



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-10

УДК 621.315.175

О. А. Савченко ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-6401-0852
О. О. Мірошник ¹ , д-р техн. наук	ORCID 0000-0002-6144-7573
О. А. Козловський ² , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-6885-5994
І. М. Трунова ¹ , канд. техн. наук	ORCID: 0000-0001-7510-4291
А. І. Середа ¹ , канд. техн. наук	ORCID: 0000-0002-7670-6822
С. М. Дудніков ¹ , канд. техн. наук	ORCID: 0000-0002-0337-0707
В. Г. Пазій ¹ , ст. викладач	ORCID: 0000-0002-7336-0854
С. А. Попадченко ¹ , ст. викладач	ORCID: 0000-0003-2537-9769
Д. А. Єрмак ¹ , аспірант	
А. С. Волобуєв ¹ , аспірант	

¹ Державний біотехнологічний університет² Центральноукраїнський національний технічний університет

e-mail: savoa@btu.kharkov.ua, тел: +380957149124

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТА СТІЙКОСТІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПЛАВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДІ НА ГРУПІ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЛ 10 КВ

Анотація. В роботі проведено аналіз чутливості та стійкості рішень, що приймаються з використанням техніко-економічної моделі схеми плавлення ожеледі на групі взаємопов'язаних ПЛ 10 кВ, до зміни вихідних даних. У якості техніко-економічної моделі використано однокритеріальну модель на основі приведених витрат. У якості вихідних параметрів, вплив яких вивчався, використовувались такі показники як кількість ПЛ, що відходять від районної підстанції, довжина магістралі ПЛ, питома навантаження ПЛ, питомі збитки від недовідпуску електричної енергії. Показано, що приведені витрати на плавлення є найчутливішими до зміни кількості ПЛ, на яких проектується плавлення, причому цей параметр виводить показник приведених витрат із зони умовної стійкості.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, ожеледно-вітрові навантаження, плавлення ожеледі, техніко-економічна модель, чутливість, стійкість.

Постановка проблеми. Сучасну промисловість та сільське господарство неможливо уявити без високого рівня електрифікації та автоматизації виробничих процесів. Широке застосування електроенергії у виробничих процесах передбачає високу надійність систем електропостачання. На даний час цей показник є недостатньо високим. Найненадійнішими елементами в системі електропостачання є повітряні лінії електропередавання (ПЛ) 6–10 кВ сільських

© Савченко О. А., Мірошник О. О., Козловський О. А., Трунова І. М., Середа А. І., Дудніков С. М., Пазій В. Г., Попадченко С. А., Єрмак Д. А., Волобуєв А. С., 2024



розподільних електричних мереж, причому близько половини всього часу перерв електроживлення споживачів викликано механічними пошкодженнями проводів та опор цих ПЛ під дією відкладень ожеледі в поєднанні з вітром [1, 2]. Це приводить до необхідності відшкодування енергопостачальними компаніями значних збитків, які наносяться споживачам в результаті перерв електроживлення, а також до невиробничих витрат коштів на відновлення ПЛ, що знижує ефективність функціонування розподільних електричних мереж [3-6]. Як показують дослідження, найбільш економічним шляхом підвищення надійності повітряних розподільних мереж в умовах дії інтенсивної ожеледі є створення систем її плавлення на основі електротеплового способу [7-9]. Обґрунтування схем та вибір засобів плавлення ожеледі на ПЛ повинні проводитись з використанням комплексного аналізу, який передбачає створення та дослідження відповідної техніко-економічної моделі.

Аналіз останніх досліджень. В результаті аналізу наукових робіт, встановлено, що оцінка економічної ефективності схем плавлення ожеледі на ПЛ найчастіше проводиться з використанням однокритеріальних моделей на основі критерію приведених витрат [7, 10]. Найчастіше розглядаються лише ті складові витрат, які змінюються при впровадженні плавлення. Іноді підхід передбачає приведення всіх складових витрат до 1 км довжини ПЛ. Даний підхід вносить суттєву похибку в розрахунки, оскільки такі складові, як капіталовкладення в систему моніторингу за утворенням ожеледі, обхідну систему шин на РТП, комутаційні апарати створення штучного к.з. на лініях не залежить від довжини ПЛ, на яких передбачається плавлення ожеледі [11-13].

Аналіз існуючих техніко-економічних моделей, які використовуються при проектуванні схем плавлення ожеледі на ПЛ 6–10 кВ сільських розподільних мереж, показує, що вони є занадто спрощеними. Так, наприклад, вони не дозволяють враховувати залежність збитків споживачів в результаті недоотримання електроенергії під час проведення плавлень і витрат електричної енергії на плавлення від основного параметру режиму плавлення ожеледі – питомої потужності плавлення відкладень. При проектуванні це приводить до приймання неоптимальних рішень і, як наслідок, зниження ефективності від впровадження схем плавлення [14-17]. Отже одним із завдань досліджень є уточнення існуючих техніко-економічних моделей схем плавлення ожеледі на ПЛ 6–10 кВ сільських розподільних мереж. Іншим завданням, яке і вирішується в даній науковій роботі, є дослідження чутливості та стійкості техніко-економічної моделі плавлення ожеледі на ПЛ 10 кВ до зміни вихідних даних.



Формулювання мети статті. Дослідження чутливості та стійкості техніко-економічної моделі плавлення ожеледі на групі взаємопов'язаних ПЛ 10 кВ до зміни вихідних даних.

Основна частина. Для однопараметричної оптимізації узагальнений показник техніко-економічної моделі може бути записаний у вигляді функції $Y = f(X_1, \dots, X_j, \dots, X_n, Z)$, де $X_1, \dots, X_j, \dots, X_n$ – вихідні дані моделі, Z – незалежна змінна. Під чутливістю узагальненого показника до зміни вихідних даних моделі розуміється міра його реакції на таку зміну. В результаті дослідження чутливості техніко-економічної моделі встановлюються типи вихідних даних, які найсильніше впливають на зміну узагальненого показника.

Як правило, дослідження чутливості здійснюється в точці, яка відповідає середнім значенням вихідних даних $X_{1сер}, \dots, X_{jсер}, \dots, X_{nсер}$ та оптимальному для них значенні незалежної змінної $Z_{opt}^{сер}$. Кількісно чутливість функціоналу Y до зміни вихідних даних X_j оцінюють за допомогою показника чутливості s_j , який чисельно рівний частковій похідній

$$s_j = \frac{\partial Y}{\partial X_j}. \quad (1)$$

Порівняння сили впливу окремих вихідних даних на узагальнений показник здійснюється за допомогою коефіцієнта еластичності

$$\delta_j = s_j \frac{X_j}{Y}, \quad (2)$$

який показує відносну зміну узагальненого показника Y при одиничній відносній зміні вихідних даних X_j .

Для моделі, що розглядається, узагальненим показником є приведені витрати на плавлення ожеледі, які визначаються за методикою, що запропонована в [10]. Величина приведених витрат на схему плавлення залежить від вектору вихідних даних $\{X_1, \dots, X_j, \dots, X_n\}$, до яких відносяться:

- кількість ПЛ, що відходять від РТП;
- довжина магістралі ПЛ;
- питома навантаження ПЛ;
- питомі збитки від недовідпуску електричної енергії.

При дослідженні моделі на чутливість та стійкість останні три види вихідних даних варіювались одночасно для всіх відхідних ПЛ даної РТП [18, 19]. В табл. 1 наведено результати розрахунку показника чутливості та коефіцієнта еластичності для методу плавлення на основі автотрансформатора з використанням з



безіндуктивного контура, отримані на основі виразів (1) та (2) відповідно.

Як видно з таблиці, для даної моделі приведені витрати є найчутливішими до зміни кількості відхідних ПЛ 10 кВ, на яких проектується плавлення. Коефіцієнт еластичності для цього показника є найбільшим і перевищує значення для інших вихідних даних в 1,6÷2,8 рази.

Було також проведено дослідження моделі на стійкість [20, 21]. Під стійкістю розуміється властивість узагальненого показника не виходити за межі деякої заданої допустимої зони при зміні невизначених вихідних даних у вказаному діапазоні. Стійкість приведених витрат оцінено за максимальною відносною різницею між величиною витрат при оптимальному для екстремального значення вихідного параметра ($X_j = X_{j \min}$ або $X_j = X_{j \max}$) значенні незалежної змінної ($Z = Z_{j \text{ onm}}^{\min}$ або $Z = Z_{j \text{ onm}}^{\max}$) та при тому ж значенні вихідного параметра, але незалежній змінній, яка є оптимальною для середнього значення вихідного параметра ($Z = Z_{\text{ onm}}^{\text{cep}}$), рис. 1

$$\varepsilon_{Y_j} = \max\{\varepsilon_{Y_j}^{\min}; \varepsilon_{Y_j}^{\max}\}, \quad (3)$$

де

$$\varepsilon_{Y_j}^{\min} = \frac{Y(X_{j \min}; Z_{\text{ onm}}^{\text{cep}}) - Y(X_{j \min}; Z_{j \text{ onm}}^{\min})}{Y(X_{j \min}; Z_{j \text{ onm}}^{\min})}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Y_j}^{\max} = \frac{Y(X_{j \max}; Z_{\text{ onm}}^{\text{cep}}) - Y(X_{j \max}; Z_{j \text{ onm}}^{\max})}{Y(X_{j \max}; Z_{j \text{ onm}}^{\max})}. \quad (5)$$

Таблиця 1

Результати дослідження техніко-економічної моделі оптимізації режиму плавлення ожеледі на чутливість та стійкість

Вихідні дані	Показник чутливості s_j	Коефіцієнт еластичності δ_j	Максимальна різниця приведених витрат ε_{Y_j}
Кількість ПЛ n	44,7	0,91	0,140
Довжина магістралі ПЛ l	14,4	0,58	0,022
Питоме навантаження ПЛ, p_0	1,8	0,32	0,074
Питомі збитки Y_0	16120	0,33	0,034

При цьому всі інші вихідні показники приймалися рівним середнім значенням. За максимальне допустиме відхилення

приведених витрат від оптимального значення прийнято відхилення, рівне похибці розрахунків $\varepsilon_Y^{don} = 0,09$. Умова стійкості узагальненого показника до вихідної змінної X_j

$$\varepsilon_{Yj} \leq \varepsilon_Y^{don}. \quad (6)$$

В табл. 1 наведено результати розрахунку показника ε_{Yj} . Як видно, з точки зору прийнятого поняття стійкості, показник приведених витрат є нестійким лише до кількості ПЛ.

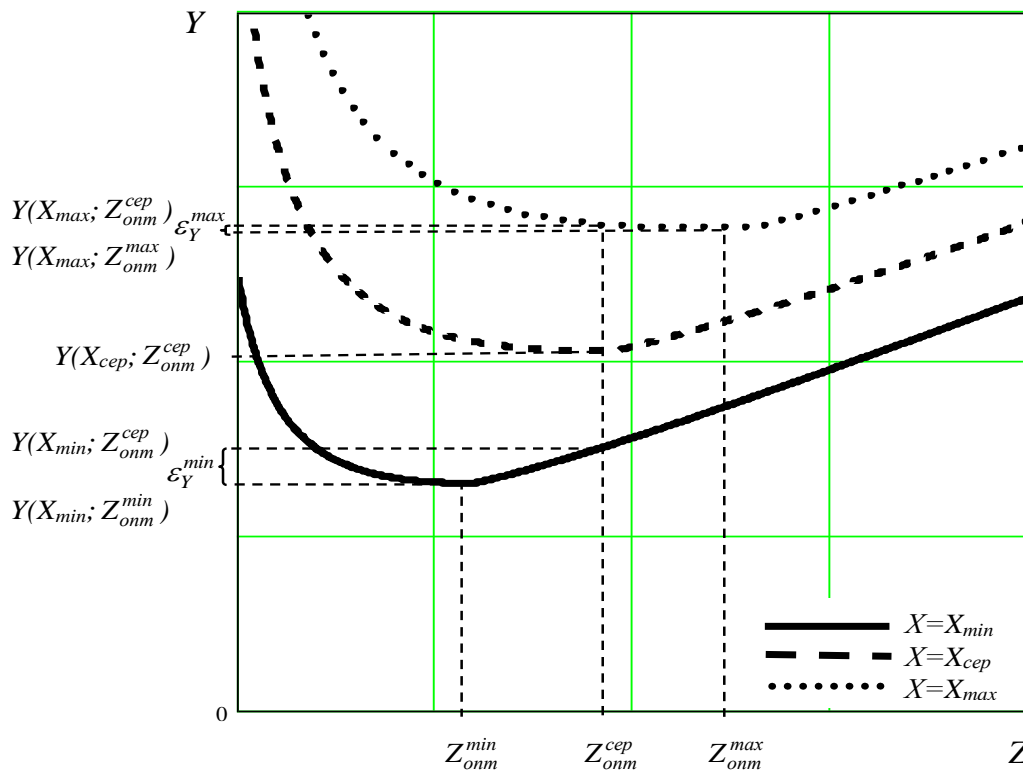


Рис. 1. Графічна ілюстрація дослідження стійкості приведених витрат до зміни вихідних даних

Висновки. Таким чином, в результаті дослідження техніко-економічної моделі схеми плавлення ожеледі на групі ПЛ 6–10 кВ на чутливість, встановлено, що приведені витрати на плавлення є найчутливішими до зміни кількості ПЛ, на яких проектується плавлення, причому цей параметр виводить показник приведених витрат із зони умовної стійкості. Тому оптимізація питомої потужності плавлення ожеледі для уніфікованих електросилових установок повинна проводитись в першу чергу з урахуванням невизначеності кількості ПЛ на основі математичних методів, що дозволяють оперувати невизначеними величинами. Оскільки одночасна для всіх ПЛ максимальна зміна кожної з інших невизначених величин (довжини ПЛ, питомих збитків або питомої



потужності) не порушує стійкість узагальненого показника, то при зміні даної величини окремо для однієї ПЛ стійкість також буде забезпечена. Таким чином, при вирішенні задачі оптимізації питомої потужності плавлення в умовах невизначеності ці величини допустимо прийняти рівними середнім значенням.

Список використаних джерел

1. База даних для визначення нормативів із страхування електричних мереж. Науково-технічна бібліотека НДПП “Укренергомережпроект” Мінпаливенерго України (замовлення ОЕП “ГРІФРЕ”, договір №55 від 25.04.2002.)
2. Лисенко В. П., Козирський В. В., Гладкий А. М., Скрипник А. М. Стан електричних мереж та надійність електропостачання сільського господарства. *Електрифікація та автоматизація сільського господарства*. 2005. № 2(11). С. 3–15.
3. Petrenko V. F., Sullivan C. R., and Kozlyuk V. Variable-resistance conductors for power-line de-icing. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65(1). P. 23–28.
4. Trudel G., Gingras J. P., and Pierre J. R. Designing a reliable power system: Hydro-Quebec's integrated approach. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93(5). P. 907–917.
5. Šabata J., Lehký P., Zeman L., and Vaculík P. Automated Icing Monitoring System on the territory of the Czech and Slovak Republic. *16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2015)*. Uppsala, Sweden, 2015. P. 245–248.
6. Іноземцев Г. Б., Крижанівський В. С. Проблема боротьби з ожеледдю на лініях електропередачі. *Науковий вісник НУБіП. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2012. Вип. 166(4). С. 12–16.
7. Выбор способов и разработка целесообразных схем плавки гололеда на ВЛ различных классов напряжения в Молдавской энергосистеме: научно-технический отчет по теме. Кишинев: НТЦ «Техинформэнерго», 2001. 132 с.
8. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh [et. al.]. Dordrecht: Springer, 2008. 381 p.
9. Білаш І. П., Савченко О. А. Оптимізація потужності плавлення ожеледі на ПЛ 6–10 кВ розподільних електричних мереж. *Вісник ХНТУСГ. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*. 2010. Вип. 102. С. 14–16.
10. Miroshnyk O., Tymchuk S. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. Vol. 1(4). P. 67.
11. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2015. Vol. 3(4 (75)). P. 26–31.



12. Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Savchenko O., Halko S. Analysis of technical condition diagnostics problems and monitoring of distribution electrical network modes from smart grid platform position. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. e 20168725. P. 57-60. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250080>.

13. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia, 2020. Vol. 2. P. 39-44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>.

14. A. Szafraniec, S. Halko, O. Miroshnyk, R. Figura, A. Zharkov, O. Vershkov. Magnetic field parameters mathematical modelling of wind electric heater. *Przegląd elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97(8). P. 36-41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.

15. Галько С. В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф. (10 квіт. 2020 р.)*. Луцьк: МЦНД, 2020. Т. 1. С. 83-90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.

16. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Kvitka S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Energy Saving in Electromechanical Grain Cleaning Systems. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(3). P. 1418. <https://doi.org/10.3390/app12031418>.

17. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130-141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.

18. Al-Quraan T. M. A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N. M., Islam K. M. A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. Vol. 7. P. 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>.

19. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. *Appl. Sci*. 2022. Vol. 12(10). P. 5190. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.



20. Karaiev O., Bondarenko L., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Karaieva T., Shchur T., Findura P., Prístavka M. Mathematical modelling of the fruit-stone culture seeds calibration process using flat sieves. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24(3). P. 119–123. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0020>.

21. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires / M. Farzaneh [et al.]. 2010. 1000 p.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2024 р.

**O. Savchenko¹, O. Miroshnyk¹, O. Kozlovskiy², I. Trunova¹, A. Sereda¹,
S. Dudnikov¹, V. Pazi¹, S. Popadchenko¹, D. Yermak¹, A. Volobuev¹**

¹State Biotechnological University

²Central Ukrainian National Technical University

**STUDY OF SENSITIVITY AND STABILITY
OF TECHNO-ECONOMIC MODEL OF THE DE-ICING SYSTEM
ON A GROUP OF INTERCONNECTED 10 KV OHL**

Summary

The most unreliable elements in the power supply system are 6-10 kV overhead power lines of rural distribution power grids, and about half of the total time of power outages for consumers is caused by mechanical damage to the wires and supports of these overhead lines under the influence of ice deposits in combination with wind.

In the work, an analysis of the sensitivity and stability of the decisions made using the techno-economic model of the ice melting scheme on a group of interconnected 10 kV overhead power lines, to the change of the initial data, was carried out. As a technical and economic model, a one-criteria model based on reduced costs was used. As the initial parameters, the influence of which was studied, such indicators as the number of overhead power lines connected to the substation, the length of the overhead power lines main section, the specific load of the overhead power lines, and the specific losses from under-discharge of electrical energy were used. As a result of a study of the technical and economic model of the scheme for melting ice on a group of 6–10 kV overhead lines for sensitivity, it was found that the reduced costs for melting are most sensitive to changes in the number of overhead lines on which melting is planned, and this parameter takes the indicator of reduced costs out of the zone of conditional stability. Therefore, optimization of the specific power of ice melting for unified electric power plants should be carried out primarily taking into account the uncertainty of the number of overhead lines based on mathematical methods that allow operating with uncertain values. Since a simultaneous maximum change in each of the other uncertain quantities (overhead line length, specific losses or specific power) for all overhead lines does not violate the stability of the generalized indicator, then when this value changes separately for one overhead line, stability will also be ensured. Thus, when solving the problem of optimizing the specific melting power under conditions of uncertainty, these values can be taken equal to the average values.

Keywords: overhead power line, ice-wind loads, ice melting, techno-economic model, sensitivity, stability.