

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ

кандидат технічних наук,
завідувач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

В. М. КОЗІН

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9821-7774

В. Ф. СІРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-0831-6563

Т. С. ВОЛЬВАЧ

асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-8890-6901

Ю. В. СІРЕНКО

доктор філософії з галузі знань галузеве машинобудування, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1818-3653

О. В. РЯСНА

старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-6917-6950

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДКЛЮЧЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

У роботі досліджено причини аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі напругою 110 кВ у системі електропостачання Сумської області за період 2015–2023 рр. Проведено аналіз статистичних даних аварійних відключень, визначено динаміку та структуру причин їх виникнення. Встановлено, що за досліджуванний період зафіксовано 66 випадків відключень, з яких 15,2 % сталося через невідомі причини. Виявлено, що найбільша кількість аварійних відключень припадає на літньо-осінній період. Детальний аналіз структури встановлених причин аварійних відключень показав, що найбільшу частку становлять атмосферні перенапруги, які складають 29 % від загальної кількості. Перекриття та забруднення ізоляції є другою за значимістю причиною, кожна з яких складає більше 20 %.

Для оцінки рівня невизначеності та випадковості процесів відмов у системі електропостачання використано метод інформаційної ентропії. Отримані результати визначення інформаційної ентропії свідчать про збільшення невизначеності в процесах виникнення аварійних відключень, що спричинено зростанням зовнішніх впливів, деградацією обладнання та нестабільністю експлуатаційних параметрів мережі.

Наведено рекомендації для зниження кількості аварійних відключень, дотримання яких дозволить покращити надійність та стабільність роботи системи електропостачання, зменшити ризик виникнення непередбачуваних відмов, знизити недовідпуск електричної енергії споживачам.

Отримані результати можуть бути використані при складанні графіків планово-попереджувальних ремонтів з метою забезпечення встановленого рівня надійності електричного обладнання та попередження несправностей та зношування високовольтних ліній електропередачі.

Ключові слова: надійність електропостачання, аварійні відключення, атмосферні перенапруги, перекриття ізоляції, діагностика обладнання, профілактичне обслуговування, проектування ЛЕП, інформаційна ентропія.

O. YU. SAVOISKYI

Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

V. M. KOZIN

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9821-7774

V. F. SIRENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-0831-6563

T. S. VOLVACH

Assistant at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-8890-6901

YU. V. SIRENKO

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-1818-3653

O. V. RYASNAYA

Senior Lecturer at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-6917-6950

ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINE OUTAGES IN THE ELECTRICAL NETWORKS OF SUMY REGION

The study examines the causes of emergency outages of 110 kV high-voltage power transmission lines in the power supply system of Sumy region for the period 2015–2023. A statistical analysis of emergency outages was conducted, identifying the dynamics and structure of their causes. It was established that 66 cases of outages were recorded during the study period, 15.2 % of which occurred due to unidentified causes. It was found that the highest number of emergency outages occurred in the summer-autumn period. A detailed analysis of the structure of identified outage causes showed that the largest share is attributed to atmospheric overvoltages, accounting for 29 % of the total number. Insulation flashovers and contamination are the second most significant causes, each accounting for more than 20 %.

To assess the level of uncertainty and randomness in failure processes within the power supply system, the method of information entropy was applied. The obtained results indicate an increase in uncertainty in the occurrence of emergency outages, which is caused by the growing impact of external factors, equipment degradation, and instability of the network's operational parameters.

Recommendations for reducing the number of emergency outages are provided. Compliance with these recommendations will improve the reliability and stability of the power supply system, reduce the risk of unforeseen failures, and decrease the amount of unserved electrical energy for consumers.

The obtained results can be used in the development of scheduled preventive maintenance plans to ensure the established reliability level of electrical equipment and prevent failures and wear of high-voltage power transmission lines.

Key words: power supply reliability, emergency outages, atmospheric overvoltages, insulation breakdown, equipment diagnostics, preventive maintenance, power transmission line design, information entropy.

Постановка проблеми

Проблема надійності електропостачання є однією з ключових у сучасній електроенергетиці, особливо в регіонах з високим рівнем зношеності електромереж та значними зовнішніми впливами. Високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) є основними магістралями, що транспортують електроенергію до кінцевих споживачів, а їхні відключення впливають на функціонування промислових підприємств, соціальної інфраструктури та побутових користувачів. Однак у процесі експлуатації вони піддаються впливу різноманітних негативних факторів, які можуть призводити до аварійних відключень. Зниження надійності ЛЕП негативно позначається на стійкості всієї електроенергетичної системи, викликаючи перебої в роботі споживачів, економічні збитки та підвищення витрат на ремонт і обслуговування мереж.

Забезпечення вимог до якості електроенергії, а також кліматичні зміни, що збільшують ризик несприятливих умов для роботи ЛЕП, роблять дослідження причин аварійних відключень ліній особливо актуальними в умовах зростаючого енергоспоживання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведені попередні наукові дослідження підтверджують важливість глибокого аналізу причин відключень ЛЕП. У роботах [1, 2] виділено вплив перенапруг як одного з основних факторів, що можуть спричинити вихід із ладу елементів ліній електропередачі високої напруги. Перенапруги, які виникають внаслідок грозових явищ, комутаційних операцій або резонансних явищ, можуть призводити до пошкодження ізоляції та обладнання. Авторами детально досліджено аномальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами створень, підкреслюючи важливість врахування резонансних явищ для запобігання аварійним відключенням.

Дослідження зовнішніх факторів, таких як кліматичні умови, було розглянуто в роботах [3–6]. Автори зазначають, що погодні явища, включаючи сильний вітер, обмерзання проводів і грозову активність, є значними чинниками, які впливають на працездатність ЛЕП. У роботі зроблено висновок, що регулярний моніторинг стану обладнання та своєчасне обслуговування є ключовими для запобігання аварій.

У роботах [3, 7, 8] проведено огляд причин відключень електроенергії, серед яких виділено технічні несправності, природні явища та перевантаження системи. Автори підкреслюють важливість впровадження сучасних технологій моніторингу для зниження частоти відключень.

Авторами [9, 10] проаналізовано випадки відключень ЛЕП під час екстремальних снігових та льодових умов. Обґрунтовано необхідність удосконалення конструкцій ліній та впровадження систем обігріву для запобігання обледенінню. У звіті Національної лабораторії з відновлюваної енергії США (NREL) [11] розглянуто ризики виникнення лісових пожеж, спричинених енергетичною інфраструктурою, та запропоновано стратегії зниження цих ризиків, включаючи модернізацію обладнання та впровадження систем раннього виявлення.

Вітчизняний та міжнародний досвід свідчить про важливість комплексного підходу до вирішення проблеми аварійних відключень ЛЕП, що включає як технічні заходи, так і організаційні стратегії, адаптовані до специфічних умов експлуатації мережі. Враховуючи специфіку електромереж Сумської області, необхідно адаптувати загальні рекомендації до місцевих умов, зокрема, враховуючи кліматичні особливості та стан інфраструктури. Аналіз існуючих публікацій свідчить про актуальність та необхідність подальших досліджень у цьому напрямі для розробки ефективних заходів зменшення аварійних відключень високовольтних ЛЕП.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз причин аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі в електромережах Сумської області із визначенням інформаційної ентропії для оцінки невизначеності цих процесів та розробки рекомендацій щодо підвищення надійності електропостачання.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі досліджено причини та кількість аварійних відключень чотирьох живлячих ліній електропередачі напругою 110 кВ районної трансформаторної підстанції 110/35/10 кВ Сумського району Сумської області. Серед численних абонентів регіону присутні всі три категорії споживачів по надійності електропостачання. Тому відключення живлячих ліній 110 кВ призводить до колосальних збитків. Відомості про аварійні відключення повітряних ліній, отримані із оперативних журналів диспетчерського персоналу енергокомпанії, що обслуговує даний район електропостачання. Статистичні дані про аварії на повітряних лініях отримані за період 2015–2023 рр. Аварійні відключення, обумовлені обстрілами держави-агресора, при обробці даних не враховувалися.

На рис. 1 показано кількість аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі напругою 110 кВ у період із 2015 до 2023 року, розподілену за встановленими та невідновленими причинами виникнення.

Аналіз отриманих даних рис. 1 показує, що за досліджуваній період було зафіксовано 66 аварійних відключень, з яких 56 були зі встановлених причин. У 2015 році було зафіксовано 6 аварій, усі з яких мали встановлені причини. У 2016 і 2017 роках кількість аварій помітно знизилася.

Починаючи з 2018 року, кількість відключень знову почала зростати. У 2018 році було зафіксовано 6 аварій, одна з яких мала невідновлену причину. У 2019 році кількість відключень становила 4 випадки, причому вже



Рис. 1. Динаміка аварійних відключень ЛЕП за 2015–2023 рр.

3 з них мали невстановлені причини. У 2020 році спостерігалось значне зростання кількості аварій – до 11 випадків, із яких 2 залишилися без встановленої причини.

У 2021 році кількість аварійних відключень досягла 9, із яких одне мало невстановлену причину. Найвищі показники аварійності були зафіксовані у 2022 та 2023 роках – 13 та 12 відключень, із яких без встановлених причин у 2022 році відбулося 1 відключення, а у 2023 році – 2. Загальна кількість аварій через невстановлені причини за досліджуваний період становила 10 відключень, що складає 15,2 % від загального числа подій.

Розподіл аварійних відключень повітряних ліній за місяцями року за 2015–2023 рр. (рис. 2) показує, що найбільше аварійних відключень стається влітку та восени. Очевидно, це пояснюється забрудненням ізоляторів та впливом кліматичних умов (вітрові навантаження, атмосферні перенапруги, тощо). Водночас, більшість відключень були короткочасними завдяки надійній роботі автоматичного повторного включення ліній.

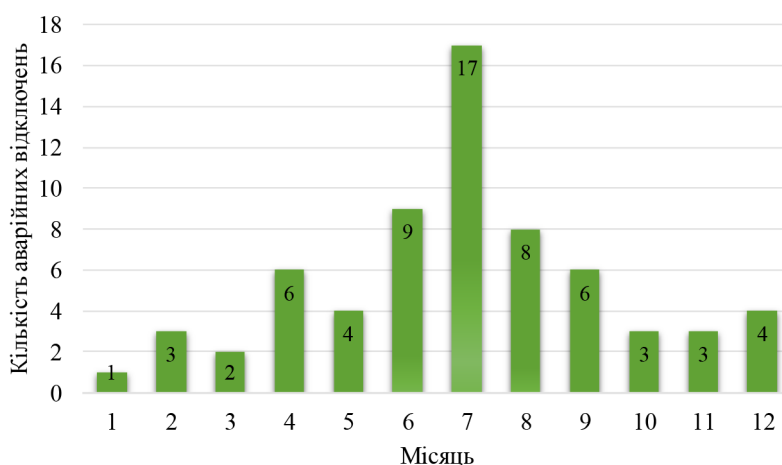


Рис. 2. Кількість аварійних відключень по місяцям протягом 2015–2023 рр.

Детальний аналіз структури встановлених причин аварійних відключень (рис. 3) показує, що найбільшу частку становлять атмосферні перенапруги, які складають 29 % від загальної кількості. Перекриття та забруднення ізоляції є другою за значимістю причиною, кожна з яких складає більше 20 %.

Птахи спричинили 14 % аварійних відключень, що свідчить про важливість урахування їхньої взаємодії з ЛЕП, особливо в районах із високою концентрацією птахів. Аварійні відключення через пошкодження у споживачів становлять найменшу частку – 12 %, але вони все одно залишаються значущим фактором, який може бути пов'язаним із фізичним зносом обладнання або аварійними ситуаціями внаслідок інших причин.

Результати аналізу показують специфіку географічного та кліматичного розташування повітряних ліній електропередачі. Чинні карти, що відображають райони електромереж за вітровими та ожеледними навантаженнями, а також за кількістю грозових годин протягом року, були створені понад три десятиліття тому. Наразі вони лише частково відповідають реальним умовам експлуатації ліній, що обумовлено змінами клімату в регіоні. Зокрема, на пошкодження ізоляційних матеріалів суттєво впливають температурні коливання протягом доби, а також зростання популяції місцевих і мігруючих птахів [12].



Рис. 3. Структура аварійних відключень зі встановлених причин

Таким чином виявлено, що більшість причин відключень пов'язана з технічним станом обладнання та впливом природних чинників, що вимагає як удосконалення конструктивних рішень для ЛЕП, так і підвищення якості обслуговування та моніторингу мережі.

Під час експлуатації електричних систем випадкові збої в роботі обладнання свідчать про вплив непередбачуваних факторів. Серед них виділяють кліматичні умови, взаємодію з живими організмами (людиною, тваринами, птахами), вітрові навантаження, утворення ожеледі, а також природне старіння і зношення обладнання. До цього додаються можливі помилки в роботі автоматичних систем управління та захисту. Більшість цих факторів має ймовірнісну природу. Тому важливе значення має збір статистичних даних про такі події, їх реєстрація диспетчерами на підстанціях і у диспетчерських пунктах для подальшого аналізу стану електрообладнання.

Серед методів аналізу статистичних даних про технічний стан обладнання часто використовується ентропійний підхід [13]. Цей метод базується на визначенні інформаційної ентропії, яка є мірою невизначеності даних.

Інформаційна ентропія є кількісною характеристикою невизначеності процесу, що описує рівень хаотичності та непередбачуваності відмов у мережі. Обчислення ентропії дозволить отримати уявлення про стан повітряних ліній упродовж тривалого часу, а також визначити чинники, які сприяють прискореному зносу ізоляції, аналізувати причини відмов і виявляти слабкі місця мережі з точки зору надійності.

Відповідно до формули Шеннона [13]:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

де H – значення інформаційної ентропії; N – кількість подій у системі, які підлягають аналізу; p_i – імовірність появи i -ї події.

Кількість подій у системі (протягом року), які підлягають аналізу:

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_i, \quad (2)$$

де n_i – число аварійних відключень i -го виду.

Імовірність відключення повітряної лінії:

$$q_i = \frac{n_i}{N}. \quad (3)$$

Відповідно до виразу (1) ентропія кожної з можливих подій:

$$H_i = -q_i \log q_i. \quad (4)$$

Ентропія за досліджуваний рік:

$$H_k = \sum_{i=1}^N H_i. \quad (5)$$

Результати розрахунків за виразами (1–5) наведені в таблиці 1.

На основі отриманих даних таблиці 1 отримано графік інформаційної ентропії аварійних відключень повітряних ліній, наведений на рис. 4.

Таблиця 1

Результати визначення інформаційної ентропії

Рік	Показник	Атмосферні перенапруги	Перекриття ізоляції	Забруднення ізоляції	Пошкодження в мережі	Не встановлені причини	Сумарна ентропія
2015	n_i	3	2	1	0	0	–
	q_i	0,5	0,333	0,167	0	0	–
	H_i	0,5	0,528	0,431	0	0	1,459
2016	n_i	1	1	1	0	0	–
	q_i	0,333	0,333	0,333	0	0	–
	H_i	0,528	0,528	0,528	0	0	1,585
2017	n_i	1	1	0	0	0	–
	q_i	0,5	0,5	0	0	0	–
	H_i	0,5	0,5	0	0	0	1,000
2018	n_i	1	3	1	0	1	–
	q_i	0,167	0,5	0,167	0	0,167	–
	H_i	0,431	0,5	0,431	0	0,431	1,792
2019	n_i	0	1	0	0	3	–
	q_i	0	0,250	0	0	0,750	–
	H_i	0	0,500	0	0	0,311	0,811
2020	n_i	2	5	0	2	2	–
	q_i	0,182	0,455	0	0,182	0,182	–
	H_i	0,447	0,517	0	0,447	0,447	1,859
2021	n_i	1	4	1	2	1	–
	q_i	0,111	0,444	0,111	0,222	0,111	–
	H_i	0,352	0,520	0,352	0,482	0,352	2,059
2022	n_i	2	3	6	1	1	–
	q_i	0,154	0,231	0,462	0,077	0,077	–
	H_i	0,415	0,488	0,515	0,285	0,285	1,988
2023	n_i	5	2	1	2	2	–
	q_i	0,417	0,167	0,083	0,167	0,167	–
	H_i	0,526	0,431	0,299	0,431	0,431	2,117

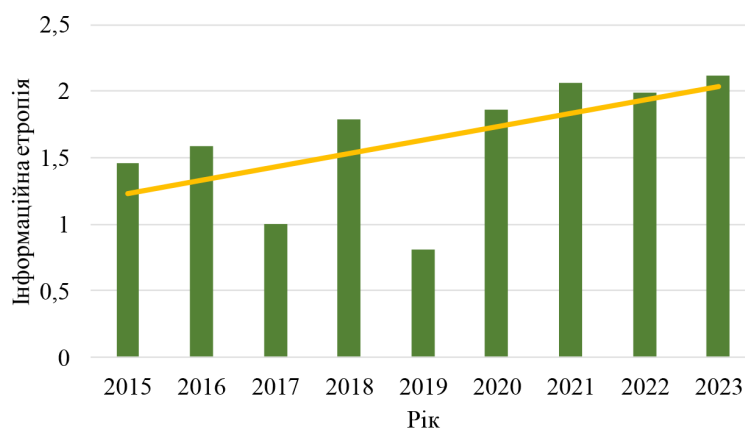


Рис. 4. Графік інформаційної ентропії аварійних відключень повітряних ліній

Аналіз отриманих даних (рис. 4) показує наявність коливань значень ентропії у різні роки, з мінімальними значеннями у 2017 та 2019 роках, що є наслідком реалізації ефективних заходів з технічного обслуговування, часткової модернізації мереж та інших управлінських рішень, спрямованих на підвищення надійності системи електропостачання.

Підвищення рівня інформаційної ентропії свідчить про зниження прогнозованості роботи системи електропостачання, що ускладнює ідентифікацію критичних факторів ризику та потребує удосконалення методів діагностики та профілактичного обслуговування. Якщо тенденція до зростання ентропії збережеться, це може призвести до підвищення частоти відмов та зниження рівня надійності електромережі. Тому необхідним є розроблення комплексних підходів щодо підвищення стійкості мережі та мінімізації впливу випадкових факторів на її експлуатаційні характеристики.

У таблиці 2 наведено рекомендації щодо зменшення аварійних відключень ЛЕП для всіх видів їх причин виникнення, що розглядаються в роботі.

Таблиця 2

Заходи щодо зменшення аварійних відключень ЛЕП

№ з/п	Причина відключення	Заходи
1.	Атмосферні перенапруги	1. Перегляд існуючих кліматичних карт для проектування нових ЛЕП. 2. Підсилення конструкцій існуючих ЛЕП. 3. Установка лінійних обмежувачів перенапруги (ОПН) та довго-іскрових розрядників (РДП, РДШ)
2.	Забруднення ізоляції	1. Періодичне чищення ізоляції. 2. Змазування ізоляції гідрофобними пастами
3.	Перекриття ізоляції	1. Профілактичне очищення ізоляторів. 2. Підсилення ізоляційних проміжків. 3. Гідрофобізація поверхонь ізоляторів
4.	Птахи	1. Використання полімерних ковпаків для гірлянд підвісних ізоляторів. 2. Використання пасивного захисту у вигляді штучних загороджень
5.	Відключення через пошкодження у споживачів	1. Застосування заходів щодо усунення причин пошкоджень стороннього впливу.

Крім того, для успішної експлуатації повітряних ліній діяльність підприємства, що обслуговує дані ЛЕП, повинна бути направлена на підтримку високого рівня надійності мереж в процесі їх використання за призначенням.

Висновки

Проаналізовано частоту та причини аварійних відключень ліній електропередачі напругою 110 кВ в системі електропостачання Сумського регіону. Встановлено, що за досліджуваний період зафіксовано 66 випадків відключень, з яких 15,2 % сталося через невідомі причини. Виявлено, що більшість причин відключень пов'язана з технічним станом обладнання та впливом природних чинників, що вимагає як удосконалення конструктивних рішень для ЛЕП, так і підвищення якості обслуговування та моніторингу мереж.

Розрахунок інформаційної ентропії аварійних відключень за 2015–2023 рр. показав тенденцію до збільшення невизначеності в процесах виникнення аварійних відключень, що спричинено зростанням зовнішніх впливів, деградацією обладнання та нестабільністю експлуатаційних параметрів мережі.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації графіків технічного обслуговування електро-технічного обладнання систем електропостачання, підвищення оперативності реагування на відмови та розробки науково обґрунтованих рішень для підвищення стійкості електромереж регіону.

Список використаної літератури

1. Кучанський В. В. Заходи запобігання резонансних перенапруг в магістральних електричних мережах. *Електроніка та зв'язок: науково-технічний журнал*. 2016. Том 21, Вип. 4(93). С. 24–27.
2. Pereira T., Acosta J., Santiago J., Tavares M. Overvoltages due to line faults on a HWL transmission line: Corona effect and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 224. P. 109573. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109573>
3. Salman H. M., Pasupuleti J., Sabry A. H. Review on Causes of power outages and their occurrence: Mitigation Strategies. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Issue 20. P. 15001. <https://doi.org/10.3390/su152015001>
4. Campbell R. J. Weather-related power outages and electric system resiliency. In *The Transformation of Electrical Power: Key Issues; Library of Congress, Congressional Research Service*: Washington, DC, USA, 2013.
5. Kolev V. G., Sulakov S. I. The weather impact on the overhead line losses. In *15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. 2017. pp. 119–123. <https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955414>
6. Yang S.; Zhou W.; Zhu S.; Wang L.; Ye L.; Xia X.; Li H. Failure probability estimation of overhead transmission lines considering the spatial and temporal variation in severe weather. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2018. Vol. 7. P. 131–138. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0370-4>
7. Wu Y., Chang S. M., Hu Y. Literature Review of power system blackouts. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 141. P. 428–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.055>
8. Савойський О. Ю., Сіренко В. Ф., Вольвач Т. С., Сіренко Ю. В. Підвищення надійності районних трансформаторних підстанцій за рахунок орнітологічного захисту ліній електропередачі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2024. Вип. 24(2). С. 130-139. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-11>
9. Cerrai D., Koukoulou M., Watson P., Anagnostou E. N. Outage prediction models for snow and ice storms. *Sustainable Energy Grids and Networks*. 2019. Vol. 21. P. 100294. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100294>

10. Farzaneh M., Chisholm W. A. Effects of ice and snow on the electrical performance of power network insulators. In *Springer eBooks*. 2008. P. 269–325. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8531-4_7
11. Panossian Nadia, Tarek Elgindy. *Power System Wildfire Risks and Potential Solutions: A Literature Review & Proposed Metric*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. 2023. NREL/TP-6A40-80746.
12. Балабух В. О. Зміна екстремальних та небезпечних умов погоди, що впливають на енергетичну галузь України. Перший Всеукраїнський Гідрометеорологічний З'їзд з міжнародною участю. 2017. С. 240–241.
13. Saraiva P. On Shannon entropy and its applications. *Kuwait Journal of Science*. 2023. Vol. 50(3). P. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.05.004>

References

1. Kuchanskyy, V. (2016). The events for prevention of resonant overvoltages in main power electrical networks. *Elektronika ta zviazok: naukovo-tehnichniy zhurnal*, 21, 4(93), 24–27.
2. Pereira, T., Acosta, J., Santiago, J., Tavares, M. (2023). Overvoltages due to line faults on a HWL transmission line: Corona effect and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*, 224, 109573. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109573>
3. Salman, H. M., Pasupuleti, J., Sabry, A. H. (2023). Review on Causes of power outages and their occurrence: Mitigation Strategies. *Sustainability*, 15(20), 15001. <https://doi.org/10.3390/su152015001>
4. Campbell, R. J. (2023). *Weather-related power outages and electric system resiliency*. In The Transformation of Electrical Power: Key Issues; Library of Congress, Congressional Research Service: Washington, DC, USA.
5. Kolev, V. G., Sulakov, S. I. (2017). The weather impact on the overhead line losses. In *15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 119–123. <https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955414>
6. Yang, S., Zhou, W., Zhu, S., Wang, L., Ye, L., Xia, X., Li, H. (2018). Failure probability estimation of overhead transmission lines considering the spatial and temporal variation in severe weather. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(1), 131–138. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0370-4>
7. Wu, Y., Chang, S. M., Hu, Y. (2017). Literature Review of power system blackouts. *Energy Procedia*, 141, 428–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.055>
8. Savoiskyi, O., Sirenko, V., Volvach, T., Sirenko, Yu. (2024). Enhancing the reliability of district transformer substations through ornithological protection of power lines. *Proceedings of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*, 24(2), 130-139. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-11>
9. Cerrai, D., Koukoulas, M., Watson, P., Anagnostou, E. N. (2019). Outage prediction models for snow and ice storms. *Sustainable Energy Grids and Networks*, 21, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100294>
10. Farzaneh, M., Chisholm, W. A. (2008b). Effects of ice and snow on the electrical performance of power network insulators. In *Springer eBooks* (pp. 269–325). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8531-4_7
11. Panossian, Nadia, and Tarek Elgindy. (2023). *Power System Wildfire Risks and Potential Solutions: A Literature Review & Proposed Metric*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-80746.
12. Balabukh, V. (2017). Changing extreme and hazardous weather conditions affecting Ukraine's energy sector. *First all-ukrainian hydrometeorological congress with international participation*, 240–241.
13. Saraiva, P. (2023). On Shannon entropy and its applications. *Kuwait Journal of Science*, 50(3), 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.05.004>