaniuk, 2019). У цьому випадку ТК може мати не один, а два термочутливі елементи круглого або прямокутного перерізу. Оскільки таке виконання має іншу геометрію, її також варто розглянути. Модель показана на рис. 4.

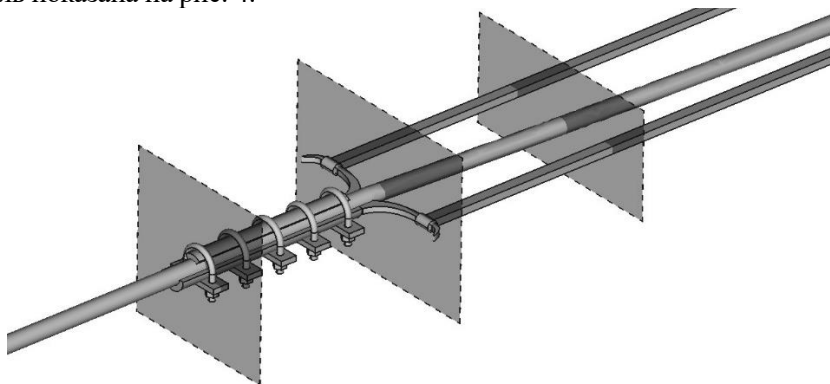


Рис. 4. ТК альтернативної конструкції, встановлений на проводі ЛЕП, аксонометрична проєкція

Аналогічно штриховими лініями на рис. 4 позначені обрані для аналізу перерізи, а саме: два на вузлі кріплення ТК до проводу лінії та один в центральній частині пристрою (для економії місця цей перший з правої сторони рисунка переріз зображений ближче до вузла кріплення).

Для аналізу використовувалась програма Ansys Electronics Desktop Student 2022 R2, тип аналізу Maxwell2D Electrostatic. Досліджувались такі випадки:

1. Провід повітряної ЛЕП без ТК.
2. Провід з ТК найпростішої конструкції такого ж діаметра.
3. Провід з ТК найпростішої конструкції вдвічі меншого діаметра.
4. Вузол кріплення ТК найпростішої конструкції до проводу ЛЕП.
5. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами круглого перерізу. При цьому термочутливі елементи мають діаметр, вдвічі менший за діаметр проводу.
6. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами круглого перерізу. При цьому термочутливі елементи мають діаметр, вчетверо менший за діаметр проводу.
7. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу. При цьому площа перерізу термочутливих елементів відповідає їх перерізу із пункту 5.
8. Провід з ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу. При цьому площа перерізу термочутливих елементів відповідає їх перерізу із пункту 6.

9. Вузол кріплення ТК альтернативної конструкції до проводу ЛЕП (перший варіант).

10. Вузол кріплення ТК альтернативної конструкції до проводу ЛЕП (другий варіант).

Для аналізу обрані ТК до спрацювання, оскільки в такому стані вони знаходяться більшість часу. Напряга ЛЕП — 110 кВ, тому що це мінімальний клас напруги, при якому, як правило, коронний розряд починає бути проблематичним. Відстань між проводом і термочутливим елементом (елементами) — 5 см. Переріз проводу 120 мм² за алюмінієм, провід АС120/19 з діаметром 15,2 мм. Цей переріз обраний як один із рекомендованих Правилами улаштування електроустановок для ЛЕП цього класу напруги. Моделі мають вигляд перерізів, які знаходяться в повітрі окресленому прямокутником, на краї якого накладене обмеження («Boundary») типу «Baloon» за напругою. Елементи моделі знаходились під напругою 110 кВ («Excitations»). Параметри «Solution Setup» та сітка («Mesh») були залишені за замовчуванням.

Результати моделювання показані на рис. 5—14.

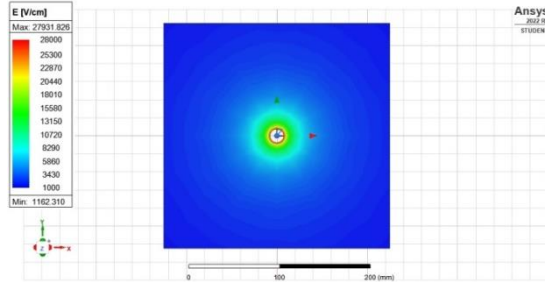


Рис. 5. Результат моделювання 1

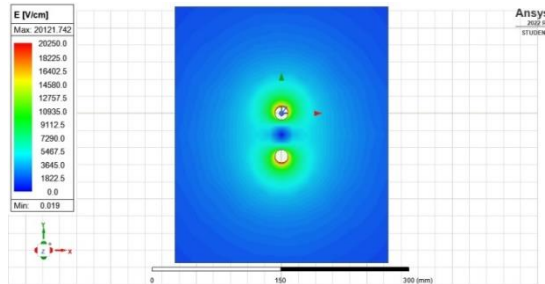


Рис. 6. Результат моделювання 2

При використанні ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу, максимальна напруженість електричного поля порівняно з контрольним випадком зменшилась майже на 28%. Однак при використанні термочутливого елемента меншого діаметра максимальна напруженість електричного поля збільшилась майже на 12%. При цьому зона максимальної напруженості електричного поля зосереджена на нижній частині ТК.

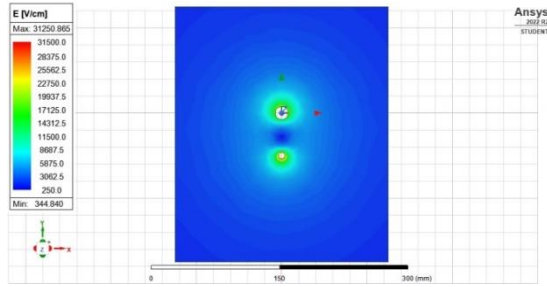


Рис. 7. Результат моделювання 3

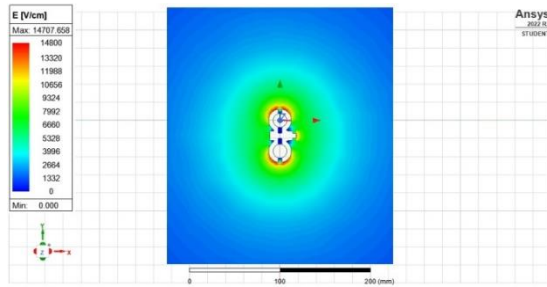


Рис. 8. Результат моделювання 4

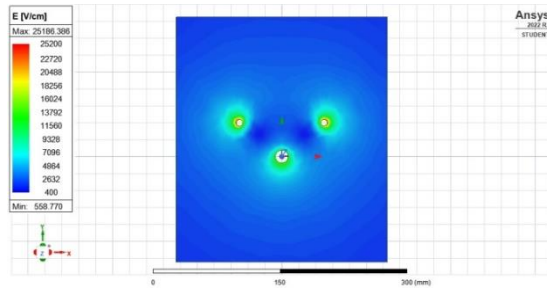


Рис. 9. Результат моделювання 5

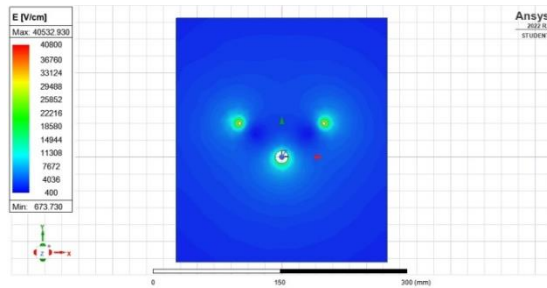


Рис. 10. Результат моделювання 6

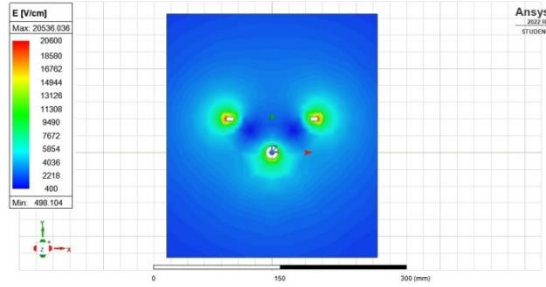


Рис. 11. Результат моделювання 7

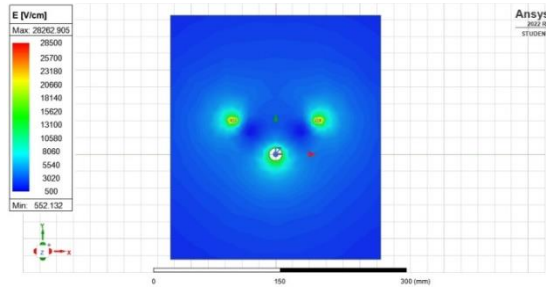


Рис. 12. Результат моделювання 8

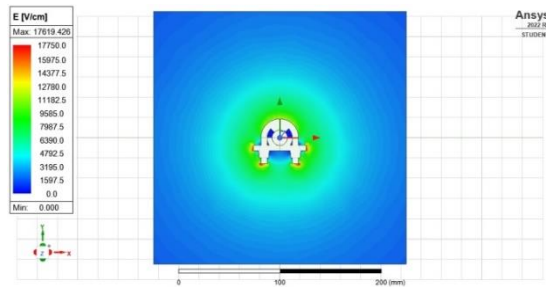


Рис. 13. Результат моделювання 9

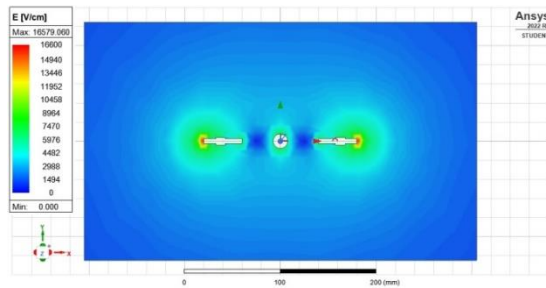


Рис. 14. Результат моделювання 10

Ця зона є найбільш потенційною зоною виникнення коронного розряду. При використанні ТК альтернативної конструкції, в якому термочутливі елементи ма-

ють круглий переріз з діаметром вдвічі меншим за діаметр проводу, спостерігається певне зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком — майже на 10%. Однак при зменшенні діаметра термочутливих елементів удвічі максимальна напруженість електричного поля, навпаки, збільшилась приблизно на 45%. Це найгірший випадок серед розглянутих. Зони максимальної напруженості електричного поля в цьому випадку зосереджені на частинах термочутливих елементів, які розташовані в напрямку від проводу (подібно до ситуації використання ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом меншого діаметра за діаметр проводу). У випадку застосування ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, в обох випадках (більшого та меншого перерізу термочутливих елементів) спостерігається зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком на приблизно 26% та 27% відповідно. При розгляданні перерізів вузлів кріплення спостерігається значне зменшення максимальної напруженості електричного поля порівняно з контрольним випадком, зокрема для вузла кріплення ТК найпростішої конструкції максимальна напруженість електричного поля зменшилась приблизно на 47%, а для двох перерізів вузла кріплення ТК альтернативної конструкції — майже на 40% та 41%. Це можна пояснити тим, що хоч ці перерізи мають багато гострих кутів та виступів і, відповідно, потенційних точок виникнення коронного розряду, площа поверхні, на якій зосереджується електричне поле набагато більша, ніж у контрольному випадку. Також такому ефекту може сприяти той факт, що ці перерізи є симетричними.

Висновки

Фактором, який найбільше впливає на утворення коронного розряду на елементах ТК за результатами дослідження виявився діаметр термочутливих елементів круглого перерізу. При зменшенні їх діаметра збільшувалось значення максимальної напруженості електричного поля. ТК з найбільш вдалим дизайном стосовно корони серед досліджених виявились ТК альтернативної конструкції з термочутливими елементами прямокутного перерізу, а також ТК найпростішої конструкції з термочутливим елементом такого ж діаметра, як діаметр проводу.

Подальші дослідження можуть бути присвячені оптимізації дизайнів ТК відносно корони, оскільки це дослідження показало, що навіть незначна зміна геометрії елементів ТК може мати значний вплив на електричне поле. А характеристики цього поля є важливим фактором при використанні ТК на практиці щодо можливого збільшення втрат на корону на проводах лінії з ТК або, наприклад, щодо безпеки (потенційне збільшення можливості виникнення пробою між проводами ЛЕП в зоні ТК або між проводом та опорою чи іншою конструкцією).

Література

Вакулєнко, С. Е., Мазурєнко, А. Г., Романєнко, М. Т., Фаткулліна, Л. П., & Алєшина, Т. В. (1985). *Перспективи применєния материалов с эффектом памяти формы в энергетике*. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции: Сверхупругость, эффект памяти формы и их применение в новой форме. Взято з <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/14464>.

Романенко, М. Т., Шестеренко, В. Е. (1982). *Компенсаторы температурных удлинений проводов и тросов из материала с эффектом памяти формы*. Тезисы докладов Всесоюзной конференции: Сверхупругость, эффект памяти и их применение в новой технике, 114—115.

Шестеренко, В. Е. (2004). *Системы электроспоживания та електропостачання промислових підприємств*. Вінниця: Нова Книга.

Barnett, D. C. (2013, August 13). Walking Back The Largest U.S. Power Blackout, 10 Years Later. *NPR*. Взято з <https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=211735357>.

iEngineering Group. (2022, May 13). *Sagging in overhead conductor lines*. Взято з <https://www.linkedin.com/pulse/sagging-overhead-conductor-lines-iengineeringgroup>.

Shirmohamadi, M. (2002). *Sagging line mitigator final report* (No. P500-02-074F). California Energy Commission. Взято з http://400.sydneyplus.com/CaliforniaEnergy_SydneyEnterprise/Portal/public.aspx?component=AAAAIY&record=9ae52200-520e-4fc4-81e5-c873b590ca9e.

Schetky, 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. doi: 10.1016/B978-1-4832-8381-4.50265-1.

Schetky, L. McD. (Ed.). (1994). *Shape Memory Alloys for Power Systems: Proceedings*. EPRI, Palo Alto, California.

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. doi: 10.24263/2310-1008-2019-7-1-14.

Wald, M. L. (2004, March 4). WHAT'S NEXT; To Avert Blackouts, a Sag-Free Cable. *The New York Times*. Взято з <https://www.nytimes.com/2004/03/04/technology/what-s-next-to-avert-blackouts-a-sag-free-cable.html>.

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. doi: 10.1109/access.2020.2998154.

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*. Взято з <https://kvcable.com/7-common-faults-in-10kv-overhead-cable-transmission-lines/>.

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. doi: 10.3390/s22218379.