

ISSN 2710-3056

# Grail of Science

Periodical scientific journal

No 16

June  
2022

## The issue of journal contains

Proceedings of the III Correspondence  
International Scientific and Practical Conference

### **GLOBALIZATION OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE: INTERNATIONAL COOPERATION AND INTEGRATION OF SCIENCES**

held on June 17<sup>th</sup>, 2022 by

NGO European Scientific Platform (Vinnytsia, Ukraine)

LLC International Centre Corporate Management (Vienna, Austria)



**OU CI**

Open Ukrainian Citation Index



Euro Science Certificate № 22374  
dated 15.05.2022

INDEX  COPERNICUS  
INTERNATIONAL

DOI 10.36074/grail-of-science.17.06.2022.032

# ПРЕДИКТИВНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ КОМПЕНСАТОРІВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВИДОВЖЕННЯ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ

Романюк Володимир Тарасович аспірант кафедри електропостачання і енергоменеджменту  
Національний університет харчових технологій, Україна

**Анотація.** Деградація термокомпенсаторів, виготовлених на основі сплавів з ефектом "пам'яті форми", що встановлюються на повітряних лініях електропередавання створює небезпечні умови через наближення проводів до землі або об'єктів, що знаходяться під проводами. Підвищення надійності термокомпенсаторів можна досягти шляхом реалізації сучасного способу проведення робіт з технічного обслуговування та ремонтів – системи предиктивного обслуговування (predictive maintenance). В статті обґрунтовується те, що контролюючи протягом терміну експлуатації термокомпенсатора відстань між нижньою точкою проводу (підвішеного між двома сусідніми опорами) та землею/об'єктом під проводом або стрілу провисання при спрацюванні термокомпенсатора, можна оцінювати стан термокомпенсатора. Також розглядаються можливі напрямки реалізації такої системи, а саме, досліджуються різні способи вимірювання вказаної дистанції та способи контролю за температурою проводів, оскільки її значення важливе для отримання коректних даних.

**Ключові слова:** ефект пам'яті форми, лінія електропередавання, стріла провисання, термокомпенсатор, предиктивне обслуговування.

Ефект "пам'яті форми" (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). Після відкриття цей сплав почали активно вивчати та в наш час нітинол залишається найбільш популярним сплавом з ЕПФ через відмінні електричні та механічні характеристики, міцність, стійкість до втоми, стійкість до корозії та біосумісність.

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

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

Сплави з ЕПФ можуть знаходитись у двох різних фазах (рис. 1) – аустеніт (високотемпературна фаза – кубічний тип ґратки) та мартенсит (низькотемпературна фаза – гексагональний або моноклінний тип ґратки).

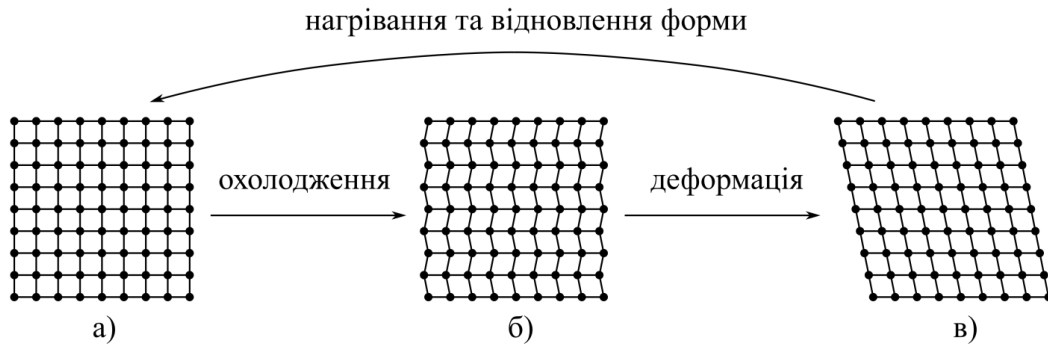


Рис. 1. Спрощене зображення кристалічних ґраток в сплаві з ЕПФ  
а) аустеніт; б) двійниковий мартенсит; в) деформований мартенсит.

На рис. 1б бачимо, що елементи мартенситної фази можуть бути орієнтовані ліворуч або праворуч. При деформації матеріалу в мартенситній фазі, її елементи змінюють свою орієнтацію. На рис. 1в показаний варіант структури матеріалу після деформації, як бачимо, в цьому 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  $A_f$  (рис. 2), мартенсит повністю перетворюється на аустеніт. При цьому атоми потрапляють на свої попередні місця (оскільки оригінальні зв'язки між атомами не були порушені). На макроскопічному рівні спостерігається повертання форми матеріалу до тієї, яку матеріал мав до деформації (рис. 1).

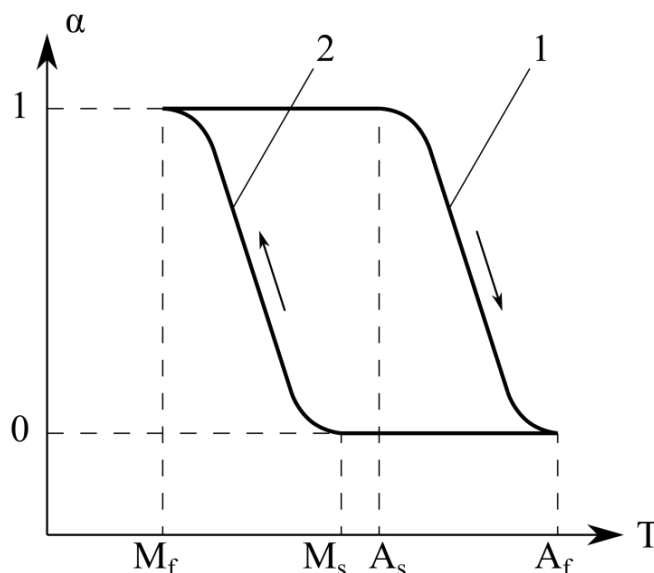


Рис. 2. Діаграма фазових перетворень в сплаві з ЕПФ  
 $\alpha$  – частка мартенситу в об'ємі матеріалу;  
1 – обернене мартенситне перетворення, при нагріванні;  
2 – пряме мартенситне перетворення, при охолодженні;  
 $A_s$ ,  $A_f$  – температури початку та кінця оберненого мартенситного перетворення;  $M_s$ ,  $M_f$  – температури початку та кінця прямого мартенситного перетворення

Після охолодження відбувається ще одне фазове перетворення – аустеніт перетворюється у двійниковий мартенсит. 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 [1].

Одним із застосувань сплавів з ЕПФ в електроенергетиці є компенсація температурного видовження проводів повітряних ліній електропередавання (ЛЕП).

Розглянемо принцип роботи термокомпенсатора. Термочутливий елемент при максимальній температурі навколишнього середовища стискається, напруження в проводі 1 (рис. 3) збільшуються і провисання проводу зменшується в порівнянні з проводом без компенсації (штрихова лінія). Якщо температура проводу знижується нижче мартенситної точки, термочутливий елемент втрачає свою жорсткість і розтягується та вирівнюється проводом ЛЕП. При подальшому зниженні температури термокомпенсатор не бере участі в роботі проводу. При наступному підвищенні температури термокомпенсатор поновлює свою стиснуту форму.

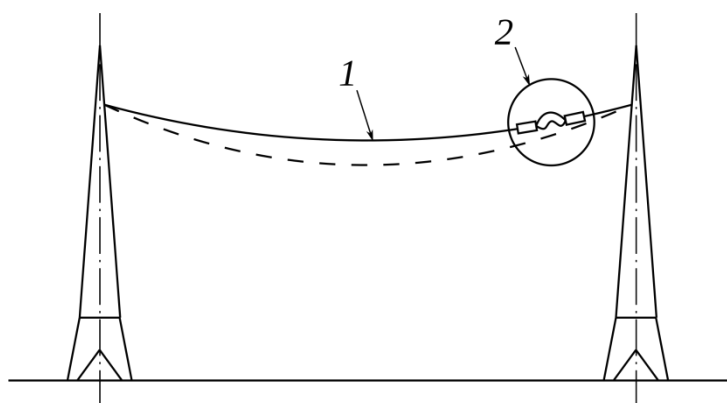


Рис. 3. Принцип роботи термокомпенсатора  
1 – провід ЛЕП; 2 – встановлений на проводі термокомпенсатор

Компенсація температурного видовження проводів створює умови, за яких можливо або збільшувати відстань між опорами, або знижувати висоту опор при збереженні наявних розрахункових відстанях між опорами [2].

Вихід з ладу термокомпенсатора, очевидно, створює небезпечні умови через наближення проводів до землі або об'єктів під ЛЕП, тому є сенс в розробці способу для запобігання такої ситуації та підвищення надійності термокомпенсаторів, зокрема шляхом застосування новітніх практик виконання робіт з технічного обслуговування та ремонтів (ТОР). Тут і далі під виходом з ладу термокомпенсатора мається на увазі передусім його критична функціональна деградація.

Класичними принципами проведення робіт з ТОР є ремонт об'єкта після його виходу з ладу та планово-попереджувальний ремонт, що виконується, базуючись на статистичній інформації. Сучасним принципом проведення робіт з ТОР є прогнозне технічне обслуговування та ремонт (також предиктивне обслуговування або прогнозне обслуговування з англ. "predictive maintenance").

Цей спосіб передбачає виконання ремонтних робіт базуючись на реальному стані обладнання. Для цього за допомогою різноманітних сенсорів вимірюють зміну певних характеристик об'єкта, які відображають деградаційні процеси (містять трендову складову). Аналізуючи отримані дані та використовуючи методи прогнозування, визначають момент виходу об'єкта з ладу в майбутньому (тобто його залишковий ресурс). Базуючись на цьому прогнозі, об'єкт виводиться в ремонт в оптимальний момент часу в порівнянні з класичними принципами виконання робіт з ТОР [3].

Для реалізації системи предиктивного обслуговування потрібно визначити, яка характеристика (або характеристики) об'єкту контролюватиметься. Ця характеристика повинна адекватно відображати стан об'єкта (таку характеристику називають індикатором стану). Це може бути безпосередньо вихідний сигнал із сенсора, який підключений до об'єкта, хоча також часто створюються індикатори стану, що компонуються із даних, що зняті з різних сенсорів (дані з сенсорів також можуть бути певним чином математично оброблені).

Зі збільшенням кількості циклів деформація – відновлення форми, в сплавах з ЕПФ поступово зменшується спроможність до відновлення оригінальної форми, тобто зменшується відсоток деформації, яка може бути відновлена при перетворенні (а відповідно, якщо розглядати роботу термокомпенсаторів, зменшується створюване напруження в проводі повітряної ЛЕП при зворотному мартенситному перетворенні). При цьому також відбувається певний зсув температур перетворення, а також змінюється опір матеріалу. За цими та деякими іншими параметрами можна оцінювати стан елементів, виготовлених зі сплаву з ЕПФ (сплав Ni-Ti) [4-6].

Виконувати вимірювання характеристик елемента зі сплаву з ЕПФ термокомпенсатора, що встановлений на ЛЕП (опір, температури фазових перетворень, поява та розвиток мікротріщин...) проблематично через такі причини як складність реалізації, потребу в модифікації конструкції термокомпенсатора, потребу в розробці нових методів вимірювання, високу вартість обладнання, та ін.

Через те, що стріла провисання або дистанція між проводом повітряної ЛЕП та землею або певним об'єктом, що знаходиться під проводом за температури повного спрацювання термокомпенсатора залежить від створюваного ним зусилля, стан термокомпенсатора можна оцінювати за цією дистанцією. При цьому, за точку критичної деградації зручно прийняти критичне значення стріли провисання (дистанції між проводом та землею). Сприятливою умовою є наявність багатьох методів вимірювання цих величин. Розглянемо сучасні дослідження на цю тему.

Вимірювання величини провисання проводу на ЛЕП за допомогою GPS сенсорів. Метод характеризується розповсюдженістю необхідного обладнання, високою точністю вимірювань, можливістю отримання результатів швидко, в необхідний момент часу. Недоліки: необхідність встановлення обладнання на ЛЕП, необхідність обробки результатів [7, 8].

Вимірювання за допомогою ІЧ лазера. Перевагою цього методу є те, що він не потребує модифікації ЛЕП, але при цьому потрібно виділяти час та

ресурси на проведення вимірювань персоналом та є необхідність обробки результатів. Точність вимірювань висока ( $\pm 5$  см) [9].

Вимірювання за допомогою дрона та 3D лідара. Можна отримувати високоточні результати, система піддається автоматизації, але має високу вартість (сотні тисяч, якщо не мільйони гривень) [10].

Вимірювання за допомогою обробки фотографії, отриманої за допомогою дрона. Спосіб не вимагає такого специфічного обладнання як попередній, тому він менш витратний, дозволяє отримувати високу точність вимірювань. Також є спосіб обробки фотографій отриманих з землі, але він вимагає високого професіоналізму при зніманні, тому що потребує встановлення камери на певній відстані від ЛЕП, під певним кутом, потребує отримання декількох фотографій з різних ракурсів і т. д. [11].

Вимірювання провисання проводу шляхом встановлення на нього трансмітера і трансивера міліметрового діапазону. Недоліки: потреба в модифікації ЛЕП, є проблеми з точністю вимірювань [12].

Отже, таку величину як стріла провисання або відстань між нижньою точкою проводу, що закріплений між двома сусідніми опорами та землею/об'єктом (яка залежить від створюваного термокомпенсатором зусилля при його спрацюванні), по-перше, можна вимірювати без модифікації конструкції ЛЕП або термокомпенсатора, а по-друге, навіть з використанням сенсорів для вимірювання цієї величини, її можна буде використовувати й для інших цілей, для яких розроблені методи, описані в [7-12] та інші.

Для отримання коректних даних, що дозволять оцінювати стан термокомпенсатора, потрібно проводити вимірювання дистанції між проводом та землею/об'єктом за температури термокомпенсатора (проводу), що дорівнює температурі  $A_f$  або вище і також потрібно знати цю температуру. Її можна визначити за допомогою сенсора температури, який можна встановити безпосередньо на проводі, але щоб уникнути такої необхідності, можна температуру проводу оцінювати прямо, за допомогою відповідної вимірювальної апаратури (наприклад тепловізором) або побічно, за допомогою математичних моделей.

Якщо маємо встановлені сенсори на проводі ЛЕП, які дозволяють вимірювати дистанцію між проводом та землею/об'єктом, а також температуру проводу, можна записувати значення цієї дистанції точно за температури спрацювання термокомпенсатора. Однак при проведенні вимірювань, наприклад під час планових обходів ЛЕП, коли температура проводу найімовірніше буде нижчою за температуру спрацювання термокомпенсатора, потрібно буде проводити додаткові маніпуляції. Обслуговуючий персонал повинен буде активувати термокомпенсатор, приєднавши до нього зовнішнє джерело живлення. Отримавши значення температури проводу під час вимірювання дистанції, її можна буде скоригувати, привівши до однієї температури.

Підсумовуючи вищесказане, визначені наступні можливі варіанти оцінки стану термокомпенсатора через проведення вимірювань дистанції між проводом та землею/об'єктом і визначення температури проводу/термокомпенсатора:

– Вимірювання дистанції за допомогою сенсорів, що встановлюються на ЛЕП. При цьому температура проводу може бути виміряна з використанням сенсорів температури або визначена за допомогою математичних моделей;

– Вимірювання дистанції під час обходів ЛЕП (або запусків дронів). При цьому температура проводу може бути виміряна з використанням сенсорів температури або визначена за допомогою математичних моделей або виміряна за допомогою, наприклад, тепловізора.

Така класифікація розрізняє відносно часті отримання результатів та не часті. Це важливо, тому що для подальшої задачі прогнозування, кількість даних впливатиме на точність прогнозу.

**Висновки.** Термокомпенсатори є відповідальними пристроями, функціональна деградація яких призводить до порушення безпеки роботи повітряної ЛЕП, тому є сенс в розробці систем предиктивного обслуговування, які дозволять прогнозувати критичний їх стан та вчасно проводити їх заміну.

Термокомпенсатори в найпростішому виконанні мають вигляд дроту, виготовленого зі сплаву з ЕПФ, який прикріплений паралельно до частини проводу повітряної ЛЕП. Тому стан термокомпенсатора можна розглядати, безпосередньо як стан елемента з ЕПФ. При деградації елементів з ЕПФ, змінюються певні їх характеристики, найбільш перспективною з точки зору оцінки їх стану було обрано зменшення відсотка деформації, що може бути відновлена. Враховуючи принцип дії термокомпенсатора, це виявлятиметься в зменшенні зусилля, що підтягуватиме провід при його спрацюванні. А це, своєю чергою, виявлятиметься в збільшенні стріли провисання проводу. Таким чином, стріла провисання проводу або відстань між проводом та землею (історичні дані) можуть бути використані для оцінки стану термокомпенсаторів.

Запропонований підхід є доцільним, оскільки ці величини вже вимірюють для певних цілей і відповідно розроблені різні способи для проведення таких вимірювань. Однак, вимірювання потрібно проводити враховуючи температуру проводу. Це можна реалізувати за допомогою сенсорів температури, що встановлюються на проводах або за допомогою вимірювальної апаратури або за допомогою математичних моделей для визначення температури проводів в залежності від струму, що по них протікає та умов навколишнього середовища.

#### **Список використаних джерел:**

- [1] Arun D. I., Chakravarthy P., Arockia Kumar R. & Santhosh B. (2018). *Shape Memory Materials* (pp. 10-17). Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-0-8153-5969-2.
- [2] Shesterenko, V., Mashchenko, O. & Romaniuk, V. (2018). Optimization of external power delivering system of object by mechanical influence on the work of power line wires. *Ukrainian Journal of Food Science*, (6, 1), 127-135. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2018-6-1-15>
- [3] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-7531-4.
- [4] Furuya, Y. & Park, Y. C. (1992). Thermal cyclic deformation and degradation of shape memory effect in ti-ni alloy. *Nondestructive Testing and Evaluation*, (8-9, 1-6), 541-554. <https://doi.org/10.1080/10589759208952731>

- [5] Vizureanu, P., & Achiței, D. (2018). *Aspects Regarding Thermal-Mechanical Fatigue of Shape Memory Alloys*. In Ares, A. E. (Ed.). *Shape-Memory Materials*. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77991>
- [6] Zhang, Y., Li, W., Moumni, Z., Zhu, J., Zhang, W., Zhong, S.-Y. (2019). Degradation of the recoverable strain during stress controlled full transformation cycling in NiTi shape memory alloys. *Scripta Materialia*, (162), 68-71. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.10.031>
- [7] Kamboj, S. & Dahiya, R. (2011). Application of GPS for Sag Measurement of Overhead Power Transmission Line. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, (3, 3), 268-277. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2011.3.3.1>
- [8] Kamboj, S. & Dahiya, R. Evaluation of DTLR of power distribution line from sag measured using GPS. *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal*. (pp. 479-484). December 28-30, 2011, Bhubaneswar, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/iceas.2011.6147154>
- [9] Golinelli, E., Perini, U. & Ogliari, G. A new IR laser scanning system for power lines sag measurements. *18th Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2016)*. June 6-8, 2016, Rome, Italy: Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0919>
- [10] Zheng, Z., Liu, J., Zhou, B., Luo, Y., Ning, Q. & Zhou, Z. Research on UAV Sag Measurement System Based on 3D Lidar. *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*. (pp. 1-7). September 19-20, 2020, Dalian, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/cacre50138.2020.9230132>
- [11] Wang, H., Han, S., Lv, L. J. & Jin, L. J. Transmission line sag measurement based on single aerial image. *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. (pp. 220-224). November 21-23, 2017, Auckland, New Zealand: IEEE. <https://doi.org/10.1109/m2vip.2017.8211435>
- [12] Mahin, A. U., Islam, S. N. & Hossain, M. F. Millimeter Wave Based Sag Measurement Using Parabolic Approximation for Smart Grid Overhead Transmission Line Monitoring. *2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. October 21-23, 2019, Beijing, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/smartgridcomm.2019.8909707>