

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
«_____» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

«Підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній 35 кВ в ожеледний період»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-22МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____ Андрій БІЛОУС
«_____» _____ 2023 р.

Керівник роботи к.т.н., доц.
_____Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ
«_____» _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма Електротехнічні системи
електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛІШКОВ

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ Білоусу Андрію Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній 35 кВ
в ожеледний період.

_____ Improving the operational reliability of 35 kV overhead lines in icy weather
conditions.

2. Керівник роботи Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.

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

3. Строк подання роботи до захисту 15.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи зниження технологічних порушень у роботі
повітряних ліній 35 кВ у ожеледний період, на базі вдосконалення конструкції
проводу.

Завдання: 1. Провести аналіз технічного стану та методів захисту повітряних
ліній від ожеледно-вітрових навантажень. 2. Обґрунтувати метод
вдосконалення конструкції проводу ПЛ, що знаходиться в експлуатації.
3. Провести чисельне моделювання коефіцієнтів опору форми стандартного
проводу та проводу зміненої конструкції. 4. Виконати розрахунок вітрових
навантажень на провід ПЛ. 5. Провести аналіз ефективності запропонованих
технічних рішень. 6. Розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при
експлуатації повітряних ліній електропередавання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І. В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ. Обґрунтування актуальності дослідження</i>	<i>4.09 – 8.09</i>	
2	<i>Розділ 1. Аналіз стану повітряних ліній 35 кВ</i>	<i>11.09 – 22.09</i>	
	<i>і заходів, що підвищують надійність їх роботи в</i>		
	<i>ожеледний період</i>		
3	<i>Розділ 2. Обґрунтування методу вдосконалення</i>	<i>25.09 – 27.10</i>	
	<i>конструкції проводу повітряної лінії</i>		
4	<i>Розділ 3. Комп'ютерне моделювання вітрового</i>	<i>1.11 – 24.11</i>	
	<i>навантаження на проводи повітряних ліній</i>		
5.	<i>Розділ 4. Охорона праці</i>	<i>27.11 – 1.12</i>	
6.	<i>Формулювання загальних висновків</i>	<i>4.12-7.12</i>	
7.	<i>Оформлення списку використаних джерел</i>	<i>6.12 – 8.12</i>	
8.	<i>Оформлення презентаційного матеріалу у вигляді</i>	<i>11.12 – 15.12</i>	
	<i>слайдів</i>		

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис керівника

Козловський О. А.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Білоус А. А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 102 с.; 46 рис.; 11 табл.; 71 джерело.

Білоус А. А. Підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній 35 кВ в ожеледний період. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Об'єкт дослідження – процеси утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній.

Предмет дослідження – вітрові навантаження на проводи повітряних ліній.

Мета кваліфікаційної роботи – зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній 35 кВ у ожеледний період на базі вдосконалення конструкції проводу.

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз стану повітряних ліній 35 кВ і заходів, що підвищують надійність їх роботи в ожеледний період. У другому розділі обґрунтовано метод вдосконалення конструкції проводу повітряної лінії. У третьому розділі проведено комп'ютерне моделювання вітрового навантаження на проводи повітряних ліній. У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час експлуатації повітряних ліній електропередавання та заходів, що забезпечують безпеку робіт при їх обслуговуванні.

Результати досліджень, проведених у даній магістерській роботі можуть бути використані в енергопостачальних компаніях при розробці технічних заходів зі зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній з неізолюваними проводами, що знаходяться в експлуатації.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, розподільні мережі, природні ризики, вітрові навантаження, комп'ютерне моделювання.

ABSTRACT

Qualification work 102 p.; 46 fig.; 11 tabl.; 71 sources.

Bilous A. A. Improving the operational reliability of 35 kV overhead lines in icy weather conditions. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The object of the study is the processes of formation of ice-frost accretion on the wires of overhead power lines.

The subject of the study is wind loads on overhead power lines.

The purpose of the qualification work is to reduce technological violations in the operation of 35 kV overhead power lines in the icy period on the basis of improving the wire design.

In the first section of the qualification work, an analysis of the condition of 35 kV overhead power lines and measures that increase the reliability of their operation in the icy period was performed. In the second chapter, the method of improving the design of the overhead power line wire is substantiated. In the third section, a computer simulation of the wind load on the wires of the overhead lines was carried out. In the fourth chapter, an analysis of dangerous and harmful factors during the operation of overhead power lines and measures that ensure the safety of work during their maintenance is carried out.

The results of research carried out in this master's thesis can be used in energy supply companies in the development of technical measures to reduce technological violations in the operation of overhead power lines with non-insulated wires that are in operation.

Keywords: overhead power line, distribution networks, natural hazards, wind loads, computer modeling.

ЗМІСТ

стр.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 35 кВ І ЗАХОДІВ, ЩО ПІДВИЩУЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ЇХ РОБОТИ В ОЖЕЛЕДНИЙ ПЕРІОД.....	12
1.1. Аналіз стану повітряних ліній 35 кВ.....	12
1.2. Огляд методів та засобів підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній в ожеледний період.....	19
1.3. Вибір задач дослідження	28
1.4. Висновки	31
2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРОВОДУ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ.....	32
2.1. Теоретичні основи механізмів гідро-ожеледофобності поверхонь	32
2.2. Аналіз сучасних матеріалів, що мають ожеледофобні властивості	43
2.3. Рекомендації, щодо вибору захисного покриття проводу.....	52
2.4. Висновки	54
3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ	55
3.1. Постановка задачі та основні припущення	55
3.2. Опис математичної моделі.....	58
3.3. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання	68
3.4. Розрахунок вітрових навантажень на провід	74
3.5. Технічні рекомендації, щодо виконання захисного покриття на проводі..	81

3.6. Оцінка очікуваного підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній	82
3.7. Висновки	86
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	87
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів під час експлуатації повітряних ліній електропередавання	87
4.2. Організація безпечної експлуатації повітряних ліній	88
4.3. Розрахунок заземлення опори повітряної лінії 35 кВ	90
4.4. Висновки	94
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЛ – повітряна лінія;

ОПВ – ожеледно-паморозеві відкладення;

КЗ – коротке замикання;

ОВА – ожеледно-вітрова аварія;

КБ – клас безвідмовності;

ПТФЕ – політетрафторетилен;

PU – поліуретан;

FPU – фторований поліуретан;

PFPE – поліфторірований поліефір;

PDMS – полідиметилсилоксан;

SLIPS – slippery liquid-infused porous surfaces;

ОПН – обмежувач перенапруги;

ІП – іскровий проміжок;

АПВ – автоматичне повторне вмикання;

ВСТУП

Актуальність теми. Суспільство не може повноцінно існувати без надійного електропостачання. Інфраструктура передавання електроенергії є життєво важливою та визначальною для функціонування сучасних економік. Відмови в системі електропостачання можуть привести до значних матеріальних збитків, колапсу економіки та суспільного життя [1].

Електричні мережі України мають складну та розгалужену структуру, так сумарна довжина (за ланцюгами) повітряних ліній системи передачі складає 21,86 тис. км, а системи розподілу – 753 тис. км. Вони характеризуються високим відсотком зносу основних фондів, що приводить до підвищення експлуатаційних витрат на їх ремонти та технічне обслуговування [2-7] і зниженням надійності та якості електропостачання споживачів. Наприклад, частка ПЛ 35 кВ системи передачі, що знаходяться в експлуатації більше 40 років складає близько 61%.

На даний час, ситуація ускладнюється ще й погіршенням кліматичних умов на території України внаслідок збільшення потужності стихійних метеорологічних явищ. У результаті цього посилення ожеледно-вітрових навантажень на повітряні лінії збільшилась кількість пошкоджень їх конструктивних елементів і прискорився їх знос, тому виникла необхідність їх докорінного технічного переоснащення [1]. Однак, наявні обсяги оновлення повітряних ліній не тільки не зменшують існуючу диспропорцію між старінням та відновленням, але й навіть не покривають фактичного зносу цих повітряних ліній [2, 5]. Тому на сьогодні ця обставина є однією із головних проблем ПЛ експлуатації.

Вирішити дану проблему можливо шляхом застосування спеціальних методів і засобів захисту ПЛ від наднормативних кліматичних навантажень з низькими капіталовкладеннями й тим самим подовжити строк їх експлуатації.

Отже, вирішення задачі підвищення стійкості повітряних ліній 35 кВ систем передачі та системи розподілу електроенергії України до несприятливих кліматичних факторів у ожеледний період є актуальним.

Мета і завдання досліджень – зниження технологічних порушень у роботі повітряних ліній 35 кВ у ожеледний період, на базі вдосконалення конструкції проводу.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні основні завдання:

- провести аналіз технічного стану та методів захисту повітряних ліній від ожеледно-вітрових навантажень;
- обґрунтувати метод вдосконалення конструкції проводу ПЛ, що знаходиться в експлуатації;
- провести чисельне моделювання коефіцієнтів опору форми стандартного проводу та проводу зміненої конструкції;
- виконати розрахунок вітрових навантажень на провід ПЛ;
- провести аналіз ефективності запропонованих технічних рішень;
- розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці при експлуатації повітряних ліній електропередавання.

Об'єкт дослідження – процес передавання електричної енергії в розподільних мережах.

Предмет дослідження – ожеледно-вітрові навантаження на проводи ПЛ 35 кВ.

Методи досліджень. При виконанні теоретичних досліджень було використано такі методи теорії електричних кіл, термодинаміки, фізико-хімічних процесів, методів твердотільного моделювання, математичних методів обчислювального експерименту в задачах гідродинаміки. Розрахунки проводились у прикладних застосунках Mathcad, Microsoft Excel і SolidWorks.

Наукова цінність отриманих результатів заключається в наступному:

- отримав подальший розвиток метод захисту проводів повітряних ліній, який, на відміну від відомих, може бути застосованим для повітряних ліній, що знаходяться в експлуатації;
- удосконалені чисельні моделі стандартного та модернізованого проводів, що дозволило врахувати їх дійсні коефіцієнти опору форми при визначенні вітрових навантажень.

Практична цінність отриманих результатів кваліфікаційної роботи для електроенергетичної галузі полягає в розробці технічних рекомендацій щодо вибору захисного покриття та нанесення його на проводи повітряних ліній напругою 35 кВ. Ефективність результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджено розрахунком очікуваного підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 35 кВ І ЗАХОДІВ, ЩО ПІДВИЩУЮТЬ НАДІЙНІСТЬ ЇХ РОБОТИ В ОЖЕЛЕДНИЙ ПЕРІОД

Головною рисою електричних мереж України є значний строк їх експлуатації. Який складає для більшості повітряних ліній понад 40 років, тобто вони практично вичерпали свій експлуатаційний ресурс. На сьогодні, ситуація ускладнюється тим, що внаслідок зміни клімату повітряні лінії піддаються впливу наднормативних кліматичних навантажень. Тому для постановки задач дослідження необхідно:

- провести аналіз сучасного стану наявних повітряних ліній 35 кВ;
- визначити найбільш придатні методи для підвищення експлуатаційної надійності роботи повітряних ліній 35 кВ в ожеледний період.

1.1 Аналіз стану повітряних ліній 35 кВ

Довжина повітряних ліній (за ланцюгами) напругою 35 кВ у системи передачі електричної енергії України складає 131,3 км (табл. 1.1) [2]. З них 80,2 км або 59% (рис. 1.1) мають строк експлуатації більше 40-ка років, 12,5 км або 2% 30-40 років. Тобто 61% ПЛ 35 кВ системи передачі вичерпав свій експлуатаційний ресурс. У той же час, у холодну пору року існує висока ймовірність виникнення наднормативних ожеледних навантажень. Крім того, в останні роки через відсутність фінансування знизився рівень профілактичних та планових ремонтів, а тому ймовірність виникнення технологічних порушень у роботі ПЛ зростає [2, 5].

Таблиця 1.1 – Технічний стан ПЛ 35 кВ системи передачі станом на 01.01.21 р. [2]

Клас напруги, кВ	Всього, км		У т. ч. знаходяться в експлуатації (років) (за ланцюгами)			
	по трасі	за ланцюгами	до 25	25-30	30-40	більше 40
35	129,717	131,327	36,134	2,460	12,530	80,203

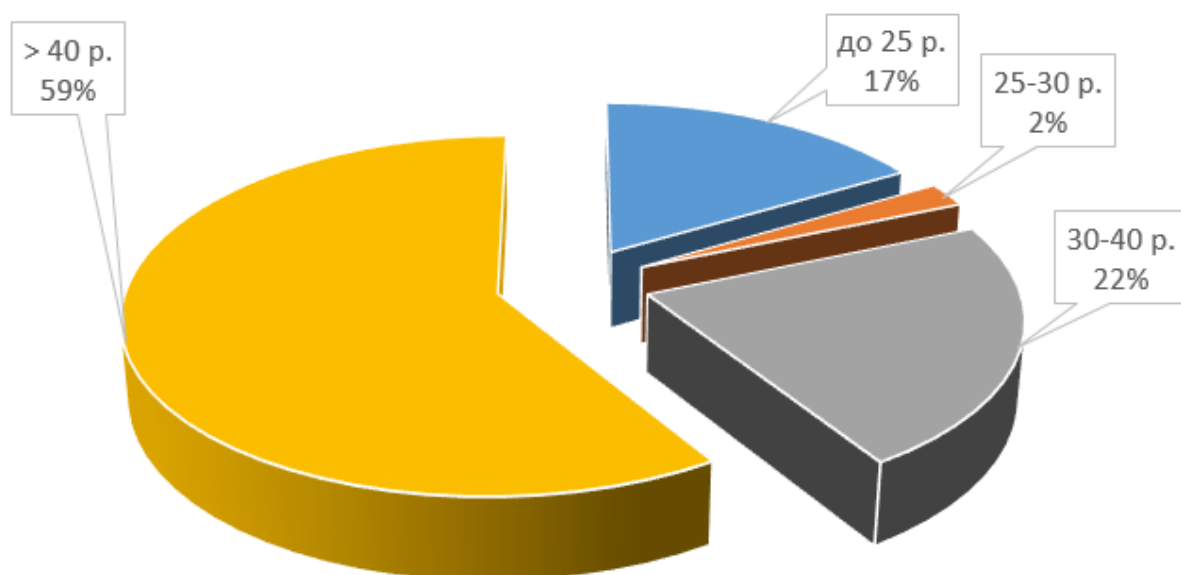


Рисунок 1.1 – Рівень зносу ПЛ 35 кВ системи передачі електроенергії [2]

Станом на початок 2021 року система розподілу електричної енергії України нараховувала 752'932 км повітряних ліній електропередавання напругою 0,4-154 кВ, в тому числі 60'858 км напругою 35 кВ (табл. 1.2) [9]. Загальна кількісна характеристика електромереж 0,4-154 кВ системи розподілу представлена на у табл. 1.2, а відсоткова вага повітряних ліній кожного класу напруги в загальному підсумку – на рис. 1.2.

Для визначення експлуатаційних характеристик повітряних ліній розподільних електромереж 35 кВ необхідно провести аналіз статистичних даних про технологічні порушення в їх роботі та об'єми недоданої електроенергії споживачам. З цією метою на основі аналізу «Річних оглядів діяльності Держенергонагляду» (НЕК Укренерго) були складені табл. 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.2 – Загальна кількісна характеристика електричних мереж 0,4-154 кВ системи розподілу станом на 0.1.01.2021 року [9]

Кількість	Напруга, кВ				
	110 (154)	35	6 (10)	0,4	Всього
Довжина ПЛЕ, км*	35 079	60 858	267034	384 245	752 932

* Без врахування без Кримської ЕЕС та неконтрольованої території Донбаської ЕЕС

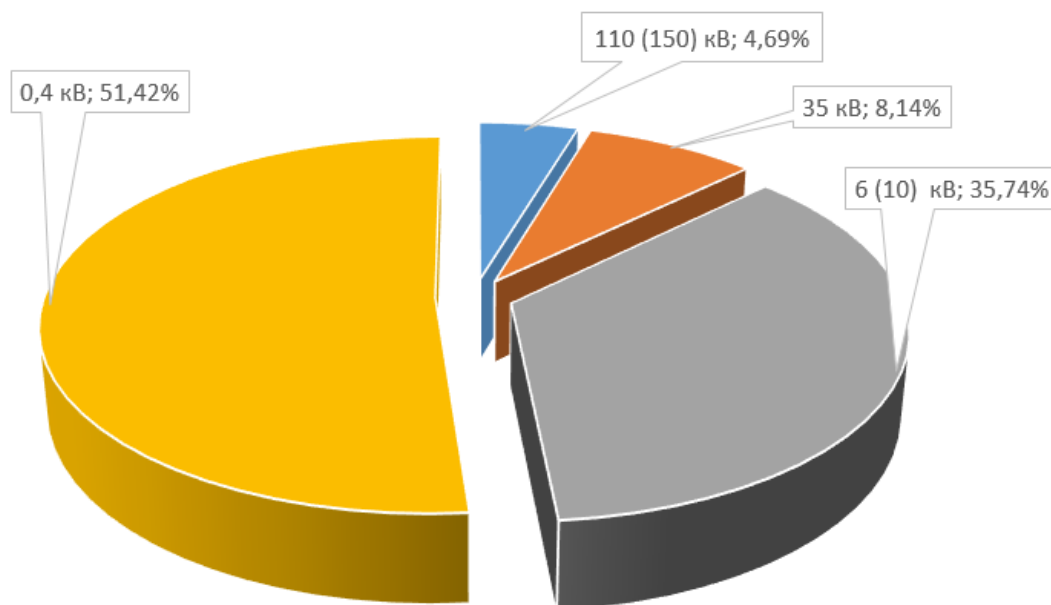


Рисунок 1.2 – Структура ПЛ розподільних мереж за класами напруги

Таблиця 1.3 – Технологічні порушення цехового обліку в електромережах 35-154 кВ електропередавальних організацій

Рік	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<i>n</i> , шт	2113	2181	1412	3068	1580	1663	1356	1401	1408	1402

Таблиця 1.4 – Недодана електроенергія із-за технологічних порушень цехового обліку в електромережах 35-154 кВ електропередавальних організацій

Рік	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<i>W</i> , тис. кВт·год	5,107	7,109	2,145	3,804	3,168	2,956	2,085	2,942	3,108	3,178

Для оцінки надійності повітряних ліній електропередавання по наявних статистичних даних був розрахований параметр потоку відмов за виразом [8]:

$$\omega(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{L_{\Sigma} \Delta t}, \quad (1.1)$$

де $n(t, t + \Delta t)$ – число відмов на інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$;

L_{Σ} – сумарна довжина ліній, що мають строк служби T ($t \leq T \leq t + \Delta t$);

Δt – період усереднення, приймаємо $\Delta t = 1$ рік.

Результати розрахунку представлені в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Параметр потоку відмов ПЛ 35-150 кВ в 2018 році на 100 км

Параметр	Значення, 1/рік
ω	1,5
$\omega_{\text{пр}}$	0,72-1,16

де $\omega_{\text{пр}}$ – проектне значення потоку відмов, 1/рік [8].

Проведений розрахунок показав, що параметр потоку відмов повітряних ліній 35-154 кВ перевищує рекомендовані значення у 1,29 - 2,1 разів.

Зниження кількості технологічних порушень у роботі ПЛ 35-154 кВ, відносно максимуму в 2012 р. спостерігалось в період з 2012 року по 2015 рік включно. З 2016 року по 2018 рік відбувається певна стабілізація кількості порушень цехового обліку на рівні 1404 шт. (середнє значення) з незначним подальшим зростанням. У 2015 р. було зафіксовано на 307 випадків менше технологічних порушень ніж у 2014 році. Однією з причин цього є відсутність статистичної інформації з Кримської ЕЕС та неконтрольованої території Донбаської ЕЕС внаслідок їх окупації. Сила кореляційного зв'язку між технологічними порушеннями цехового обліку в електромережах і недоданою електроенергією внаслідок цих порушень є середньою, так як коефіцієнт кореляції дорівнює 0,55. Максимальне значення недоданої електроенергії 7,109 тис. кВт·год було зафіксоване в 2010 році, далі почалося зниження цього параметру до 2015 року, з 2016 року відбулася стабілізація з незначним зростанням.

На рис. 1.3 і рис. 1.4 представлені часові ряди, відповідно, технологічних порушень цехового обліку та недоданої електроенергії внаслідок цих порушень. Побудовані тренди цих рядів носять спадаючий характер, хоча впродовж останніх 3-х років обидва параметри зростають.

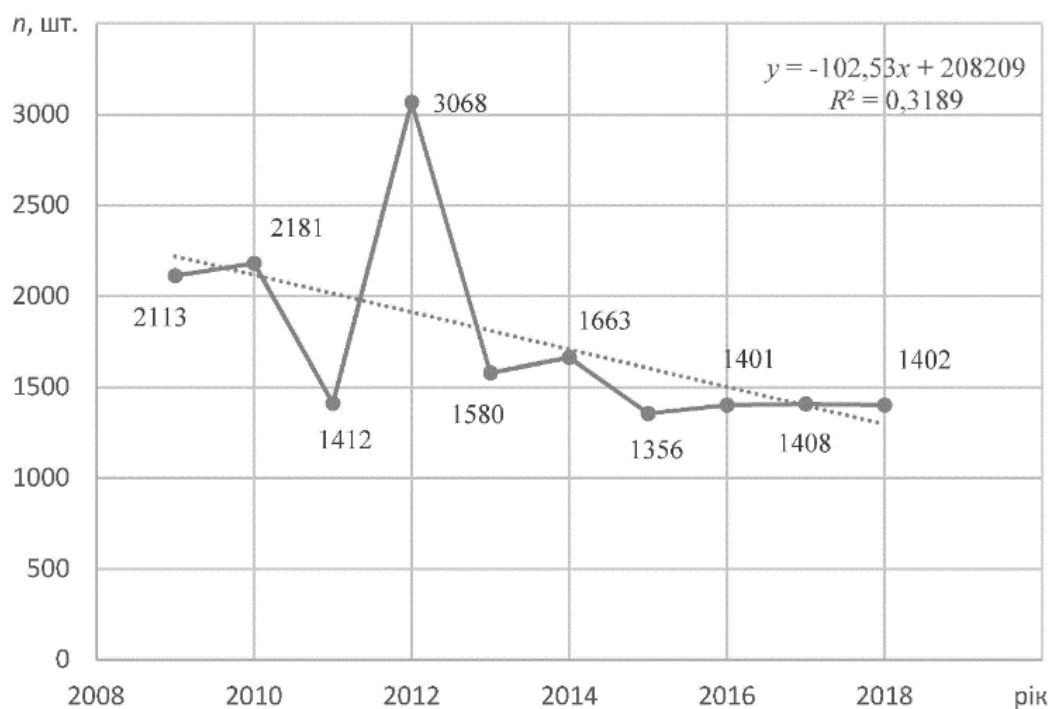


Рисунок 1.3 – Динаміка зміни кількості технологічних порушень у електромережах 35-154 кВ

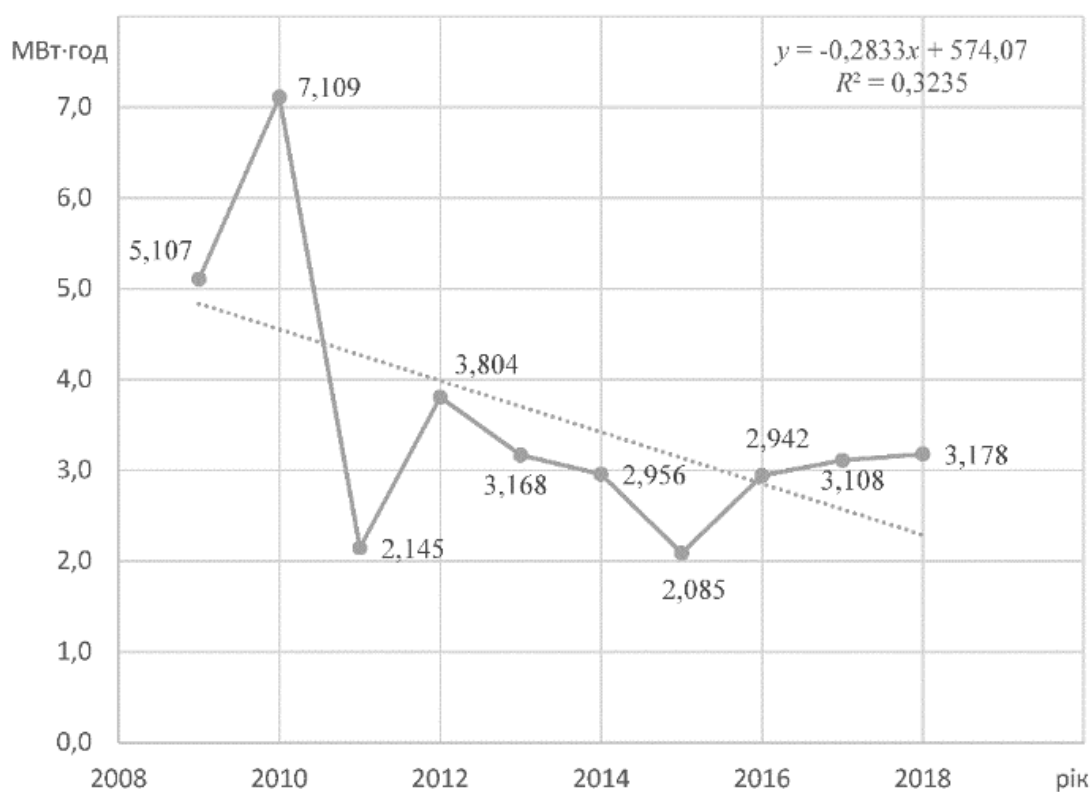


Рисунок 1.4 – Динаміка зміни недоданої електроенергії в електричних мережах 35-154 кВ

Для виявлення причин технологічних порушень у роботі основного обладнання були розглянуті відмови I та II категорій за організаційними ознаками (див. табл. 1.6) за 6-ть років. До них відносяться порушення роботи й пошкодження устаткування електростанцій, електро- та тепломереж груп А, Б чи В, що зазначених в Переліку устаткування електростанцій, електро- та тепломереж. Внаслідок цих порушень виникають короточасні перерви енерговиробництва, порушення в роботі енергопідприємств, які є відмовами I і II категорій (порушення цехового обліку), що розслідуються, класифікуються та обліковуються відповідно до правил у [11].

У 2018 році відбулося 8 відмов I категорії та 45 відмов II категорії з недоданим обсягом електроенергії споживачам 12,2 млн. кВт·год та 4,54 тис. кВт, відповідно, проти 8 відмов I категорії та 43 відмов II категорії з недоданим обсягом електроенергії споживачам 3,5 млн. кВт·год та 1,4 млн. кВт відповідно в 2017 році.

Аналіз табл. 1.6 показує, що несприятливі погодні умови є причиною від 21% до 55% відмов I і II категорій, тобто енергетичне обладнання піддається значним кліматичним навантаженням. Кліматичні аварії призводять до серйозних наслідків, руйнують або ушкоджують обладнання критичної інфраструктури наслідком чого є значні втрати електропостачальних компаній. Відмова електричного обладнання під час стихійного лиха не тільки викликає значні прямі та побічних економічні втрати, але також суттєво впливає на життя та суспільне виробництво.

Таблиця 1.6 – Кількість відмов I-ї та II-ї категорії за організаційними ознаками

Причина	Рік					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Несприятливі погодні умови	22	19	10	13	28	18
Вина персоналу	13	7	18	13	11	22
Інші	12	19	19	15	12	13
Всього	47	45	47	41	51	53

Ожеледно-вітрова аварія 27-28 листопада 2000 року стала найбільшою природною катастрофою для енергосистеми України, що вивела з ладу кількість опор, що у багато разів перевищила пошкодження під час усіх попередніх і наступних аварій. Внаслідок дії стихії були ушкоджені лінії надвисокої, так на ПЛЕ «Вінниця-Чорнобиль» 750 кВ були обірвані проводи, що призвело аварійної зупинки реактора 3-го блоку Чорнобильської АЕС [12]. Але найбільше технологічних порушень було зафіксовано в роботі повітряних ліній розподільних електромереж. Під час цієї ожеледно-вітрової аварії на території 6-ти енергопостачальних компаній було ушкоджено 727 (4,5 %) опор ПЛ 35 кВ, у результаті 4,5 тис. населених пунктів залишились без електропостачання.

Вагому величину від 23,5% до 42,2% (табл. 1.6) мають інші причини. Це причини ушкоджень які не були класифіковані, до їх складу також можуть входити ушкодження від несприятливих погодних умов.

У результаті проведеного аналізу стану електричних мереж 35 кВ встановлено, що:

- терміновою залишається потреба в реконструкції та заміні повітряних ліній передавальних електромереж, так строк експлуатації 61% ПЛ 35 кВ становить більше 40-ка років;

- повітряні лінії 35 кВ розподільних електромереж мають потік відмов, що перевищує проектні значення в 1,29 - 2,1 разів;

- внаслідок дії несприятливих погодних умов у різні роки виникло від 21% до 55% відмов I і II категорій. Старіння конструкцій та обладнання настає значно швидше, ніж виконується їх заміна під час реконструкції та капітального ремонту. На сьогодні ця обставина є однією із головних проблем експлуатації електричних мереж [2, 5].

Таким чином, перед електропередавальними компаніями постає дві суперечливі задачі: захист ПЛ від впливу наднормативних ожеледно-вітрових навантажень і подовження їх строку експлуатації при мінімальних витратах коштів. Розв'язати їх можливо шляхом застосування спеціальних методів та засобів підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній у ожеледний період.

1.2 Огляд методів і засобів підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній в ожеледний період

Методи захисту повітряних ліній за фізичними принципами, що використовуються для їх захисту від дії несприятливих кліматичних умов у ожеледний період можуть бути розділені на: активні, пасивні та комбіновані. До активних відносяться ті методи, застосування яких не пов'язане зі зміною конструкції елементів ПЛ, пасивні, навпаки, базуються на зміні їх конструкції, а комбіновані – поєднують у собі елементи обох методів.

Найбільш поширеними та дослідженими серед активних методів є тепловий і механічний.

Тепловий метод (плавка ожеледі) полягає в підвищенні температури проводу до величини при якій неможливе утворення ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ) або відбувається його руйнування. Підвищення температури проводу досягається двома шляхами:

- збільшенням струму навантаження ПЛ (проведення режимних заходів);
- створенням струмів штучного короткого замикання (КЗ).

Головними недоліками цього методу є:

- необхідність роботи обладнання електромереж у режимах близьких до аварійних, при тому, що його рівень зносу складає до 67%;
- при збиранні вручну схем плавки ожеледі витрачається велика кількість часу, тому необхідна значна кількість людських ресурсів, а плавка часто буває запізнілою, і як наслідок, безуспішною. Цей недолік можливо виправити шляхом автоматизації основних операцій технологічного процесу плавки ожеледі;
- залежність тривалості плавки від метеопараметрів. При інтенсивному ожеледоутворенні, що одночасно охоплює територію декількох районів і супроводжується сильним вітром, необхідно проводити плавки на одних і тих же ПЛ декілька разів і одночасно. У цих випадках ефективність плавки ОПВ різко знижується і, тому відбуваються масові ушкодження і відключення ПЛ [13];

- висока енергоємність методу, наприклад, для проведення плавки ожеледі на ПЛЕ 10 кВ необхідна потужність джерела живлення складає від $0,06 \text{ МВ} \cdot \text{А/км}$ до $0,54 \text{ МВ} \cdot \text{А/км}$ [14], а процес плавлення ожеледі триває 0,5-1 год;

- проведення ефективних плавок ОПВ не можливе, без інформаційних систем моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення [13]. Однак, це призводить до збільшення вартості та складності метода.

Механічний метод (активний) полягає у тому, що при деформації проводу або прикладенню сили до самого ОПВ, відбувається його руйнування. У порівнянні з тепловими методами для механічного потрібно в 100 тис. разів менше електричної енергії.

Цей метод, був одним з найперших, серед методів боротьби з ОПВ і початково полягав у тому, що люди оббивали з проводів ожеледь довгими жердинами. На сьогодні отримали розвиток два підходи механічного руйнування ожеледі: за допомогою фрез [15] та збудження коливальних хвиль у проводі [16].

Перший підвид методу реалізується за допомогою дистанційно керованих, роботизованих пристроїв, що можуть переміщуватися по проводу із прогону в прогін ПЛЕ і кареткою високої міцності руйнувати ожеледну муфту (рис. 1.7)

Другий підхід полягає створенні механічних коливань проводу внаслідок яких руйнується ожеледна муфта і може бути реалізованим, наприклад, шляхом пропускання змінного струму або імпульсів струму з частотою близькою до механічного резонансу, і амплітудою, що є достатньою для подолання зовнішніх сил внутрішнього тертя.

Головним недоліком активних механічних методів є висока ймовірність пошкодження проводу ПЛ та лінійної арматури. Тому вони не знайшли широкого впровадження в мережах електропостачальних компаній.

Загальним недоліком активних методів як теплових так і механічних, є те, їх впровадження не захищає ПЛ від наднормативних вітрових навантажень.

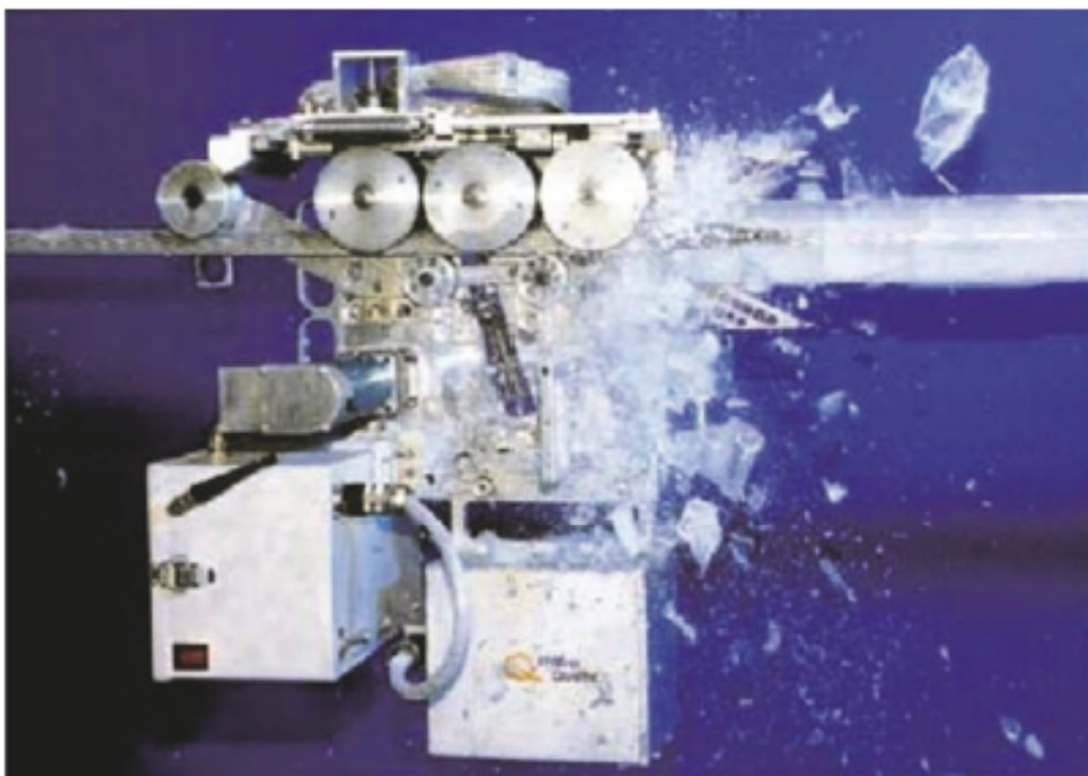


Рисунок 1.5 – Прототип ROV видаляча ожеледі [15]

Пасивні методи базуються на удосконаленні конструкції повітряних ліній електропередавання шляхом встановлення на їх елементах додаткових засобів захисту або створення захисних покриттів та оболонок, яким для роботи не потрібні додаткові джерела живлення і, в свою чергу, поділяються на такі: механічний, хімічний, оболонковий (рис. 1.8). Далі розглядаються лише ті методи, які можуть бути застосовані для ПЛЕ, що знаходяться в експлуатації

Механічний метод базується на використанні таких природних сил як гравітація, вітер, зміна температури повітря. Він особливо ефективний проти мокрого снігу.

Добре відомий метод збільшення крутильної жорсткості проводу за допомогою противаг або баластів, які обмежують утворення циліндричних відкладень мокрого снігу на ньому [17-19]. Проведені чисельне моделювання та експериментальні дослідження показали, що противаги також можуть ефективно зменшувати ожеледні навантаження та прискорювати проплавлення ожеледної муфти під час відлиги.

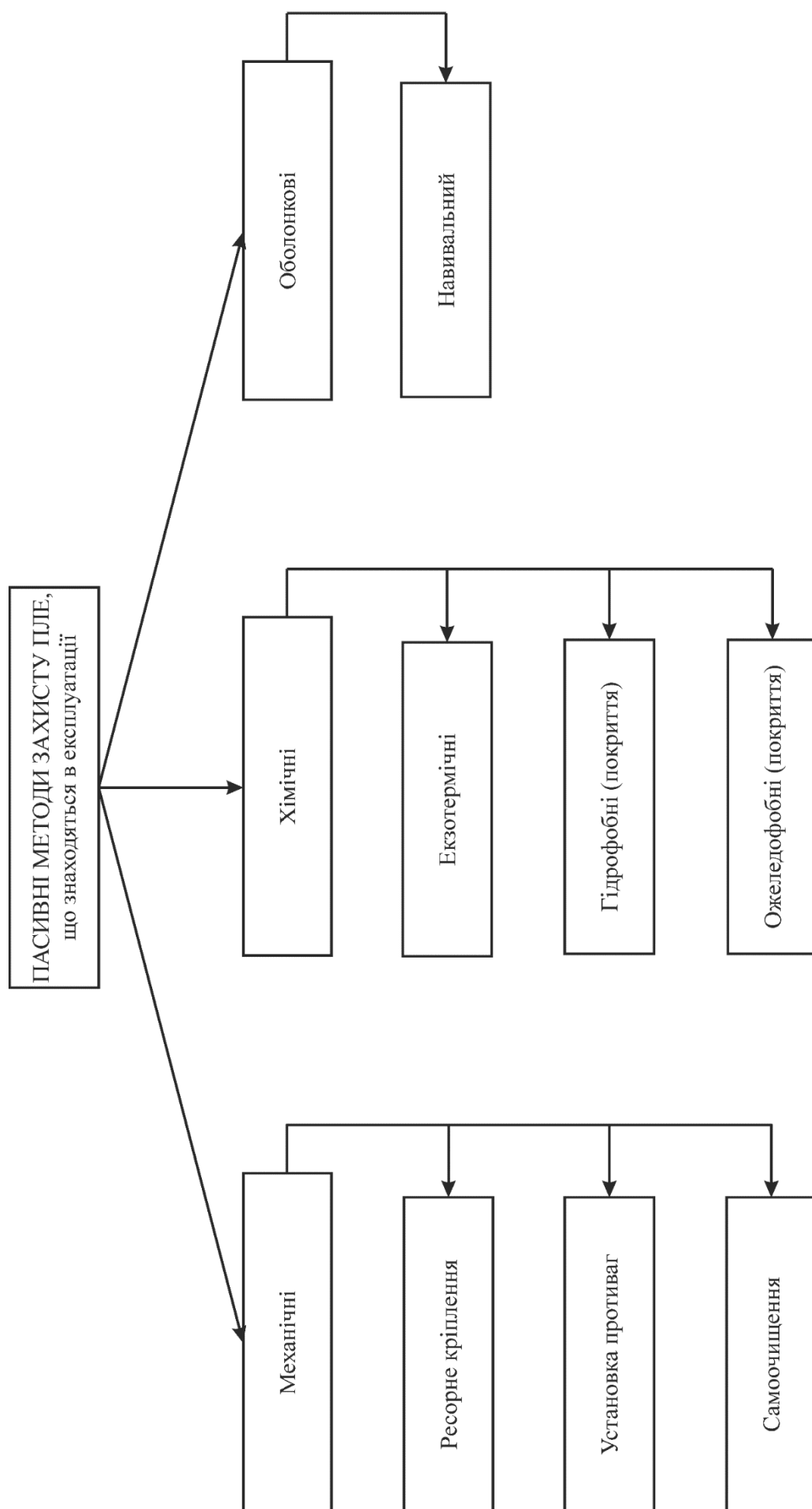


Рисунок 1.8 – Класифікація методів підвищення стійкості ПЛІ до несприятливих кліматичних факторів

Метод полягає у наступному. На початковій стадії утворення ОПВ на проводі з'являється одностороннє їх відкладення (рис. 1.9, а). З розвитком процесу, маса одностороннього відкладення збільшується і починає повертати провід, однак цей крутий момент переборює противага. У результаті на проводі формується видовжене ожеледно-паморозеве відкладення яке з часом відпадає під дією власної ваги та дії вітру (рис. 1.9, б). За відсутності протиожеледного баласту, провід весь час повертається і на ньому формується ожеледна муфта (рис. 1.9, в), що міцно тримається і може бути зруйнована лише одним із активних методів захисту.

Застосування противаг також знижує ймовірність появи галопування проводів, при скиданні ожеледно-паморозевих відкладень .

Загальний вигляд протиожеледного баласту та установка його на проводі повітряної лінії приведено на рис. 1.10.

При збільшенні діаметру проводів необхідно збільшувати масу противаг, як наслідок повітряна лінія піддається впливу додаткових механічних навантажень.

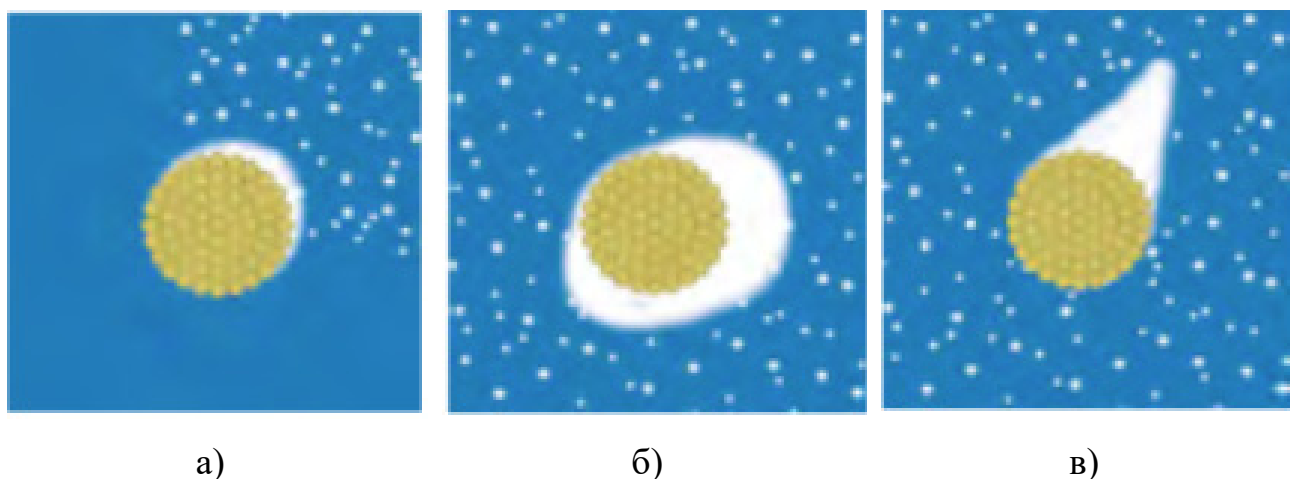


Рисунок 1.9 – Стадії утворення ОПВ на проводі ПЛ [19]:

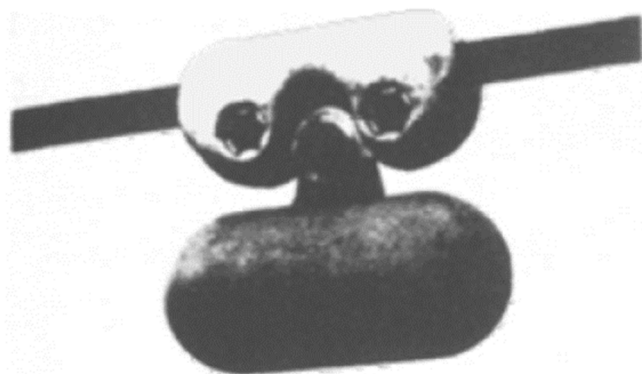
а) початкова;

б) тривале утворення ОПВ на проводі без захисту;

в) тривале утворення ОПВ на проводі з баластом



а)



б)

Рисунок 1.10 – Ожеледні баласти:

а) загальний вигляд баласту типу SA (SICAME) [19];

б) встановлений на проводі ПЛ [17].

Ще одним ефективним методом захисту проводів від мокрого снігу є встановлення на них кільця (рис. 1.11). Зазвичай сніг накопичується на верхній частині проводу, а потім зісковзує на плівці води паралельно до повивів дротин у нижню частину, якщо на його шляху встановити кільце, то воно зменшить поверхневий натяг води й сніг відпаде від проводу [20]. Таким чином відбувається самоочищення проводу. Нажаль при утворенні ожеледних відкладень високої щільності даний метод виявляється малоефективним.

Всі повітряні лінії Японії (за виключенням о. Окінава) неізольовані проводи, захищенні від відкладання мокрого снігу комбінацією розглянутих методів – на них встановлені кільця та баласти.

У тих регіонах де ожеледно-паморозеві відкладення не досягають критичних значень і не призводять до обривів проводів, вітер викликає їх зближення доцільно встановлювати всередині прогонів між проводами різних фаз електроізоляційні розпірки.

Хімічний метод полягає у нанесенні на провід хімічних сполук, що вступають з водою у екзотермічну реакцію або зменшують адгезію її крапель.

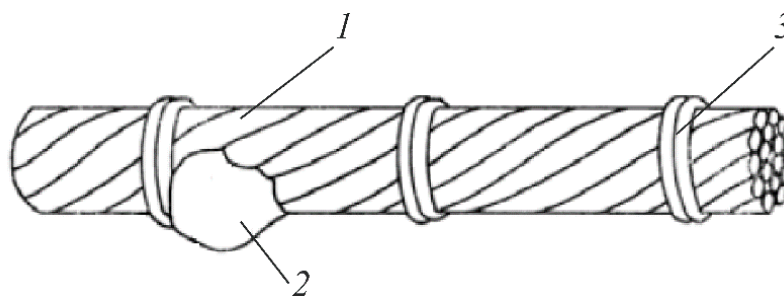


Рисунок 1.11 – Провід ПЛ зі захисними кільцями:

- 1 – провід;
- 2 – ожеледно-паморозеве відкладення;
- 3 – захисне кільце.

Відомі універсальні багатокомпонентні суміші на основі лужних і лужноземельних металів або їх солей, що вступають у хімічну реакцію з ОПВ [21, 22]. При взаємодії краплин води з нанесеним шаром протиожеледного покриття на поверхні проводу відбувається екзотермічна реакція з інтенсивним виділенням тепла, яке заважає обмерзанню. Головним напрямом удосконалення цих сумішей є збільшення кількості робочих циклів захисного покриття та досягнення екологічної безпеки [25].

Рідини на основі тетраетоксиліну або поліетиленгидроксилоксану зменшують адгезію крапель води [22, 23]. Таке покриття зменшує зусилля, необхідне для відриву льоду від матеріалу до $0,08 \text{ кГс/см}^2$ і витримує при застосуванні до 17 циклів заморожування. До цієї ж групи сполук відносяться гідрофобні мастила. Однак, крапля переохолодженої води попадаючи на плівку мастила, скочується і майже миттєво замерзає, при цьому утворюються бурульки [24]. Тому це покриття не може надійно захистити провід від ожеледі.

Хімічні методи запобігання утворенню ожеледно-паморозевих відкладень на лініях електропередачі не знайшли широкого застосування оскільки не забезпечують повного захисту проводу. Для нанесення покриттів у польових умовах необхідне спеціальне обладнання, а хімічні речовини екзотермічної дії швидко витрачаються у результаті реакції, мають короткий термін служби, а їх ефективність також зменшується внаслідок взаємодії із природними або техногенними забруднювачами.

Оболонкові методи заключаються в створенні на проводі ПЛ оболонки яка має ожеледифобні властивості або використовує природні сили для його самоочищення.

Різновидом оболонкового методу є навивальний, який полягає у спіральному навиванні на поверхні проводу стрічки, що виконує захисну функцію.

На рис. 1.12 наведено спосіб захисту проводу ПЛ від ОПВ, ріст яких відбувається у рідкій фазі [25]. У цьому випадку ожеледно-паморозеві відкладення з точки осідання будуть зісковзувати по спіральних канавках між дротинами верхнього повиву в нижню частину проводу. Якщо захисна стрічка буде навита перпендикулярно до дротин верхнього повиву то ОПВ при своєму русі буде зчищатися з проводу. Тобто цей метод базується на тому ж самому фізичному принципі, що і метод кілець і має ті ж самі недоліки.

У праці [26] представлені якісні результати серії експериментів з дослідження обледеніння тросу С-70 покритого фторопластовою стрічкою товщиною 0,1 мм. На основі візуального спостереження за контрольним і модифікованим зразками тросу встановлено, що кількість ОПВ на захищеному тросі зменшується із-за слабкої адгезії з фторопластовим покриттям, а його незначні відкладення відпадають під час коливання тросу від вітру. На базі цих позитивних результатів, автори дійшли висновку, що товщина фторопластового покриття має збільшена до 0,2 мм, а також мають бути враховані деякі фізичні особливості фторопласту, як відсутність рідкого агрегатного стану.

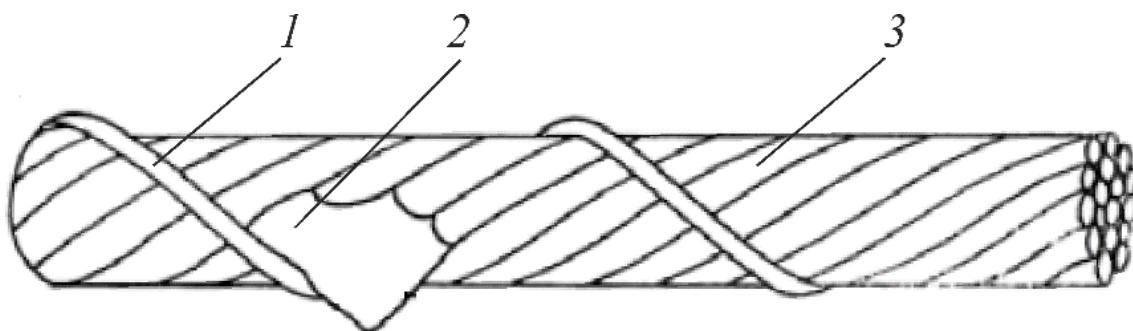


Рисунок 1.12 – Навивальний метод захисту проводу:

- 1 – навита захисна стрічка;
- 2 – ожеледно-паморозеве відкладення;
- 3 – провід.

Перевагою запропонованого рішення є низька вартість технічної реалізації та можливість використання на ПЛ, що знаходяться в експлуатації.

Недоліком є низька надійність сформованого захисного шару проводів. Так, ушкодження лише одного витка фторопластової стрічки, без клейкої основи, призведе до її розмотування з проводу вздовж всього прогону ПЛЕ й таким чином, до зниження надійності її роботи.

У патенті [27] запропоновано спосіб створення протиожиледної, герметичної оболонки на неізольованих проводах та грозозахисних тросах ПЛЕ шляхом спірального намотування на них багатошарової стрічки з низькою адгезією. У процесі формуванні захисного покриття вона приклеюється до поверхні проводів і грозозахисних тросів під натягом та з нахлистом, у місці найбільшої концентрації ожеледно-паморозевих відкладень у прогонах повітряної лінії. Міцне кріплення захисної стрічки до поверхні проводу під натягом не дає змоги їй розмотуватися при локальних ушкодженнях.

Будову стрічки зображено на рис. 1.13. вона має електропровідну, світлостабілізовану, армовану основу 2, на яку нанесені нижній адгезійний шар 3 і верхній – ожеледофобний 1, що зміщений від її бічного пругу проти напрямку намотування на ширину нахлисту. Створення вологонепроникної оболонки проводу забезпечує також його антикорозійний захист від агресивних речовин, що знаходяться у навколишньому середовищі. Загальний вигляд проводу АС-50/8 з нанесеним на його поверхню захисним покриттям подано на рис. 1.14.

Головною перевагою даного способу є технічна можливість, за наявності спеціального обладнання, застосування його в польових умовах для ПЛЕ, що знаходяться в експлуатації, а недоліком – відсутність кількісної оцінки покращених характеристик проводу з покриттям.

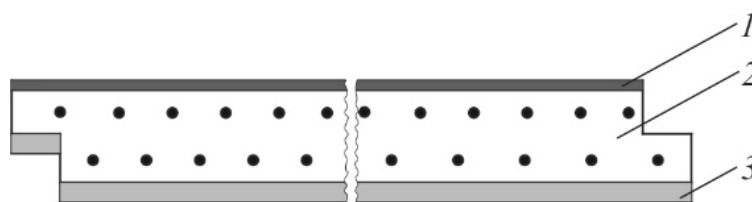


Рисунок 1.13 – Переріз захисної стрічки

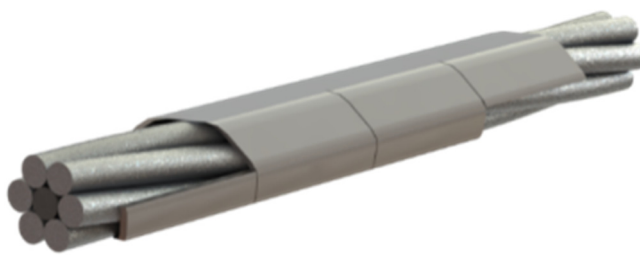


Рисунок 1.14 – Ділянка проводу АС-50/8 із захисним покриттям [28, 29]

Також у [27] не вказано вид матеріалів, що можуть бути використані для створення захисної оболонки проводу ПЛЕ.

Проведений аналіз методів підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній у ожеледний період виявив, що активні методи захисту, зокрема тепловий, не зважаючи на свої переваги малопридатні для ПЛ із тривалим строком експлуатації.

Серед пасивних методів, існуючі механічні та хімічні теж є малопридатними для широкого впровадження в електричних мережах. Механічні методи в більшості випадків виявляються ефективними проти налипання мокрого снігу. Хімічні методи потребують щорічного виконання трудомісткої операції нанесення реагенту на провід, проте реагент швидко витрачається, а провід виявляється не захищеним.

Отже, для повітряних ліній 35 кВ, що знаходяться в експлуатації найбільш перспективними є оболонкові методи.

1.3 Вибір задач дослідження та методика їх виконання

Кваліфікаційна робота націлена на вирішення завдання дослідження, що полягає в розробленні технічних рекомендацій щодо вдосконалення проводу ПЛ 35 кВ, яка знаходиться в експлуатації, що забезпечить підвищення її експлуатаційної стійкості в ожеледний період.

Для реалізації завдання досліджень необхідно вирішити наступні локальні завдання:

- провести аналіз стану ПЛ 35 кВ;

- теоретично обґрунтувати метод вдосконалення конструкції проводу ПЛ 35 кВ, що знаходиться в експлуатації;
- провести порівняльний аналіз ефективності запропонованих технічних рішень;
- розробити заходи з техніки безпеки та охорони праці під час експлуатації повітряних ліній 35 кВ;

Для вирішення локальних завдань поставленого загального завдання дослідження було виокремлено 4-ри етапи.

Кожному з цих етапів притаманні свої методи досліджень. Розглянемо кожний етап вирішення завдання підвищення експлуатаційної надійності ПЛ 35 кВ в ожеледний період.

Послідовність вирішення локальних завдань загального завдання дослідження представлена у вигляді блок-схеми на рис. 1.15.

Згідно блок-схеми на 1-му етапі аналіз питання сучасного стану повітряних ліній 35 кВ, а також огляд методів та технічних засобів підвищення їх експлуатаційної стійкості в ожеледний період. На даному етапі використовуються теоретичні методи досліджень: метод систематизації, метод наукового узагальнення.

На 2-му етапі дослідження на основі виявлених недоліків методів та засобів захисту повітряних ліній від несприятливих кліматичних факторів в ожеледний період проводиться обґрунтування оболонкового методу вдосконалення проводів, що знаходяться в експлуатації та розробка технічних рекомендацій щодо їх реконструкції проводів. При вирішенні цього завдання використовуються методи теоретичних досліджень: теорії термодинаміки, теорії фізико-хімічних процесів.

З метою перевірки правильності результатів теоретичних досліджень та попередньо прийнятих рішень на третьому етапі проводиться комп'ютерне моделювання удосконаленого проводу ПЛ 35 кВ. На основі отриманих результатів виконується порівняльний аналіз механічних навантажень на стандартний і удосконалений проводи, проводиться оцінка очікуваного підвищення параметрів надійності функціонування повітряних ліній за рахунок удосконалення проводу.

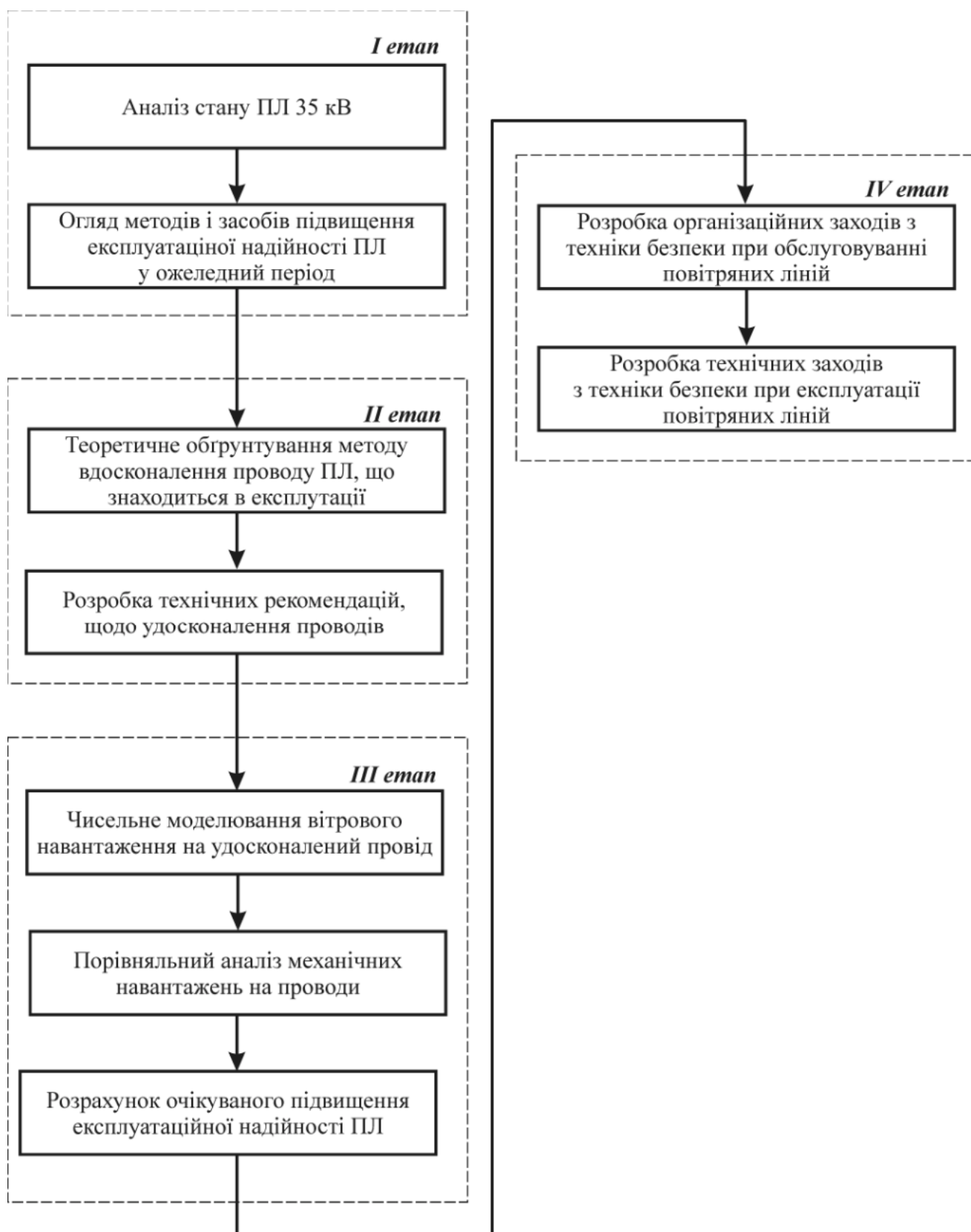


Рисунок 1.15 – Етапи розв’язання задачі загального дослідження

На цьому етапі дослідження використовуються методи твердотілого моделювання, математичні методи обчислювального експерименту в задачах гідродинаміки, теорії надійності.

На 4-му етапі з проводиться розробка організаційних та технічних заходів з охорони праці при експлуатації повітряних ліній електропередавання. Для вирішення задачі четвертого етапу застосовуються метод аналізу та методи теорії електричних кіл.

1.4 Висновки

1. Встановлено, що 61% повітряних ліній системи передачі практично вичерпали свій експлуатаційний ресурс, а системи розподілу мають параметр потоку відмов, що перевищує проектні значення в 1,29 - 2,1 разів.

2. Виявлено, що пасивні методи захисту повітряних ліній від ожеледно-паморозевих відкладень мають ряд суттєвих переваг над активними, серед них на найбільшу увагу заслуговують оболонкові, але ці технології знаходяться в початковій фазі розвитку і потребують проведення наукових досліджень, спрямованих на удосконалення цих методів.

3. Поставлено задачі, щодо розроблення технічних рекомендацій вдосконалення проводу повітряних ліній 35 кВ, які знаходяться в експлуатації. Це забезпечить підвищення їх експлуатаційної надійності в ожеледний період.

РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІІ ПРОВОДУ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

У попередньому розділі були розглянуті активні та пасивні методи захисту проводів повітряних ліній від ОПВ. Було встановлено, що оболонкові методи є більш привабливими, ніж будь-який активний метод, оскільки вони не потребують регулярного обслуговування і додаткової витрати електроенергії. Нажаль ідеальних ожеледофобних покриттів ще не винайшли, а експерименти підтверджують, що атмосферний лід у кінцевому підсумку прилипає практично до всіх матеріалів. Тому необхідно розглянути механізми гідро- ожеледофобності та провести аналіз матеріалів, що мають найкращі ожеледофобні властивості і розробити технічні рекомендації щодо їх нанесення на провід повітряних ліній.

2.1 Теоретичні основи механізмів гідро- ожеледофобності поверхонь

Гідрофобність та ожеледофобність – дві важливі функціональні характеристики, що необхідні для аналізу та розробки покриттів для захисту обладнання електромереж від обмерзання та забруднення.

Концепція змочування вивчає фізичну поведінку рідини при контакті з твердою поверхнею і надає можливість визначити, наскільки добре рідина прилипає до поверхні. Вона також описує деякі інші пов'язані ефекти, наприклад, капілярний. Явище змочування є результатом молекулярних взаємодій на межі розділу «рідина – тверда речовина». Ступінь змочування визначається балансом адгезійних та когезійних сил зчеплення.

Адгезія – це зчеплення між приведеними в контакт поверхнями різними за своєю природою, наприклад, вода та алюміній. Адгезія зумовлена міжмолекулярними взаємодіями (Ван-дер-Вальсовими, полярними).

Когезія – це зчеплення між частинками одного роду, тобто однієї речовини під дією сили тяжіння. Когезія характеризує міцність речовин.

Сили адгезії, що виникають між рідиною й твердим тілом породжують розтікання краплі рідини, в той час як сили когезії всередині рідини змушують краплі води утримувати кулеподібну форму, тобто уникати контакту з поверхнею. Ступінь змочування твердої поверхні будь-якою рідиною характеризується змочуваністю.

Змочуваність – це явище взаємодії між поверхнею мінеральної частинки та молекулою води внаслідок впливу нерівноважних сил молекулярного притягання, що виникають на поверхні мінеральної частинки. Якщо поверхня має високу змочуваність то вона вважається гідрофільною, якщо ж низьку – то гідрофобною. Змочуваність поверхні залежить від двох важливих факторів:

- вільної поверхневої енергії;
- шорсткості поверхні.

Поверхнева енергія – це енергія, що необхідна на виконання роботи зі збільшення площі поверхні. Значення поверхневої енергії є одним з найбільш важливих факторів, що визначають змочувані властивості поверхні. При великому запасі вільної поверхневої енергії поверхня матеріалу добре змочується водою (більшість металів, скло, кераміка), тобто ці матеріали мають гідрофільні властивості. З іншого боку, матеріали з низькою поверхневою енергією, наприклад, деякі полімери є гідрофобними (див. табл. 2.1.)

Таблиця 2.1 – Поверхнева вільна енергія різних субстратів [30]

Субстрат	G , мН/м
PFTE (тефлон)	20
PDMS (диметилсилоксан)	22
Полістирол	33
Нейлон 6,6	46
Мідь	60
Рідка вода	72
Алюміній	>100

Згідно теорії, кут контакту на гладкій поверхні не може перевищувати 120° . Це означає, що хімічний склад поверхні або поверхнева енергія можуть сприяти водовідштовхуванню лише до певної міри. Однак, ще одним важливим параметром є шорсткість поверхні, який може додатково збільшити кут контакту з водою, теоретично до 180° .

Шорсткість поверхні – це чисельна характеристика нерівностей, що визначає ступінь їхнього відхилення на базовій довжині від ідеально гладких поверхонь заданої геометричної форми.

Шорсткість поверхні значно змінює її змочуваність рідинами за рахунок капілярної структури підложки.

Незалежно від ступеня змочування, крапля рідини на твердій, жорстко зафіксованій горизонтальній поверхні набуває форму грубо усіченої сфери. Кут утворений усіченим краєм сфери, називається або крайовим кутом змочування (кутом контакту) θ_c і є кількісною характеристикою змочуваності. Визначення кута контакту θ_c подано на рис. 2.1. Це кут, під яким поверхня розділу «рідина-повітря» стикається з поверхню розділу «тверде тіло-рідина». Для ідеально гладкої та твердої поверхні кут контакту θ_c – це кут, який утворюється поверхнею розділу 2-х фаз із поверхнею 3-ї фази. Крайовий кут змочуваності θ_c вимірюється в бік рідкої фази (рис. 2.1.).

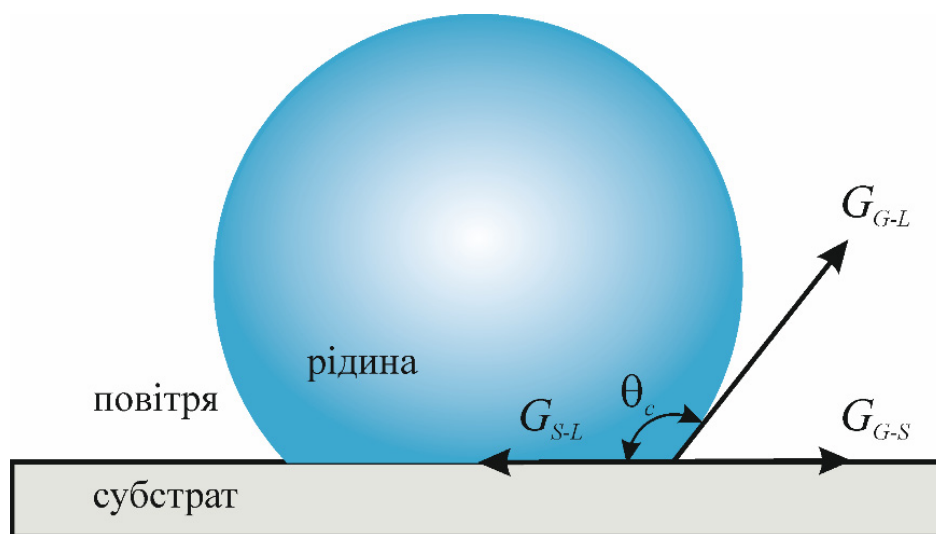


Рисунок 2.1 – Краплина води на твердій, жорстко закріпленій поверхні

Рівноважний крайовий кут змочування обчислюється за законом Юнга

$$\cos \theta_c = \frac{\sigma_{G-S} - \sigma_{S-L}}{\sigma_{G-L}},$$

де σ_{G-S} , σ_{S-L} , σ_{G-L} – поверхневі енергії на межах розділу фаз, відповідно, тіло-газ, рідина-тіло й рідина-газ.

Гідрофільні поверхні мають малі крайові кути змочування і тому добре змочуються водою. У разі повного змочування кут контакту стає нульовим, що фізично означає, що краплина повністю розтікається на поверхні. Таку поверхню іноді називають надгідрофільною.

Хоча статичне вимірювання кута змочування є важливим інструментом для вивчення поведінки змочування поверхні, було висунуто припущення, що для кращої оцінки змочуваності та оцінки характеристик ожеледодобності також слід вивчати динамічну поведінку змочування. Існує два різні кути змочування, що характеризують динамічну поведінку змочування поверхні: натікаючий кут змочування та відтікаючий кут змочування.

Натікаючий кут змочування є максимально стійким кутом, тоді як відтікаючий кут змочування – мінімально стабільний кут. Ці два різних кути існують завдяки безлічі різних термодинамічно стабільних кутів змочування на неідеальному твердому тілі. Ці термодинамічно не стійкі кути змочування відомі як метастабільні стани. Іншими словами, статичний кут змочування може бути будь-яким числом між θ_{adv} і θ_{rec} (рис. 2.2). Різниця між θ_{adv} та θ_{rec} визначає гістерезис кута змочування:

$$\theta_{c.h} = \theta_{adv} - \theta_{rec},$$

де θ_{adv} – натікаючий кут змочування;

θ_{rec} – відтікаючий кут змочування.

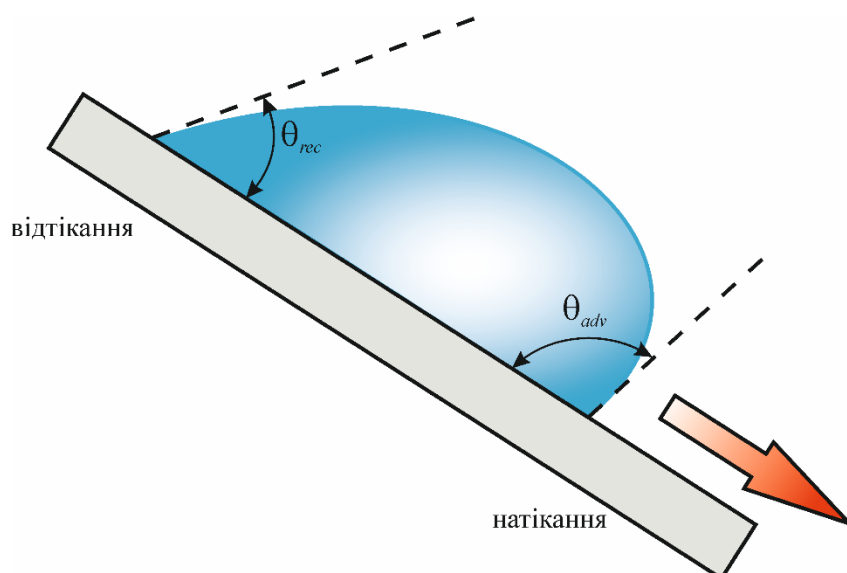


Рисунок 2.2 – Гістерезис кутів змочування

На відміну від ідеальних поверхонь, реальні поверхні не мають ідеальної гладкості, жорсткості або хімічної однорідності. Тому для опису поведінки змочування реальних, шорстких поверхонь, найбільшого розповсюдження отримали дві моделі: Венцеля [31] та Кассі-Бакстера [32].

Згідно моделі Венцеля змочування поверхні відбувається без урахування повітря, що знаходиться у мікронерівностях субстрату (рис. 2.3, а), а модель Кассі-Бакстера, навпаки, враховує цей фактор (рис. 2.3, б).

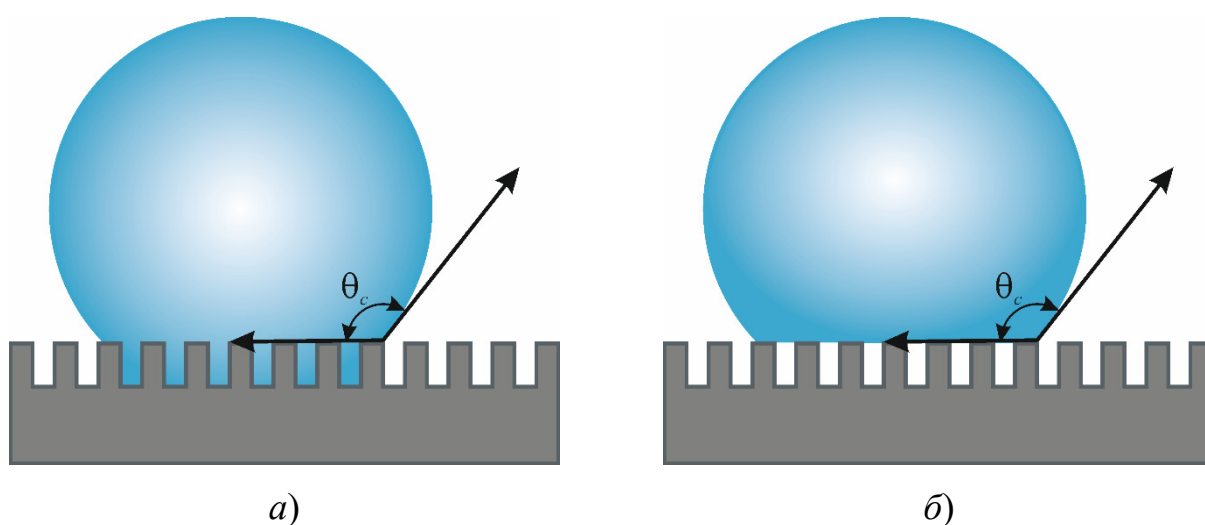


Рисунок 2.3 – Ілюстрація змочування шорстких поверхонь:

а) модель Венцеля;

б) модель Касі-Бакстера.

Реалізація того чи іншого механізму змочування залежить від ряду факторів: поверхневого натягу рідини; поверхневої енергії змочуваного матеріалу, що утворює підложку; температури змочування; швидкості попадання рідини на поверхню субстрату; часу змочування та ін. [33].

Оскільки в моделі Кассі-Бакстера вода не може проникати в мікронерівності поверхні, то повітря потрапляє в пастку між краплею води та субстратом, утворюючи композитне з'єднання «повітря-твердий матеріал», тобто вода контактує з лише з малою частиною поверхні тіла. Використовуючи рівняння Кассі-Бакстера, видимий контактний кут на цій поверхні θ' можливо обчислити відносно кута контакту гладкої поверхні θ :

$$\cos \theta' = f_1 \cos(\theta_1) + f_2 \cos(\theta_2), \quad (2.1)$$

де θ' – кут змочування структурованої поверхні рідиною;

θ_1 – кут змочування аналогічної плоскої поверхні рідиною, град;

θ_2 – кут змочування аналогічної плоскої поверхні рідиною, град;

f_1, f_2 – долі площі взаємодії «тверде тіло – рідина» і «газ – рідина», відповідно.

Оскільки, кут змочування газоподібної фази та рідини складає 180° і виразивши долю площі контакту з газом через долю площі контакту рідини з твердою підложкою отримаємо кінцевий вираз моделі Кассі-Бакстера

$$\cos \theta' = f_1 (1 + \cos \theta_2) - 1.$$

У моделі Венцеля передбачається, що вода може проникати в мікронерівності поверхні, тим самим повністю змочуючи її поверхню. Фактично, вона є частковим випадком моделі Кассі-Бакстера (1):

$$\cos \theta' = r \cos(\theta); \quad (2.2)$$

де r – фактор шорсткості поверхні [33]:

$$r = S_{true} / S_{pr},$$

S_{true} – істинна площа поверхні структури;

S_{pr} – площа проекції структури;

θ – кут змочування аналогічної плоскої поверхні рідиною, град.

Якщо об'єднати рівняння (2.1) та (2.2) можливо отримати математичну модель перехідного режиму змочування між метастабільними станами, які будуть враховувати одночасно як фактор шорсткості так і долю взаємодії «рідина – тверде тіло» [34]

$$\cos \theta' = f_1 r \cos(\theta_1) + f_2 \cos(\theta_2).$$

За будь-якого з цих режимів високий контактний кут не обов'язково означає мобільність крапель і самоочищення. Здатність проливати краплі води залежить від кута ковзання, який визначає нахил поверхні, необхідний для мобілізації краплі на поверхні. Кут ковзання залежить від сили взаємодії між водою та твердим тілом, що може бути далі описано рівнянням Фурміджа:

$$mg \sin(\alpha) = \sigma d (\cos(\theta_r) + \cos(\theta_a)), \quad (2.3)$$

де m – маса краплі води;

g – прискорення вільного падіння;

α – кут ковзання;

σ – поверхневий натяг води;

d – діаметр площі контакту краплі;

θ_a – кут просування;

θ_r – кут відхилення.

У рівнянні (2.3) ліва сторона це сили гравітації, а права – капілярні сили. Із аналізу рівняння (2.3) слідує наступне:

- у режимі Кассі-Бакстера фактична площа контакту «вода – тверда речовина» дуже мала, тому вода погано «чіпляється» до поверхні, тобто поверхня має мале значення кута змочування, а отже, хороші властивості самоочищення;
- у режимі Венцеля фактична площа контакту набагато більша за видиму область, що призводить до гарної фіксації краплі. У цьому режимі поверхня може мати з дуже великі значення кута контакту та кута ковзання, а отже і відсутність самоочищення.

Виходячи з отриманих кількісних понять надгідрофобна поверхня – це поверхня, для якої значення крайового кута змочування становить більше 150° , а його гістерезис – менше 5° . Аналогічним чином за значенням крайового кута змочування можливо класифікувати інші типи поверхонь:

- гідрофільні $\theta < 90^\circ$;
- гідрофобні $90^\circ \leq \theta < 150^\circ$;
- надгідрофобні $150^\circ \leq \theta < 180^\circ$.

Хоча надгідрофобність відрізняється від ожеледофобності між ними була виявлена певна залежність [35-37]. Було доведено, що гістерезис з малим значенням кута змочування є визначальним критерієм ожеледофобності. Поверхні, що мають мале значення кута змочування демонстрували нижчу адгезію льоду разом із повільнішим замерзанням. Тобто, у режимі змочування Кассі-Бакстера ймовірність появи в субстрату ожеледофобних властивостей вища. Таким чином, ожеледофобність – це здатність твердої поверхні відштовхувати лід або запобігати його утворенню через певну топографічну структуру поверхні [39]. Крім того, льодофобність має на увазі низьку силу зчеплення між льодом і твердою поверхнею. Проте точне термодинамічне визначення ожеледофобності відсутнє у літературі.

Ожеледофобні поверхні відрізняються від інших методів захисту від обледеніння тим, що не потребують спеціальної додаткової обробки чи джерела електроенергії для своєї дії.

Для пояснення ефекту ожеледофобності було висунуто припущення, що надгідрофобна поверхня може зменшити або запобігти накопиченню льоду одним із таких механізмів:

- ефект теплоізоляції. Передачі тепла між краплею та поверхнею значно утруднюється, якщо поверхня має наноструктуровану шорсткість. Іншими словами, мікро / наноструктура на надгідрофобній поверхні діє як ізолюючий шар на межі розділу «тверде тіло – рідина» [36, 37];

- ефект зменшення центрів кристалізації. Для надгідрофобної поверхні площа контакту між поверхнею та краплею води значно менша, тому на такій поверхні значно менше центрів кристалізації. Тобто, менша площа контакту призводить до вищої енергії активації виникнення центрів кристалізації та росту кристалів льоду. Для надгідрофобної поверхні внесок межі розділу «тверде тіло – рідина» у процес замерзання незначний [38]. Більше того, менша площа контакту може призвести до зменшення площі теплообміну між краплею та поверхнею, що згодом уповільнює температуру замерзання [36];

- ефект надрухливості. На відміну від гідрофільних поверхонь, краплі води надзвичайно рухливі на надгідрофобній поверхні й відштовхуються при ударі (рис. 2.4). Час, протягом якого краплина води контактує з поверхнею до відбиття на надгідрофобній поверхні, називається часом відбиття краплі або часом

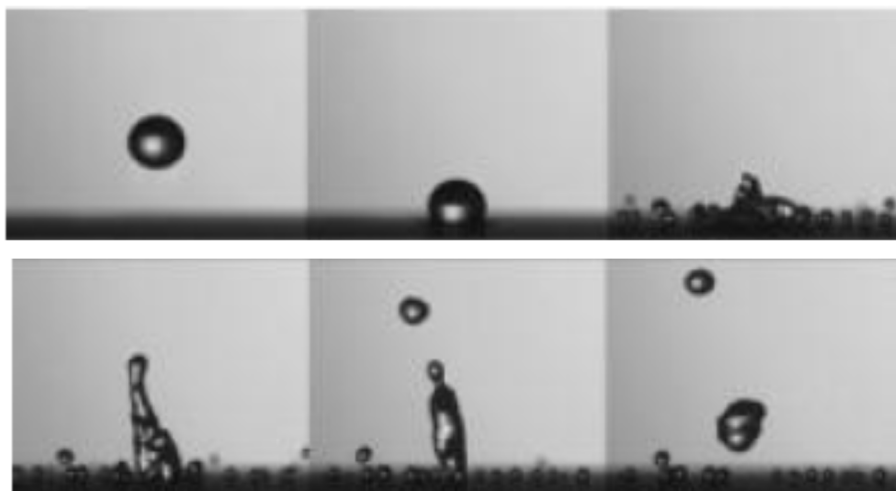


Рисунок 2.4 – Ефект відскакування краплі від надгідрофобної поверхні

проливання. Для надгідрофобної поверхні цей період становить кілька десятків мілісекунд. Якщо час відбиття краплі менший за час, необхідний для появи центрів кристалізації, то слід очікувати, що утворення льоду буде знижене чи попереджене [37, 40].

У цілому, ожеледофобність пов'язана з шорсткістю поверхні, тобто мікронаноструктурованими покриттями. Проте є результати досліджень, згідно яких можливо розробити гладку поверхню на молекулярному рівні, що має гарні ожеледофобні властивості [44]. Ці поверхні, в основному, характеризуються гістерезисом з малим кутом змочування. Відсутність мікро- наношорсткості на поверхні запобігає утворенню паморозі або механічного зчеплення льоду з нею. Більше того, гістерезис з малим кутом змочування повинен збільшити рухливість переохолоджених крапель на поверхні а, отже збільшити затримку обмерзання.

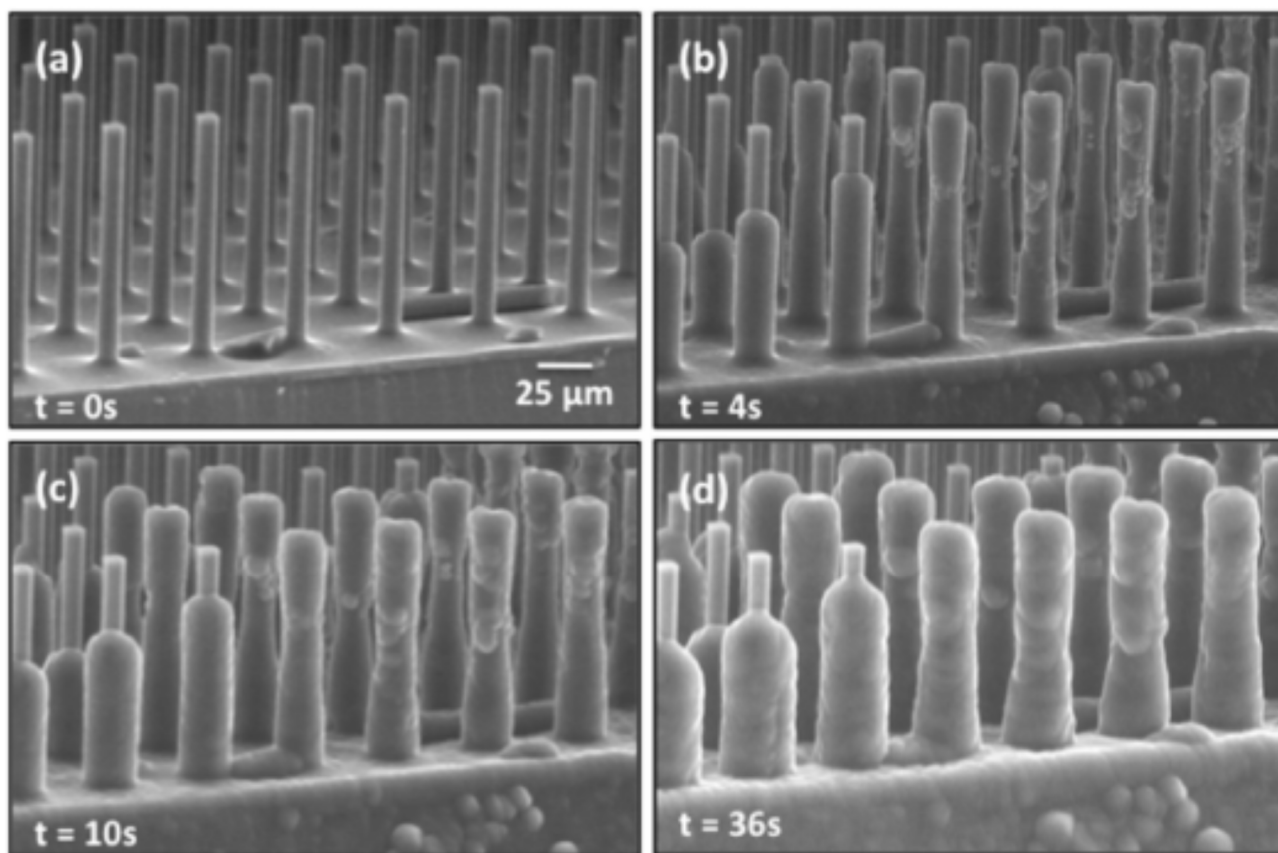


Рисунок 2.5 – Формування інію на мікроструктурах надгідрофобної поверхні впродовж 36 с при 13°C [41].

Небагато досліджень вивчали механізм обмерзання на пористих покриттях. У [37, 38] показано, що накопичення тиску внаслідок розширення води при замерзанні має важливе значення. Якщо повітря потрапляє в структуру поверхні, тиск повітря швидко зростає (рис. 2.5, а). Це підвищення тиску може призвести до виникнення і розповсюдження тріщин у структурі льоду, внаслідок чого він буде відшаровуватися (рис. 2.5, б). Ці результати дозволяють припустити, що хоча шорсткість поверхні може призвести до потенційного зчеплення, а отже, до високої адгезії, ретельно оптимізована шорсткість може знизити обледеніння поверхні.

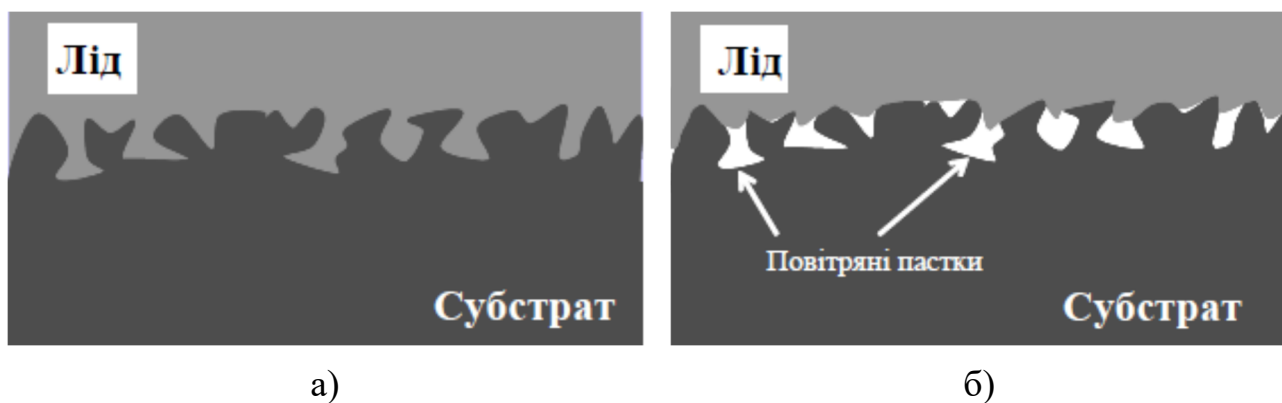


Рисунок 2.5 – Утворення льоду на пористій поверхні [43]

- а) механічне блокування;
- б) низька адгезія внаслідок захвату повітря

Отже, згідно проведених досліджень між гідрофобністю та ожеледофобністю існує кореляційна залежність. Головними кількісними характеристиками ожеледофобного субстрату є:

- низька сила зчеплення між льодом і субстратом, міцність на зсув (максимальна напруга) останнього менше діапазону між 150 кПа і 500 кПа [43];
- здатність запобігати утворенню льоду на поверхні;
- здатність відбивати невеликі краплі, наприклад дощу або туману, при температурі нижче точки замерзання.

2.2 Аналіз сучасних матеріалів, що мають ожеледофобні властивості

На сьогодні не існує ідеальних ожеледофобних покриттів, а емпіричний досвід доводить, що кінці кінців будь-який субстрат буде покритий ожеледно-паморозевим відкладенням, однак, існують цілі групи матеріалів які можуть бути використані в якості захисних покриттів для проводів ПЛЕ. Зусилля більшості вчених направленні на поліпшення їх характеристик шляхом зміни структури матеріалів, а також створення на їх поверхнях вторинних ожеледофобних покриттів.

З урахуванням екстремальних умов у яких повинні працювати покриття проводу до їх властивостей та характеристик були сформульовані наступні вимоги [45]:

- тривалий строк служби (не менше 15 років);
- ефективність (ожеледофобність);
- стійкість до ультрафіолетового випромінювання;
- еластичність при низьких температурах;
- хімічна стійкість та інертність;
- низька маса;
- можливість нанесення на провід, що знаходиться безпосередньо на ПЛЕ;
- відповідність нормам екологічної безпеки;
- низька вартість життєвого циклу

Із існуючих матеріалів, приведеним вимогам найбільше відповідають наступні групи полімерних матеріалів:

- політетрафторетилен (ПТФЕ, комерційна назва тефлон);
- полівінілденфторид (ПВДФ, фторопласт);
- поліуретан;
- силіконовий каучук (силіконова резина)
- металізований ПФТЕ.

Розглянемо кожен групу полімерних матеріалів окремо, з метою вивчення їх характеристик і вибору найкращого матеріалу для поставленої задачі. Зазвичай якість ожеледофобного покриття оцінюється за силою зчеплення з льодом, але

дані, що приведені нижче взяті з різних джерел, тому напряду їх порівнювати не можна.

У праці [46] були досліджені матеріали з політетрафторетилену (ПТФЕ), щоб зрозуміти вплив хімічного складу і шорсткості поверхні на адгезію льоду. У першому дослідженні РТФЕ-покриття були нанесені на алюмінієві підкладки методом розпилення і спікання (температура спікання склала 350-370°C). Найбільший кут змочування 152,8° був зафіксований на одній із спечених поверхонь з ПТФЕ. Субмікронні зернисті структури з зазорами, меншими, ніж середні розміри крапель води, ефективно захоплювали повітря і забезпечували режим Кессі-Бакстера на поверхні ПТФЕ. Однак, тест на адгезію показав, що обидва спечених покриття з ПТФЕ мали високу міцність адгезії до льоду при зсуві (1560 і 1820 кПа для стержня і сферичних частинок). Навпаки, гладкий об'ємний ПТФЕ має найнижчу міцність з'єднання льоду (60 кПа).

В іншому дослідженні [47] покриття отримане зануренням зразків у поліфторіований поліефір (PFPE) дозволило знизити адгезію льоду до голої поверхні алюмінію в 20 разів, а тефлону – в сім разів.

Покриття з фторопласту було нанесено на лопаті вітротурбіни, виготовлені з скловолокнистого композиційного матеріалу, для підвищення ожеледостійкості [48]. Для створення шорсткої структури, NH_4HCO_3 був доданий до ПВДФ. Розміри пор варіювалися від 1 до 5 мкм, а кут контакту з водою склав 156°, за кута ковзання води 2°. Випробування на акрецію льоду, було проведене при температурі -10°C з використанням розприскувача води (діаметр крапель становив 1 мм), що розприскував переохолоджену воду на горизонтально розташовані зразки. У результаті було зафіксоване незначне наростання льоту протягом 50-хв на захищеному зразку, в той час як на контрольному зразку було зібрано близько 40 г льоду.

Фторопласт також можна комбінувати з наночастинками, наприклад, модифікованим епоксидсилоксаном SiO_2 [49], колоїдним кремнеземом [50] з метою створення пористої структури і потенційного збільшення довговічності полімерних покриттів.

Покриття з фторованого акрилату (полідиметилсилоксан) показало зниження адгезії льоду до 300 кПа і збільшену затримку кристалізації льоду (близько 3 хв при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) [51].

Фторполімерні покриття, просочені частинками оксиду та металу, викликали інтерес у дослідників із-за здатності змінювати топологію поверхні. Частинки оксиду і металу, такі як ZrO_2 , Ag і CeO_2 , були змішані з перфторалкілметакріловий полімер [52,] для створення різних покриттів. Отримана морфологія поверхні різних покриттів показана на рис. 2.11.

Випробування на адгезію з льодом проводилися шляхом розпилення крапель переохолодженої води ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2,5\text{ г/м}^3$, швидкість вітру 10 м/с і розмір краплі води 80 мкм) для створення щільного, прозорого льоду. При випробуванні з використанням центрифужного пристрою для дослідження адгезії льоду результати показали, що адгезія до льоду була знижена в 5,7 раз на поверхні, що була модифікована наночастинками Ag [52], в порівнянні з поверхнею без покриття, однак покриття виявилось нестійким.

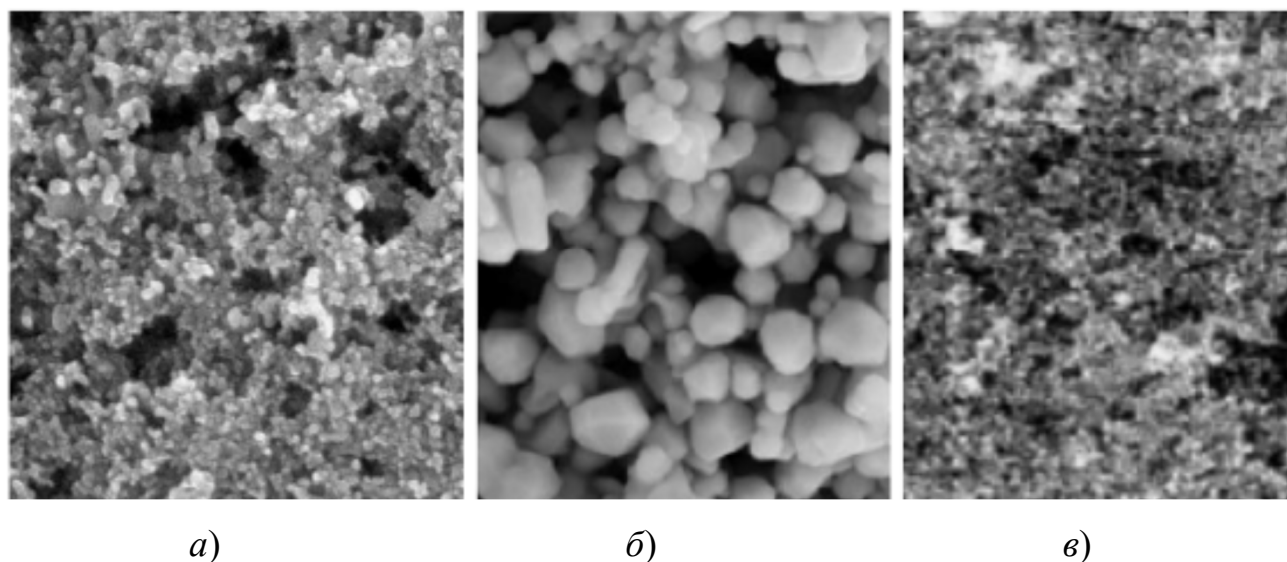


Рисунок 2.11 – Зразки фторполімерних покриттів
з різною топологією поверхні [52]:

- а) з додаванням частинок оксиду ZrO_2 ;
- б) з додаванням наночастинок Ag ;
- в) з додаванням частинок оксиду CeO_2 .

У [26] представлені результати випробування здатності суцільного фторопластового (фторопласт 2) покриття знижувати кількість ожеледно-паморозевих відкладень на сталевому грозотросі і визначення сили зчеплення цих відкладень з поверхнею покриття. Експеримент проводився на новому сталевому тросі марки С-70 довжиною 5 м. Попередньо, поверхня тросу була очищена і знежирена за допомогою бензину і ганчірки. Потім, шляхом повиткового намотування фторопластової плівки марки Ф-4 товщиною 0,1 мм та шириною 50 мм на ньому була створена суцільна захисна оболонка. Процес ожеледоутворення імітувався шляхом штучного розбризкування води на трос з розбризкувача при температурі навколишнього середовища -15°C при швидкості вітру 2-2,8 м/с. У результаті як на незахищеній частині тросу так і на фторопластовому покритті та почали утворюватися ОПВ (рис. 2.12, а, б). Проте, механізми ожеледоутворення були різні.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Початок утворення ОПВ на тросі С-70 [39]:

- а) трос без захисту;
- б) трос з фторопластовим покриттям.

На незахищеній поверхні тросу утворення ОПВ починалось зі суцільного змочування всієї поверхні дротин верхнього повиву тросу, затікання води між ними і, як наслідок, утворення тонкої суцільної ожеледної муфти (рис. 2.12, *а*). При подальшому розбризкуванні води діаметр муфти рівномірно збільшувався.

На захищеній частині тросу спочатку осідали дрібні, поодинокі краплини води які замерзали протягом декількох секунд. При подальшому розпиленні води нові центри ожеледоутворення не з'являлись, але спостерігався ріст більш ранніх крапель до повного злиття між собою (рис. 2.12, *б*). Утворені ОПВ мали низьку силу зчеплення з поверхнею фторопласту і легко відпадали при коливанні тросу.

На рис. 2.13, *а*) та *б*) у нижній частині ОПВ видно крупні замерзлі краплини води, що свідчить про режим мокрого росту відкладень, внаслідок занадто інтенсивного розбризкування води, що в природних умовах зустрічається досить рідко. На фторопластовому покритті утворювалося біле, непрозоре ожеледно-паморозеве відкладення з нижчою густиною ніж на незахищеному тросі.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Кінцеве ожеледно-паморозеве відкладення [26]:

а) на незахищеному тросі;

б) на фторопластовій оболонці.

Аналіз розглянутих класів матеріалів (політетрафторетилену та полівінілденфториду) показав, що вони забезпечують ожеледофобні властивості. Однак, довговічність цих покриттів вимагає подальшого покращення, але навіть при повній втраті ожеледофобних властивостей вони мають силу адгезії льоду значно нижчу ніж звичайний провід повітряної лінії.

Поліксиланові покриття засновані на в'язкопружних силіконах з низьким вмістом T_g . Силікони – це полімери, виготовлені з повторюваних ланок силоксану разом з функціональними складовими, такими як метил, феніл або трифторпропіл. Низька надійність енергетичного зв'язку функціональної групи з силоксановим ланцюгом у поєднанні з низьким модулем потужності дозволяє їм мати ожеледофобні властивості [53].

Оскільки, сила / енергія зв'язку між атомами водню і атомами фтору в три рази вища, ніж у атомах водню з диметилсилоксаном (або вуглеводнями) [54], багато різних гідро- ожеледофобних покриттів були розроблені для використання в'язкопружних полімерних матеріалів на основі диметилсилоксану. Такі покриття показали істотне зменшення адгезії льоду, майже в 100 разів, відносно звичайного алюмінієвого зразка [47]. Зниження адгезії льоду пов'язане, як з низькою поверхневою енергією, так і чудовою еластичністю.

Однак є кілька недоліків, що пов'язані з цими типами в'язкопружних еластомерних покриттів. Їх міцність зчеплення з підкладками, на відміну від кремнезему / скла, гірша оскільки в якості межі розділу потрібна ґрунтовка [55], а стійкість до пилу, піску і льоду в навколишньому середовищі нижча, ніж у інших покриттів. Додавання спеціальних домішок, може зробити його більш зносостійкими, в той же час змінюючи шорсткість поверхні і надгідрофобність. Так було виготовлення покриття на базі суміші тетраетилортосилікату та н-октилтриетоксисилана мало краєвий кут змочування 153° [56].

Полідиметилсілоксанові (PDMS) покриття з додаванням нанокремнезема були розроблені для зменшення накопичення ожеледно-паморозевих відкладен на електроізоляції повітряних ліній електропередавання [57]. Покриття наносилися шляхом розпилення гелю. Було виявлено, що такі покриття з частинками

нанокремнезема діаметром менше 100 нм демонструють чудову здатність відштовхувати краплі води і не дозволяють їм замерзати при контакті з поверхнею [58] завдяки комбінації великого кута змочування води (приблизно 161°) та малого кута стікання води. У результаті швидкість накопичення льоду також знизилася.

Проведений експеримент, з штучного утворення ОПВ на зразках за температури навколишнього середовища -5°C і розбризкуванні крапель переохолодженої води показав, що мало місце незначне відкладення льоду протягом 30 хв. Покращені ожеледофобні властивості були зумовлені як гідрофобністю, так і зниженою адгезією льоду до покриття.

Інші дослідники розробили прозорі надгідрофобні покриття, що поєднують ZnO та SiO_2 з метилфенілсиліконовим в'язким [59]. Імовірно, ерозійна стійкість забезпечується за рахунок включення частинок.

Важливим є те, що при виконанні композитної структури покриття з наночастинками необхідно розуміти, що розміри частинок для супергідрофобних і ожеледофобних покриттів знаходяться в різних розмірних масштабах [58]. Тому вибір добавок необхідно робити з урахуванням бажаних властивостей покриття.

Довготривала стабільність ожеледофобних покриттів на основі силоксану чітко не встановлена. Зразки алюмінію, покриті перфтороктилтриетоксисиланом, зазнали деградації з точки зору його адгезії до льоду і зниження водовідштовхувальних властивостей [52]. Також було експериментально підтверджено, що «мокрі» зразки, які зазнали впливу умов конденсації перед випробуванням на обмерзання, давали значення міцності зчеплення з льодом в три рази більше, ніж сухі. Гідроліз вважається імовірною причиною, за умови тривалого періоду часу контактування покриття з водою або льодом. У іншому дослідженні, хоча спостерігався обмежений гідроліз силоксанових зв'язків, крайовий кут змочування і кут відтікання значно не змінювалися після 100 циклів протягом 250-годинного випробування [60].

Одним з перспективних напрямів створення захисних покриттів є дослідження пористих матеріалів. При такому підході поверхня виконується з

мікроотворами в які потрапляє вода. Завдяки унікальній властивості льоду розширюватись у об'ємі при замерзанні, у цих порах виникає замкнутий простір зі значним тиском повітря, оскільки лід щільно притискається до стінок. З часом, лід почне тріскатись і руйнувати сам себе.

У праці [61] представлені результати дослідження такого ефекту льоду для чотирьох різних покриттів з PDMS, які переконливо свідчать про те, що крихітні бульбашки повітря потрапили між льодом і покриттям, в наслідок чого такі покриття мають більш низьку адгезію до льоду ніж аналогічні, з гладкою поверхнею. Хоча шорсткість поверхні може привести до сильного механічного блокування і тому для високої адгезійної міцності проведені дослідження можуть служити основою для розробки нових матеріалів для покриттів, що мають оптимальну шорсткість, щоб створити достатню внутрішню напругу для розтріскування і, можливо, відколювання льоду. Суттєвою складністю при розробці таких покриттів, є необхідність враховування фактору забруднення пилом з навколишнього середовища.

Новітня і за деякими оцінками [53] найдосконаліша серія ожеледофобних покриттів була розроблена на основі керування густиною поперечних зав'язків і міжфразного мастила. Ці покриття забезпечують рухливість полімерних ланцюгів в еластомірній матриці, створюючи тим самим граничну умову ковзання між льодом і поверхнею покриття. Оскільки напруга зсуву, що викликає ковзання на кордоні розділу, визначається як

$$\tau = \frac{l \cdot f \cdot G}{k \cdot T},$$

де l – довжина;

f – сила, необхідна для відриву одного ланцюга довжиною

G – жорсткість або модуль зсуву в ізотропних умовах;

k – постійна Больцмана;

T – температура.

Автори запропонували два методи зниження адгезії льоду на поверхні полімеру [53]:

- 1) використання полімеру з низькою щільністю поперечних зав'язків;
- 2) поверхневого прослизання додавання мастила, що змішується для забезпечення.

Згідно першого методу, PDMS з низькою щільністю поперечного зшивання зміг досягти низької міцності на зсув, що дорівнює 33 кПа, без додавання оливних матеріалів або наявності текстури / шорсткості (рис. 2.14). При хімічному додаванні міжфазних мастил (таких як силікон, крітокс або олива) в структуру полімеру адгезійна міцність була додатково знижена до 6 кПа. Інші полімерні системи (поліуретан (PU), фторований поліуретан (FPU) і PFPE також продемонстрували аналогічні покращення зі зменшенням щільності поперечних зав'язків, хоча додавання міжфазного мастила справило більший вплив на зниження адгезії до льоду. Крім того, коли ці ожеледофобні покриття піддавалися повторним циклам обмерзання / розтавання, атмосферним впливам на відкритому повітрі, вони незмінно демонстрували гарну довговічність у порівнянні з наявними у продажу покриттями.

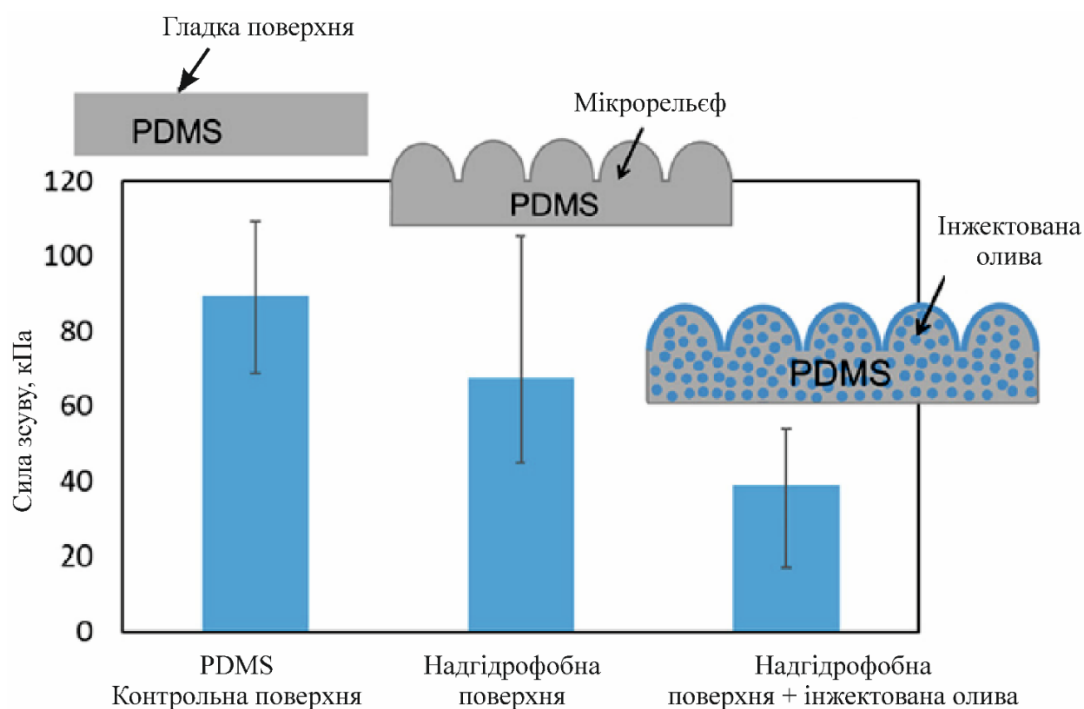


Рисунок 2.14 – Порівняльна характеристика SLIPS матеріалів [62]

Проведений аналіз показав, що для дослідників пріоритетною є розробка гідрофобних та надгідрофобних покриттів, а доступних досліджень ожеледофобних покриттів значно менше. Однак, у значній кількості наукових публікацій про матеріали з гідрофобними властивостями, досить часто проводяться експериментальні дані про ожеледофобні властивості досліджуваного матеріалу. Причинами цього є відсутність розуміння фізики взаємодії льоду і твердого тіла, наявність великої кількості альтернативних методів, наприклад, таких як активні та сумісні (активні і пасивні), складність виготовлення матеріалів, що повинні мати суперечливі характеристики [63]. Надзвичайно важко, якщо взагалі можливо, створити ожеледофобний матеріал, що має нульову адгезію.

Однак, останні досягнення в галузі фізики адгезії, матеріалознавства (наноматеріали, методи осадження, нові полімери і т. п.) дозволили створити матеріали, що мають значно знижену адгезію до льоду. Лід з поверхонь таких матеріалів може бути видалений з використанням мінімальної кількості роботи або тепла або навіть може від'єднатися під власною вагою.

У цілому, полімери на силіконовій основі мають дещо кращі ожеледофобні характеристики ніж полімери на основі ПТФЕ.

2.3 Технічні рекомендації, щодо вибору захисного покриття проводу

З практичної точки зору довговічність покриття, його вартість і простота нанесення також є важливими факторами. Адгезія самого покриття, старіння через корозію (нормальна або прискорена кислотними дощами, повітряно-крапельним забрудненням або близьким присутністю морської води), ультрафіолетове випромінювання, тепловий вплив, знос (наприклад, під час монтажу), а також ерозія / стирання через комбіновані ефекти дощ і вітер є одними з найбільш важливих факторів, які необхідно враховувати.

Щоб зменшити адгезію льоду до проводу повітряної лінії 35 кВ, його поверхня повинна бути покрита матеріалом, здатним на молекулярному або кристалічному рівні руйнувати структуру льоду, що безпосередньо контактує з ним. Для досягнення цієї мети можливо використати кілька підходів:

- використання матеріалів з низькою поверхневою енергією;
- використання матеріалів, що мають гетерогенну поверхню яка сприяє нерівномірного розподілу напружень у льоді, що прилягає до твердого тіла.
- використання матеріалів, що мають з мікроскопічні повітряні кишені на межі розділу між «лід – покриття» для руйнування склеювання шляхом створення концентрацій напружень.

Отже, за результатами дослідження розроблено наступні рекомендації щодо вибору захисного покриття проводу повітряних ліній:

1. У цілому, захисне покриття проводу повинно бути композитним і мати, що найменше три шари: захисний, базовий та клейовий.
2. У якості матеріалу захисного шару доцільно використати силіконовий каучук, або тефлон, чи матеріали на їх основі.
3. Захисний шар покриття повинен мати білий колір або колір світлого тону.
4. Базовий шар виконується армованим, наприклад, із поліпропіленової стрічки, що ущільнена скловолокном.
5. Клейовий шар повинен бути виконаним на основі застигаючого клею для алюмінію з високою початковою адгезією.
6. Композитне покриття повинно бути гнучким та еластичним, при нанесенні на провід приймати та тримати його контур.
7. Захисний шар та основа покриття не повинні підтримувати горіння і мати високу електроізоляційну стійкість.
8. Захисний шар виконаний із силіконового еластомеру чи тефлону може мати додаткове захисне покриття, що має гідро- ожеледодобні властивості.
9. У цілому композитне покриття проводу повинно працювати у широкому діапазоні температур від -40 °C до 140 °C.

2.4 Висновки

1. Встановлено, що головною характеристикою поверхні, що характеризує її гідро- та ожеледодобні властивості є крайовий кут змочування. Між гідрофобністю та ожеледодобністю існує кореляційна залежність.

2. Встановлено, що головними характеристиками ожеледодобної поверхні є: міцність на зсув льоду менше діапазону від 150 кПа до 500 кПа; здатність запобігати утворенню льоду на поверхні; здатність відбивати невеликі краплі води при температурі нижче точки замерзання.

3. З розглянутих покриттів з гідро- ожеледодобними властивостями та зменшеною силою адгезії льоду для захисного шару покриття проводу повітряної лінії найбільш приданими є матеріали на основі силіконового каучуку або тефлону.

4. Розроблено технічні рекомендації щодо вибору захисного покриття проводу повітряної лінії, які дозволять підвищити ефективність оболонкових методів захисту.

РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Нанесення на поверхню проводу будь-якого покриття, навіть з ідеальними гідро- ожеледофобними характеристиками, призведе до зміни його аеродинамічного опору, а отже і до зміни вітрового навантаження на нього та повітряну лінію в цілому. Тому для з'ясування характеру впливу композитного захисного покриття на повітряну лінію електропередавання необхідно дослідити як змінюються аеродинамічні характеристики модифікованого проводу.

3.1 Постановка задачі та основні припущення

У електричних мережах ОЕС України для ПЛ найбільшого розповсюдження отримали проводи марок АС. Вони представляють собою канатоподібну структуру, що складається з одного або декількох шарів дротин спіральсно навитих навколо центрального осердя [64]. У проводів марки АС осердя виконується з однієї або декількох навитих сталейних дротин навколо центральної. Напрямок скручування шарів дротин завжди виконується у різних напрямках (рис. 3.1).

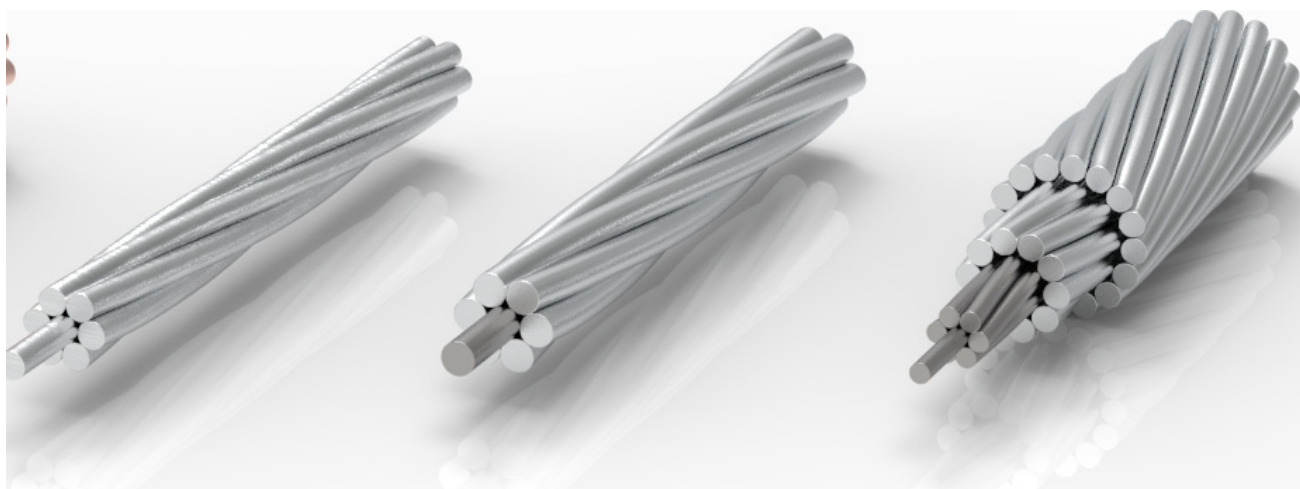


Рисунок 3.1 – Неізолювані проводи марок:

а) А; б), в) АС.

Особливістю проводів цих марок є те, що сусідні дротини всередині одного повиву дотикаються одна до одної в двох діаметрально протилежних точках, у результаті зовнішній контур проводу складається з суми верхніх дуг дротин верхнього повиву (рис. 3.2). При розробці 3D-моделі проводу ця особливість враховується шляхом заміни точок дотику між дугами на відрізки малої, фіксованої довжини.

Оскільки, необхідно досліджувати аеродинамічний профіль проводу, в його 3D-моделі внутрішні повиви дротин та порожнини між ними враховувати не має сенсу, теж саме стосується модернізованого проводу.

Налаштування математичної моделі та її валідація виконуються шляхом визначення аеродинамічних характеристик кругового циліндра й порівняння отриманих результатів з даними, що були визначені на основі фізичних експериментів та приведені у працях [65].

Чисельний експеримент проводиться на прикладі проводу АС-70/11. Для модернізованого проводу АС-70/11 повна товщина захисного композитного покриття прийнята рівною 0,75 мм. Загальний вигляд 3D-моделей всіх зразків поданий на рис 3.3.

Отже, фактично необхідно провести три комп'ютерні експерименти: для кругового циліндра, стандартного проводу марки АС-70/11, модернізованого проводу марки АС-70/11.

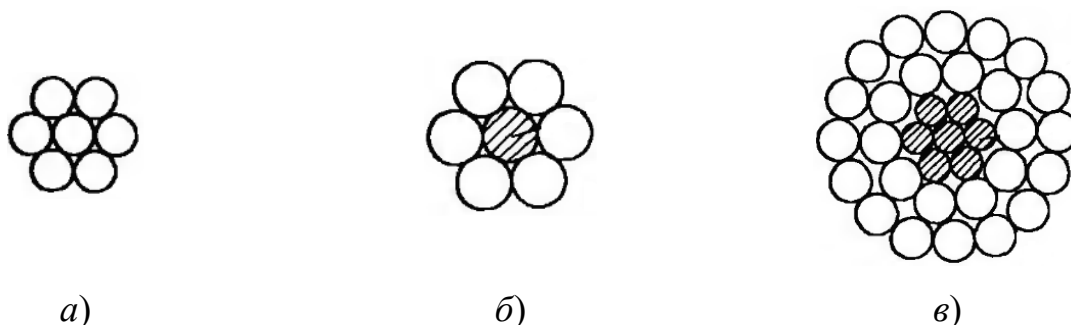


Рисунок 3.2 – Поперечні перерізи проводів марок:

а) А; б), в) АС (заштрихована стальна частина)

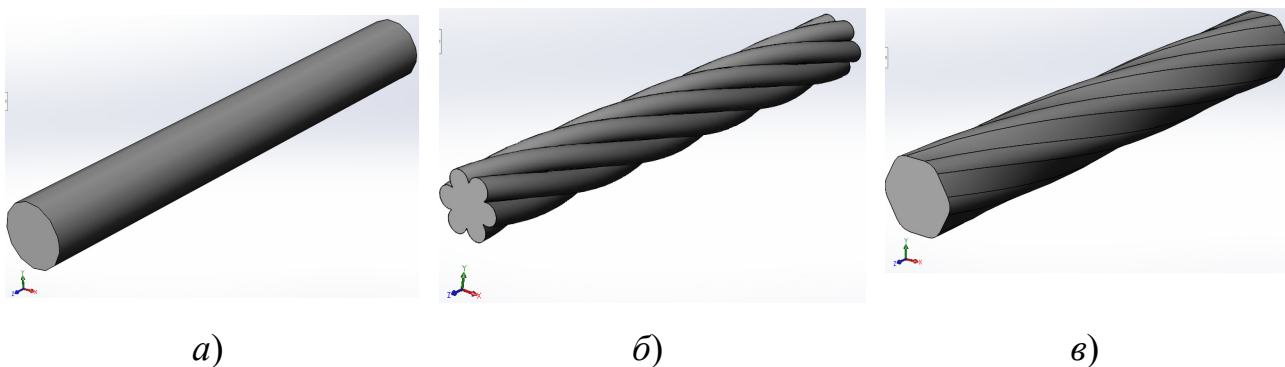


Рисунок 3.3 – 3D-моделі зразків для чисельного експерименту:

- а) кругового циліндру;
- б) реального проводу;
- в) модифікованого проводу.

Постановка задачі. Однорідний повітряний потік зі сталою швидкістю v направлений перпендикулярно до осі досліджуваних зразків, причому швидкість їх обтікання така, що число Маха значно менше одиниці: $M \ll 1$.

Необхідно:

- визначити коефіцієнт аеродинамічного опору кожного досліджуваного зразка (рис. 3.3) при зміні швидкості повітряного потоку від 5 м/с до 35 м/с;
- порівняти отримані значення складової коефіцієнту аеродинамічного опору по осі x для кругового циліндра з даними фізичного експерименту;
- визначити вітрове навантаження, що діє одиницю довжини дослідного зразка.

Припущення. Приймаємо:

- повітря є нестисливою, невагомою, в'язкою рідиною;
- режим текучого середовища – змішаний (ламінальний і турбулентний);
- обтікання зразка симетричне (Ox – вісь симетрії).

При розрахунку вітрового навантаження вважається, що оболонка модифікованого проводу не має стиків, також не враховується вплив довжини прогону повітряної лінії.

3.2 Опис математичної моделі

Для моделювання використано застосунок FlowSimulation програмного комплексу SolidWorks, у якому рух текучого середовища моделюється за допомогою розв'язку системи рівнянь Нав'є-Стокса [66].

З урахуванням зроблених припущень, нестационарний просторовий потік у рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$, що обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через її початок, моделюється за допомогою системи рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії [66]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) &= S_M^P; \\ \frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i + S_{li}^P; \\ \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial p}{\partial \tau} - \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_j v_j + S_H^P + Q_H, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де ρ – густина плинину;

t – час;

x – координата;

v – швидкість повітряного потоку;

p – тиск плинину;

S_M^P, S_{li}^P, S_H^P – додаткові члени міжфазного обміну, що виникає внаслідок взаємодії частинок Ейлера-Лагранжа;

T_{ij} – тензор рейнольдсових напруг для ньютонівського текучого середовища:

$$T_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right),$$

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

T_{ij}^R – тензор рейнольдсових напруг для ньютонівського текучого середовища,
з урахуванням припущення Бусінеска:

$$T_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

μ_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon};$$

f_μ – функція турбулентної в'язкості:

$$f_\mu = \left(1 - e^{-0,025 R_y} \right)^2 \left(1 + \frac{20,5}{R_T} \right),$$

R_y – змінна

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu};$$

R_T – змінна

$$R_T = \frac{\rho k^2 \varepsilon}{\mu};$$

y – відстань від поверхні розрахункової стінки до локального усередненого
об'єму текучого середовища;

k – кінетична енергія турбулентності;

ε – дисипація кінетичної енергії турбулентності;

δ_{ij} – дельта-функція Кронекера.

Кінетична енергія турбулентності та її дисипація визначаються шляхом розв'язання 2-х додаткових рівнянь [66]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k; \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon,\end{aligned}\tag{3.2}$$

де S_k – характеристика пульсацій кінетичної енергії

$$S_k = T_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B;$$

S_ε – характеристики дисипації кінетичної енергії

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 T_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k},$$

f_1, f_2 – змінні, які залежать від коефіцієнтів динамічної та турбулентної в'язкості

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - e^{-R_T^2};$$

P_B – турбулентність, що зумовлена силою плавучості:

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

g_i – складова гравітаційного прискорення.

Модельні коефіцієнти приймаємо рівними [66]:

$$\sigma_B = 0,9 ;$$

$$C_{B1} = 1 \text{ при } P_B > 0 ;$$

$$C_B = 0 \text{ при } P_B \leq 0 ;$$

$$\sigma_\varepsilon = 1 ;$$

$$\sigma_k = 1 ;$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44 ;$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92 ;$$

$$C_\mu = 0,09 ;$$

S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу повітряного потоку

$$S_i = S_{gravity} = -\rho g_i ;$$

H – повна ентальпія текучого середовища:

$$H = h + \frac{v^2}{2},$$

h – ентальпія;

q_i – дифузійний тепловий потік

$$q_i = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (3.3)$$

Pr – число Прандтля;

σ_c – модельна константа, $\sigma_c = 0,9$;

Q_H – тепло, що виділяється джерелом тепла в одиничному об'ємі плинину.

Коефіцієнт опору форми

$$C_D = \frac{F}{0,5v^2\rho dl},$$

де v – швидкість повітря, м/с;

ρ – густина повітря м³/кг;

d – діаметр зразка, м;

l – довжина, м;

F – повна сила, що діє за напрямом потоку на зразок з якою повітря діє на провід складається з суми сили тертя, Па.

Початкові умови. У задачі, що розв'язується:

- дифузійний теплообмін між тілом і текучим середовищем відсутній, тому $q_i = 0$;

- міжфазний обмін із-за частинок Ейлера-Лагранжа відсутній, тому $S_M^P = S_{li}^P = S_H^P = 0$;

- внутрішні джерела тепла у текучому середовищі відсутні, тому $Q_H = 0$.

- температура повітря, $t_a = 0$ °С.

З урахуванням припущень та початкових умов система рівнянь (3.1) набуде вигляду

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) &= 0 \\ \frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \\ \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) \right) + \frac{\partial p}{\partial \tau} - \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_j v_j \end{aligned} \right\}. \quad (3.4)$$

Гідродинамічні граничні умови для системи рівнянь (3.2)-(3.4):

- умова на вході – *Velocity*: $v_i = 5, (10, 15, 20, 25, 30, 35)$ м/с;
- умова на виході – *Environment Pressure*: $p = 101325$ Па;
- провід у потоці повітря нерухомий $\Omega = 0$ м/с;
- сила тяжіння – *Gravity*: $9,81$ м/с²;
- турбулентність повітряного потоку – *Turbulence Intensity*: $0,1\%$;
- умова симетрії – *Symmetry*: меж розрахункового домену $Z_{\min}$ та $Z_{\max}$.

Кінцево-елементна сітка. Для чисельного розв'язування нестационарної математичної моделі (3.4) використовується кінцево-елементна сітка. Дискретизація виконується як у просторі, так і в часі. Для дискретизації за простором, розрахункова область повністю вкривається сіткою, де грані комірок паралельні координатним площинам Глобальної системи координат 3D-моделі SolidWorks. Отже, розрахункова сітка складається з комірок у формі паралелепіпедів.

FlowSimulation використовує метод кінцевих об'ємів, тому значення незалежних змінних розраховуються в центрах комірок, а на гранях цих комірок обчислюються потоки маси, імпульсу та енергії, що потрібні для розрахунку цих значень.

Дуже важливим є точне розбиття розрахункової області при створенні комп'ютерної моделі, оскільки погано зумовлена сітка приведе до неточних результатів. Тому необхідно вирішити суперечливу задачу з визначення кількості комірок розрахункової сітки.

З одного боку, зі зменшенням елементарної комірки зростає точність розрахунку, з іншого – зі збільшенням кількості комірок сітки зростає час розв'язку задачі. Крім того, відстань від 3D-моделі до стінок рахункової області теж має великий вплив на точність розрахунку.

Для отримання у певному наближенні оптимальної сітки була використана наступна стратегія:

1. Відстані від стінок до розрахункової моделі були вибрані на основі рекомендацій приведених у працях [29, 67] і представлені на рис. 3.4

2. Базова сітка була отримана розбиттям розрахункового домену на шари заданою кількістю площин.

3. У зв'язку з відсутністю апроксимації граней розрахункових комірок плину, що стикаються з поверхнею дрібних тіл, для їх розрішення розрахунковою сіткою були використані процедури локального подрібнення сітки поблизу цих поверхонь. Також використовувалися спеціальні процедури розрішення розрахунковою сіткою тонких стінок, що омиваються плинном, та тонких шарів різномірних матеріалів у твердих тілах, без подрібнення комірок сітки до меншої товщини стінки. Для підвищення точності моделі, на межі контакту зразка з плинном (див. рис. 3.5,) було застосовані локальні розрахункові сітки.

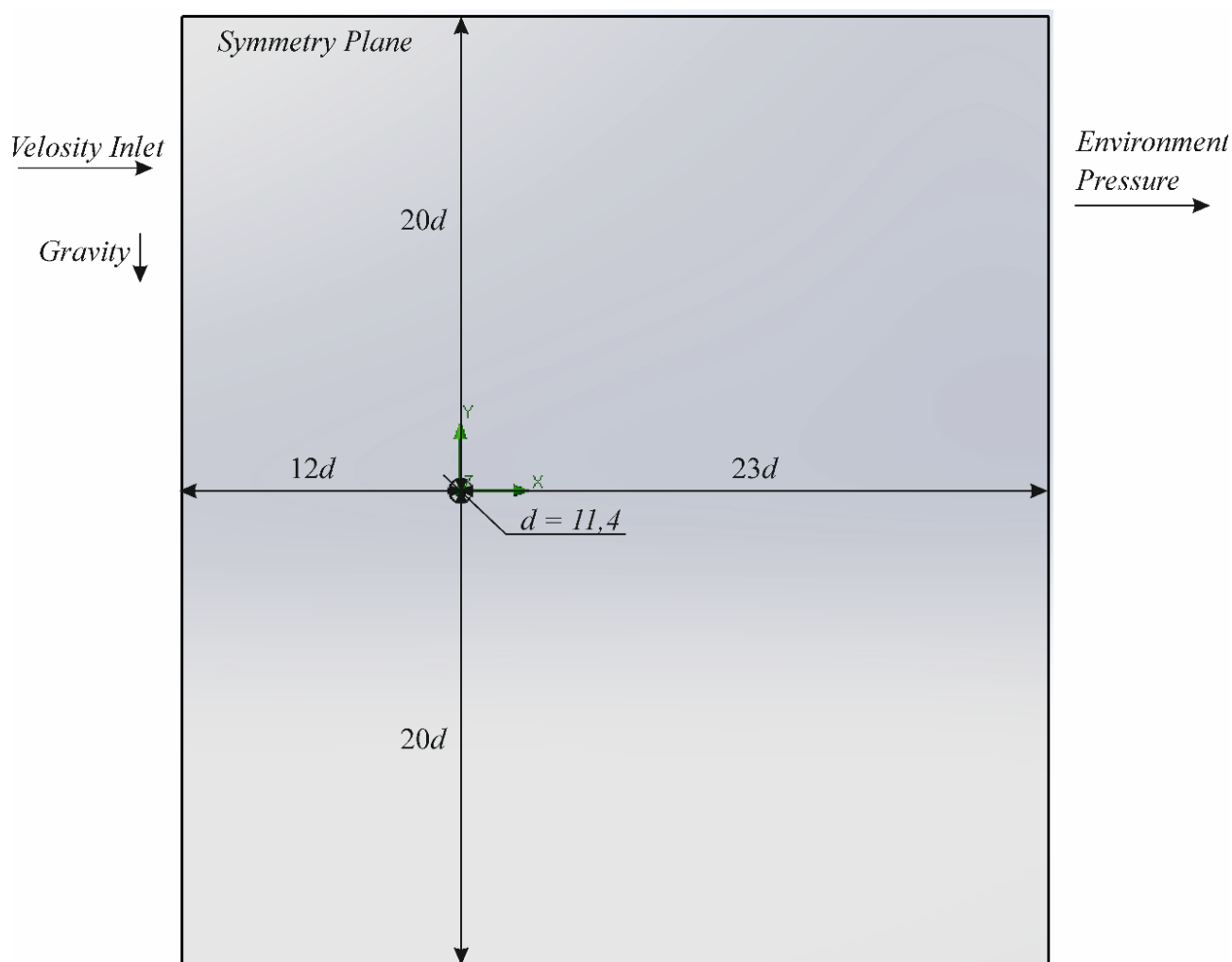


Рисунок 3.4 – Розміри розрахункової області та граничні умови

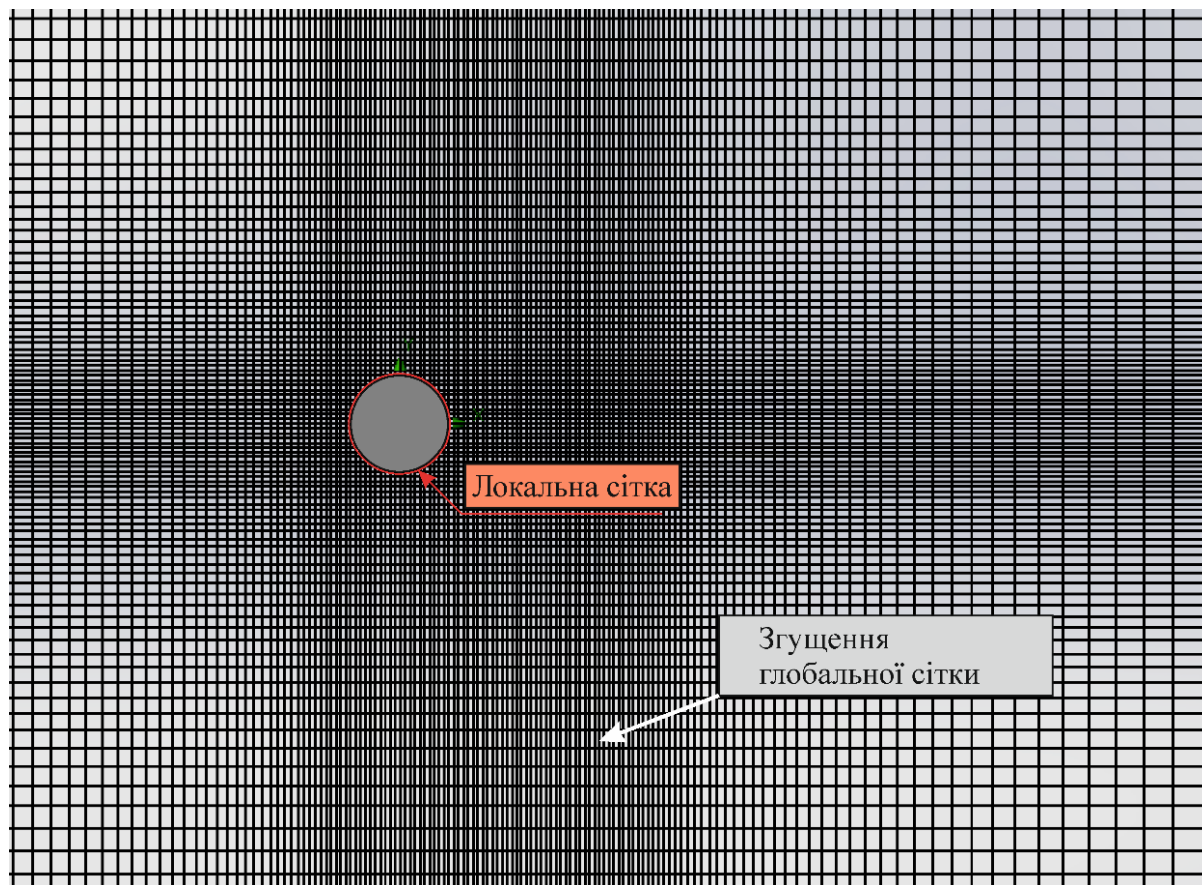


Рисунок 3.5 – Розрахункова кінцево-елементна сітка розрахункової моделі

4. Дискретизацію за часом виконано методом розщеплення операторів типу SIMPLE [68] для більш ефективного розрахунку тиску та швидкості текучого середовища.

5. Отримані сітки перевірялась на регулярність шляхом збільшення їх частоти до досягнення сіткової збіжності рішення математичної задачі. Отримані результати представлені в табл. 3.1.

Побічною перевірки правильності вибору розрахункової сітки отримані значення коефіцієнта опору форми мають бути подібними до значень, що були отримані для циліндра в попередніх дослідженнях.

Таблиця 3.1 – Перевірка регулярності сіток 3D-моделей

№ п/п	Кількість комірок сітки, тис. шт.		Контрольні параметри (C_D)			
	у площині	на межі розділу	значення	середнє	мінімум	максимум
	<i>Круговий циліндр</i>					
1	210 144	0,328	0,963	0,99	0,909	1,074
2	211 852	1 296	0,968	1,009	0,927	1,1
3	218 762	35 200	1,194	1,185	1,141	1,278
4	367668	83 200	1,217	1,192	1,126	1,244
	<i>Провід АС-70/11</i>					
1	80 868	1 560	0,776	0,612	0,564	0,776
2	90 948	6 464	0,932	0,7	0,623	0,932
3	1261 80	26 304	0,887	0,906	0,878	0,948
4	527 460	37 460	1,245	1,298	1,195	1,252
5	640 336	46 464	1,269	1,302	1,238	1,242
	<i>Модифікований провід</i>					
1	24 388	0,636	0,779	0,689	0,614	0,779
2	187 852	0,636	1,006	1,165	0,998	1,308
3	196 156	5 376	0,992	1,174	0,954	1,258
4	205 248	8 352	1,119	1,185	1,034	1,312
5	400 756	92 240	1,201	1,200	1,116	1,465

Таблиця 3.2 – Розрахунок коефіцієнту опору форми

№ п/п	v , м/с	C_D			
		значення	середнє	мінімум	максимум
	<i>Круговий циліндр</i>				
1	5	1,217	1,192	1,126	1,244
2	10	1,278	1,205	1,108	1,285
3	15	1,286	1,196	1,086	1,29
4	20	1,272	1,188	1,086	1,277
5	25	1,281	1,192	1,085	1,285
6	30	1,303	1,199	1,089	1,303
7	35	1,299	1,22	1,103	1,325
	<i>Провід АС-70/11</i>				
1	5	1,269	1,302	1,238	1,424
2	10	1,238	1,291	1,160	1,429
3	15	1,369	1,260	1,066	1,393
4	20	1,046	1,241	1,044	1,318
5	25	1,124	1,192	1,039	1,289
6	30	1,038	1,040	1,012	1,283
7	35	1,114	0,959	0,924	1,219
	<i>Модифікований провід АС-70/11</i>				
1	5	1,201	1,200	1,116	1,465
2	10	1,367	1,192	1,031	1,367
3	15	1,137	1,162	1,121	1,445
4	20	1,268	1,155	1,137	1,387
5	25	1,163	1,122	1,093	1,232
6	30	0,995	1,110	0,982	1,242
7	35	1,058	1,050	0,925	1,145

3.3 Аналіз результатів комп'ютерного моделювання

Циліндр, провід повітряної лінії, шестигранник з округленнями на гранях (модифікований провід) – незручно обтічні тіла, тому за ними формується велика область відриву зі зворотно-циркуляційними потоками (рис. 3.6-3.9, 3.10-3.12), що виникає внаслідок істотного підвищення тиску.

Змодельовані за розробленою чисельною моделлю структури обтікання циліндра показні на рис. 3.6, 3.7. Зі зростанням швидкості потоку повітря v , а отже і числа Рейнольдса Re , у кормовій частині пограничний шар зростає і починає відриватися у нижній частині циліндра і формує відривну течію, що містить пару симетричних вихорів. Оскільки, $Re > 4000$, обтікання носить нестационарний характер.

Результати моделювання (див. табл. 3.1) показали гарний збіг з експериментальними даними, результати яких представлені в [65], що підтверджує правильність вибраної методики моделювання та чисельної моделі.

Розподіл швидкості в поперечного розрізі проводу АС-70/11 при обтіканні його потоком повітря зі швидкістю 15 м/с представлено на рис. 3.8, а траєкторії току на рис. 3.9. На передній стороні, що звернена до потоку розподіл тиску в основному відповідає теоретичному розподілу тиску при обтіканні потоком нев'язкої рідини, в той час як на зворотному боці викликана відривом зміна структури потоку призводить до значного зниження тиску. Основний відрив потоку спостерігається у верхній частині проводу. За точками відриву у впадинах формуються зворотні течії малої швидкості не більше 1 м/с.

У порівнянні з круговим циліндром рівного діаметру та довжини (рис. 3.6, 3.7), за ідентичних гідродинамічних умов, область відриву за проводом АС-70/11 (рис. 3.8, 3.9) має несиметричні вихори зі спіральними вузлами, які спотворюють лінії основного току. Між дротинами виникають істотні циркуляційні зони (рис. 3.10). Отримані значення коефіцієнту опору форми для проводу АС-70/11 залежать від швидкості потоку й знаходяться у діапазоні 1,302-0,959 (див. табл. 3.2), що є близьким до нормативного значення 1,2 приведенного в [69] та збігається з результатами досліджень представлених у праці [65].

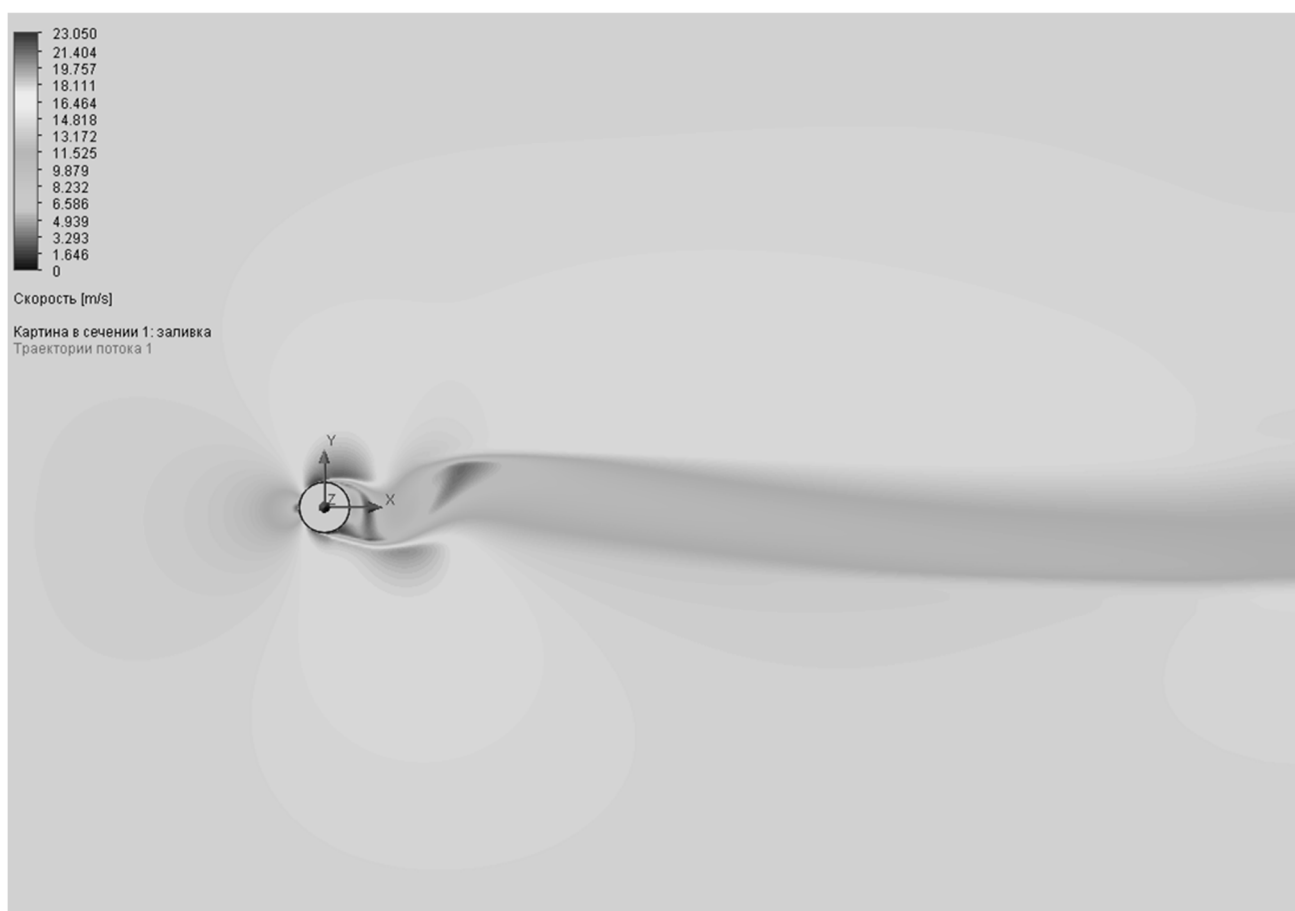


Рисунок 3.6 – Розподіл швидкості у поперечному розрізі
кругового циліндра ($v = 15$ м/с, $t_a = 0$ °C)

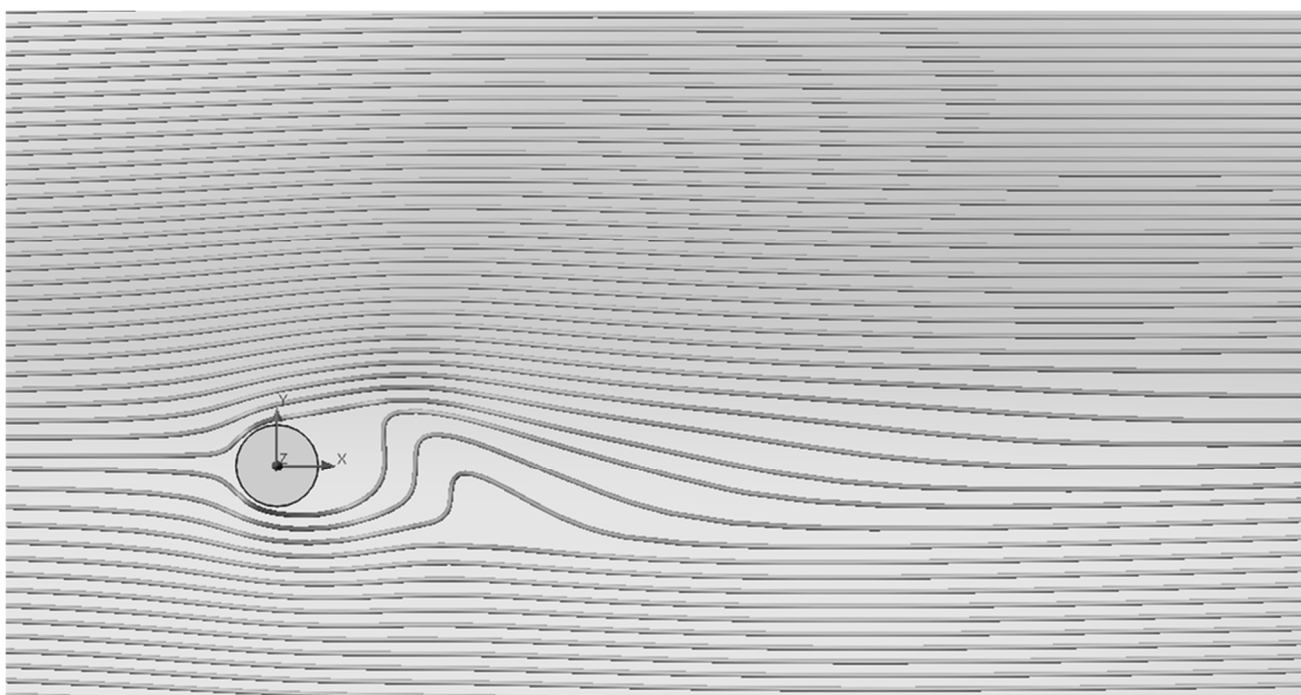


Рисунок 3.7 – Лінії току навколо кругового циліндра

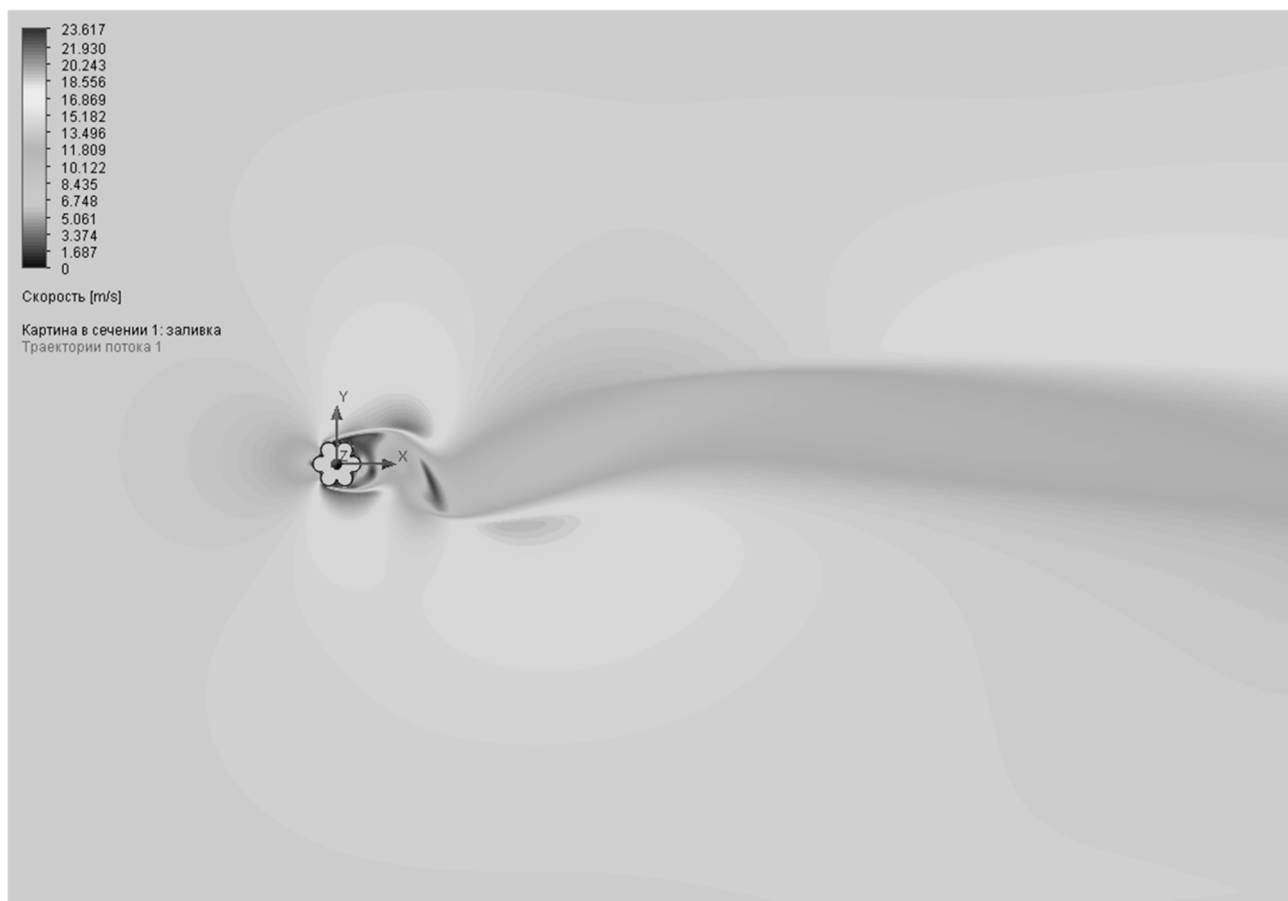


Рисунок 3.8 – Розподіл швидкості у поперечному розрізі проводу АС-70/11
($v = 15$ м/с, $t_a = 0$ °C)

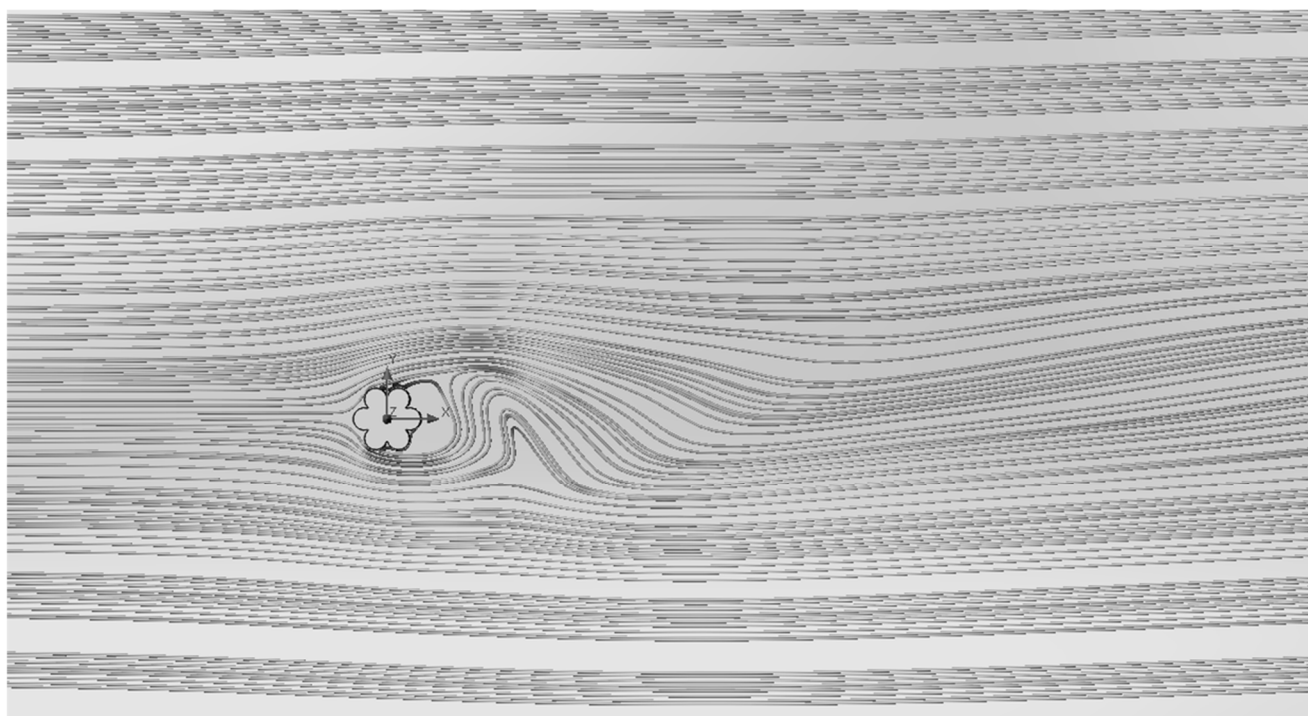


Рисунок 3.9 – Лінії току навколо проводу АС-70/11

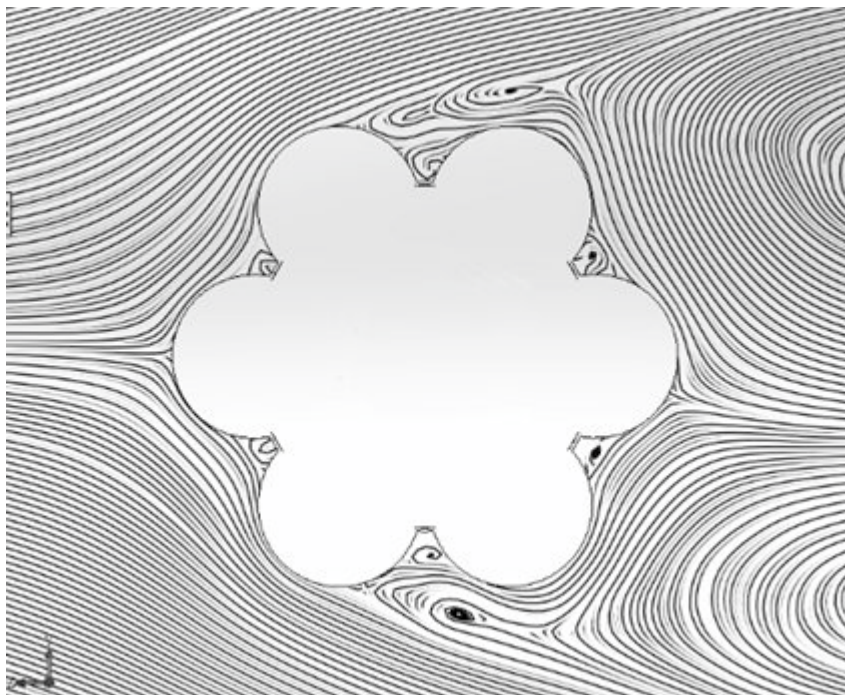


Рис. 3.10 – Малі циркуляційні зони між дротинами проводу ПЛ

На рис. 3.11 приведено розподіл швидкості у поперечному розрізі модернізованого проводу АС-70/11, а на рис. 3.12 траєкторії току навколо нього. На передній частині проводу формується зона застою з нульовою швидкістю. У порівнянні зі стандартним проводом, що має шість дротин у верхньому повиві (АС-70/11) у модернізованому проводі відсутні малі циркуляційні зони між окремими дротинами, тому на кормі модифікованого проводу знизу і зверху формується дві застійні зони, що призводять до відриву потоку. Число рейнольдса для модифікованого проводу за вибраних умов, як і для інших зразків лежить у межах від 4000 до 40000, тому його обтікання носить нестационарний характер

Отримані значення коефіцієнту опору форми для модернізованого проводу у всьому діапазоні зміни швидкості вітру 5-35 м/с, в порівнянні зі стандартним, виявилися нижчими. Для подальших розрахунків приймаємо для стандартного проводу $C_D = 1,302$, для модифікованого – $C_D = 1,2$.

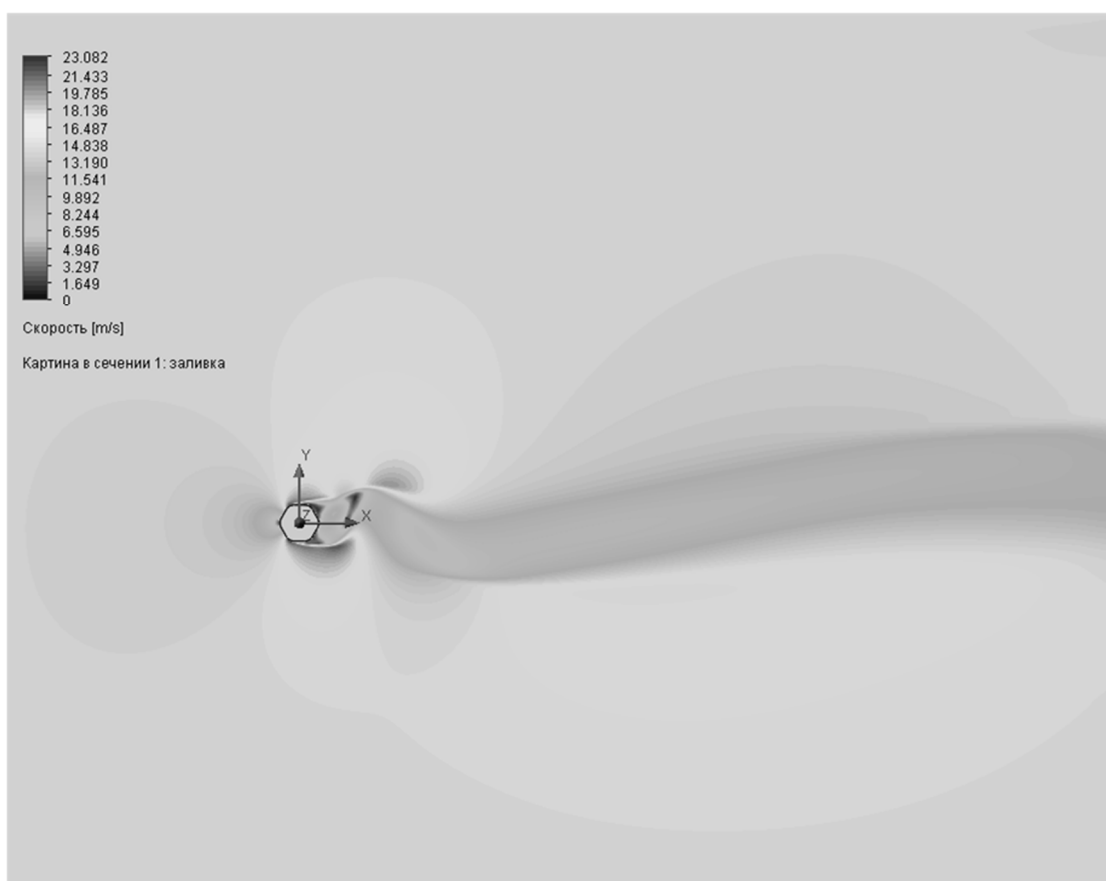


Рисунок 3.11 – Розподіл швидкості у поперечному розрізі модернізованого проводу ($v = 15$ м/с, $t_a = 0^\circ\text{C}$)

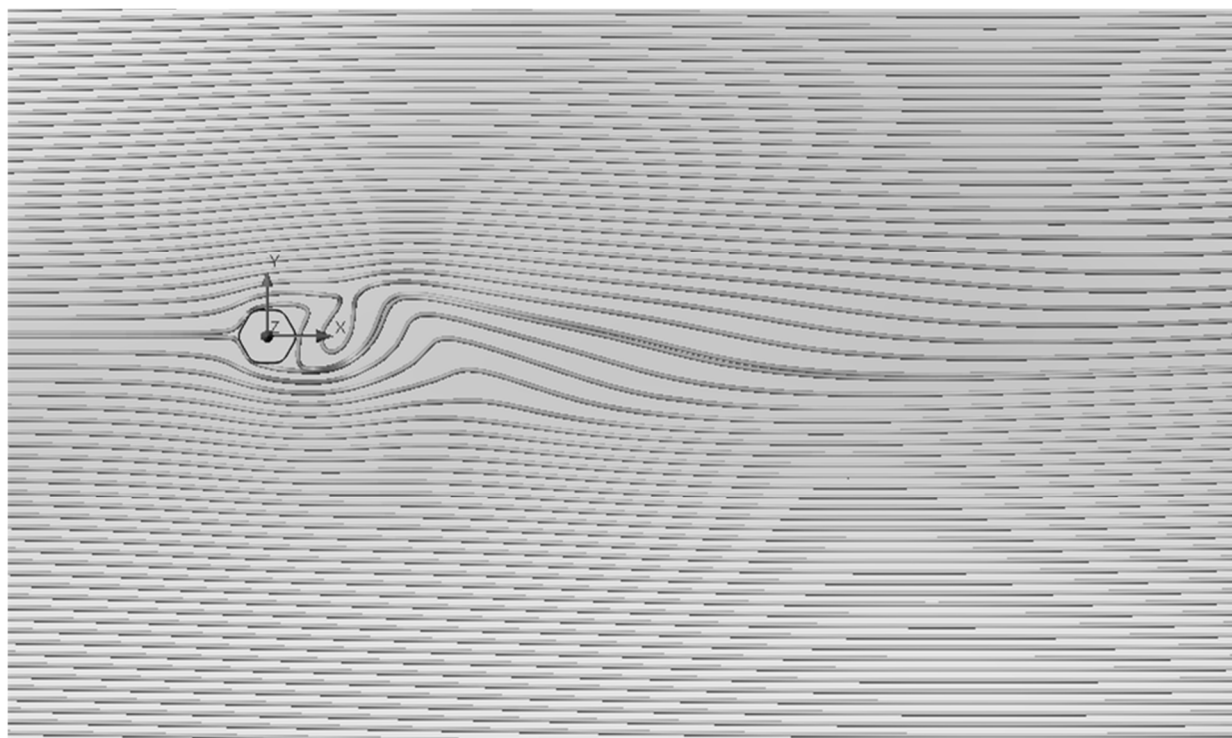


Рисунок 3.12 – Лінії току модернізованого проводу ($v = 15$ м/с, $t_a = 0^\circ\text{C}$)

Зміна коефіцієнтів опору форми для всіх досліджуваних зразків у залежності від швидкості вітрового потоку представлена на рис. 3.13. Для циліндра даний параметр до швидкості потоку 35 м/с фактично не змінюється, незначні його коливання викликані похибкою чисельної моделі. Для проводу АС-70/11 C_D має нелінійний характер і зі швидкості 10 м/с починається його різке зниження. Це явище пов'язане з високою шорсткістю його поверхні із-за впадин між дротинами. Тому стандартний провід АС-70/11 досягне кризи опору при ураганній швидкості вітру приблизно 40 м/с, а гладкий циліндр – при значно вищій.

Коефіцієнтів опору форми модифікованого проводу при швидкостях до 25 м/с змінюється майже лінійно, а далі починається плавне його зниження до точки кризи опору. Тобто, при швидкості вітру до 27 м/с вітрове навантаження на модифікований провід буде нижчим, а далі навпаки – до точки кризи опору проводу АС-70/11

Отже, розроблена комп'ютерна модель може бути використана при проектуванні захисних оболонок проводів повітряних ліній.

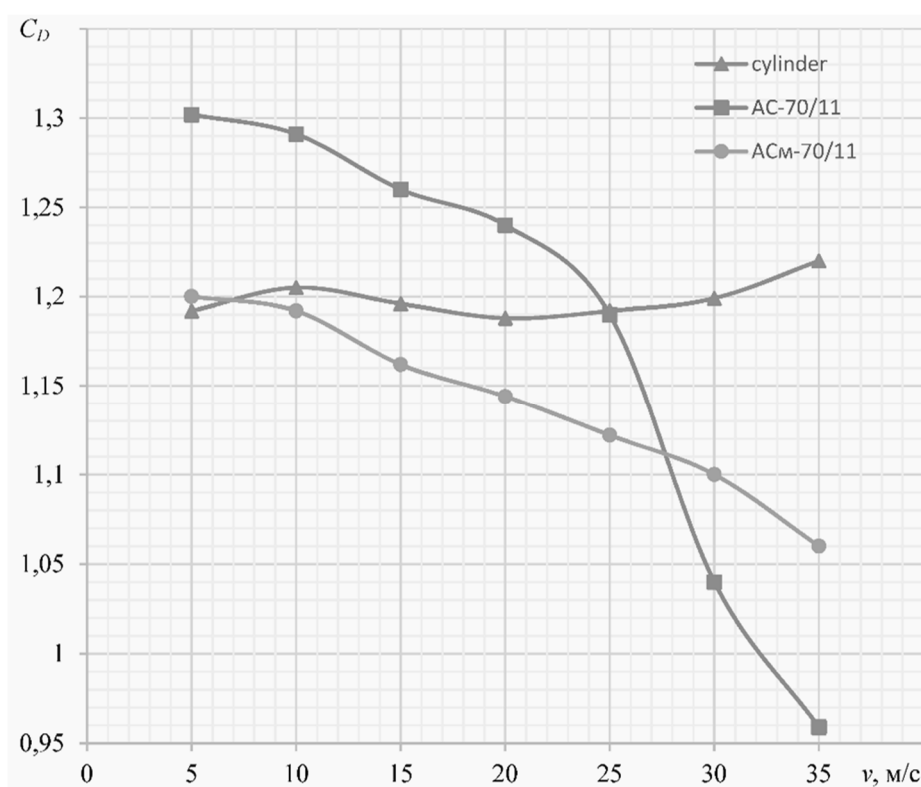


Рисунок 3.13 – Коефіцієнти опору форми

3.4 Розрахунок вітрових навантажень на провід

Проводи повітряних ліній працюють у тяжких умовах, піддаючись дії вітру, ожеледі, хімічних реагентів, що знаходяться в повітрі, вібраціям і т. п. Тому в матеріалах проводів і тросів виникають великі механічні напруження.

Аналіз статистичних даних про технологічні порушення у роботі ПЛ показує, що 10% пошкоджень відбувається внаслідок дії вітру та 14% внаслідок дії ожеледно-вітрових навантажень. Основними причинами ушкоджень, вважаються наступні:

1. Надрозрахункові навантаження. Кліматичний вплив на конструктивні елементи ліній має випадковий характер, а отже, будь-яке нормативне значення навантаження буде перевищене з певним ступенем імовірності.

2. Невикористання засобів захисту проводів повітряних ліній від дії вітрових та ожеледно-паморозевих відкладень.

3. Значний фізичний знос повітряних ліній та обмежений ресурс для їх реконструкції.

4. Помилки проектування через недосконалість нормативних документів.

5. Відновлення після аварій без урахування нормативів, що змінилися, призводить до накопичення кількості ліній, що потребують модернізації.

6. Низька якість будівництва та монтажу, відхилення від проектних рішень.

7. Відносно низький рівень міцності конструктивних елементів: наявність великої кількості ліній, побудованих за умовами 5-річної повторюваності ожеледно-вітрових навантажень (повітряні лінії електропередавання 10 кВ).

8. Неякісна експлуатація, найбільшою мірою проявляється в екстремальних погодних умовах.

Усунення вказаних причин дасть змогу захистити ПЛ від руйнування та істотно зменшити швидкість зміни їх надійності.

Під час проектування повітряних ліній проводи перевіряють на вітрові навантаження двох видів [69]:

- навантаження від максимального тиску вітру без ожеледі;
- навантаження від тиску вітру на проводи, троси та елементи опор кругового поперечного перерізу діаметром до 70 мм, укриті ожеледдю, що визначають у вигляді лінійного навантаження.

Виконаємо розрахунок вітрових навантажень для стандартного проводу АС-70/11 та модифікованого АСм-70/11.

У режимі максимального вітру без ожеледі, розрахункове вітрове навантаження на проводи і троси повітряних ліній 35 кВ (2-й клас безвідмовності) складе, Н [69]:

$$P_m = W_{0m} \cdot C_c \cdot C_{aer} \cdot C_{dc} \cdot d \cdot L_{wind} \cdot \sin^2(\varphi) \cdot 10^{-3},$$

де W_{0m} – тиск вітру, Па:

$$W_{0m} = \gamma_{fmax} W_0,$$

γ_{fmax} – коефіцієнт надійності за максимальним тиском вітру, для ПЛ 35 кВ з періодом повторюваності $T = 10$ років, приймаємо 0,61 [69];

W_0 – характеристичне значення максимального тиску від вітру, для рівнинної місцевості на висоті 10 м над поверхнею землі згідно карти територіального районування України [69] для 2-го району становить 450 Па;

C_c – коефіцієнт впливу на вітрове навантаження місця розташування елемента повітряної лінії:

$$C_c = C_h(z) C_{rel} C_{dir},$$

$C_h(z)$ – коефіцієнт збільшення вітрового тиску залежно від висоти z встановлення проводу (тросу):

$$C_h(z) = \beta \left(\frac{z}{10} \right)^{2\alpha},$$

α, β – коефіцієнти, для плоскої рівнини без перешкод, що піддається дії вітру на ділянці довжиною не менше ніж 3 км приймаємо згідно [69], відповідно, $\alpha = 0,1, \beta = 1,5$;

z – висота установки проводу ПЛ, приймаємо середнє значення 10 м;

C_{rel} – коефіцієнт рельєфу, приймаємо рівним 1,0 [69];

C_{dir} – коефіцієнт напрямку, що враховує нерівномірність вітрового навантаження за напрямом вітру, приймаємо рівним 1, згідно [69];

C_{aer} – аеродинамічний коефіцієнт, приймаємо для проводу АС-70/11 рівним 1,302, а для модифікованого – 1,20 відповідно до розрахунків проведених у розділах 3.3, 3.4;

C_{dc} – коефіцієнт динамічності, вводиться для врахування впливу пульсаційного складника вітрового навантаження та просторової кореляції вітрового тиску на проводи повітряної лінії:

$$C_{dc} = g_{tu} \alpha k_L,$$

g_{tu} – коефіцієнт, що враховує вплив пульсаційного складника вітрового навантаження та динаміку коливань проводу, для місцевості І-го типу дорівнює 1,3 згідно [69]

α – коефіцієнт, що враховує нерівномірність вітрового тиску в прогоні повітряної лінії

$$\alpha = 2,6 - 0,3 \ln W_{0m},$$

причому $\alpha \leq 1,0$;

k_L – коефіцієнт, що враховує вплив довжини прогону на вітрове навантаження. Його приймають таким, що дорівнює: 1,2 – за довжини прогону $L \leq 50$ м, 0,85 при $L \geq 800$ м проміжні значення коефіцієнта визначаються за формулою:

$$k_L = 1,7 - 0,12 \ln L_{wind}$$

L_{wind} – довжина вітрового прогону. Для 2-го району України за характеристичним значенням вітрового тиску та 4-го району за характеристичним значенням ожеледі для ПЛ 35 кВ, що виконана проміжними опорами ПБ35-3В на стійках СВ-161-1 на с приймаємо довжину габаритного прогону 106 м;

d – діаметр проводу, мм;

φ – кут між напрямом вітру та віссю ПЛ, приймаємо $\varphi = 90^\circ$, з метою визначення максимального вітрового навантаження.

Визначення розрахункових вітрових навантажень на провід АС-70/11 та модифікований провід АСм-70/11 представлені у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунку вітрових навантажень

Марка проводу	Параметр							
	W_{0m} , Па	C_c	C_{aer}	C_{dc}	d , мм	L_{wind} , м	φ	P_m , Н
АС-70/11	0,61	1,5	1,302	0,148	11,4	106	90°	96,01
АСм-70/11	0,61	1,5	1,200	0,155	12,9	106	90°	88,49

З отриманих результатів (табл. 3.3) випливає, що зниження коефіцієнту опору форми модифікованого проводу призводить до зниження вітрового навантаження нього на 7,8%.

Навантаження від дії вітру на проводи ПЛ діаметром до 70 мм включно, що вкриті ожеледдю, визначають як лінійне навантаження.

Розрахункове значення лінійного навантаження від дії вітру під час ожеледі на конструктивні елементи ПЛ, Н, визначається за виразом [69]:

$$Q_m = Q_{0m} \cdot \mu_g \cdot k_g \cdot C_c \cdot k_L \cdot L_{wind} \cdot \sin^2(\varphi),$$

де Q_{0m} – значення лінійного навантаження від дії вітру під час ожеледі на провід, що вкритий ожеледдю, Н/м [69]:

$$Q_{0m} = \gamma_{fQ} \cdot Q_0,$$

γ_{fQ} – коефіцієнт надійності дії вітру на провід, що вкритий ожеледдю, для періоду середньої повторюваності $T = 10$ років складає 0,63 [69];

Q_0 – характеристичне значення лінійного вітрового навантаження на обледенілий провід, для рівнинної місцевості на висоті 10 м над поверхнею землі визначаємо за картою територіального районування України, для 3 району, його значення складе 250 Па [69];

μ_g – коефіцієнт, за допомогою якого враховується дія вітру на провід, що вкритий ожеледдю. Для проводу діаметром $d = 11,4$ мм μ_g визначаємо за допомогою інтерполювання

$$\mu_g = \mu_{g,i} + \frac{\mu_{g,i+1} - \mu_{g,i}}{d_{g,i} - d_{g,i+1}}(d - d_i) = 1 + \frac{1,2 - 1,0}{20 - 10}(12 - 10) = 1,028;$$

k_g – коефіцієнт, що враховує зміну розміру ожеледі за висотою, при розміщенні проводу на висоті 10 м становить $k_g = 1,0$ [69].

Визначення розрахункового вітрового навантаження на провід АС-70/11, що покритий ожеледдю представлено у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Визначення розрахункового вітрового навантаження на провід АС-70/11, що покритий ожеледдю

Марка проводу	Параметр							
	$Q_{0m},$ Н/м	μ_g	k_g	C_c	k_L	$L_{wind},$ м	φ	$Q_m,$ Н
АС-70/11	5,04	1,028	1	1,5	1,19	70	90°	647,4
АС-70/11(м)	-	-	-	-	-	-	-	-

Розрахункове значення навантаження від ожеледі на конструктивні елементи повітряної лінії приведені до довжини її вітрового прогону, Н [69]:

$$G_{mp} = \mu_1 k_1 g_{mp} L_{wind}$$

де μ_1 – коефіцієнт, що враховує зміну навантаження від ожеледі в залежності від діаметра проводу, приймаємо рівним 1,028 [69];

k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну навантаження ожеледі за висотою, для проводу, що підвішений на висоті до 10 м включно, рівний 1,0 [69];

g_{mp} – розрахункове значення ожеледного навантаження, Н/м:

$$g_{mp} = g_p \gamma_{fg},$$

γ_{fg} – коефіцієнт надійності за лінійним ожеледним навантаженням для заданого середнього періоду повторюваності $T = 10$ р., дорівнює 0,63 [69];

g_p – характеристичне значення навантаження від ожеледі на конструктивних елементах, визначається з карти територіального районування України за характеристичними значеннями ожеледі, для 4-го району складає 20 Н/м [69];

Розрахунок розрахунку ожеледного навантаження на провід АС-70/11 представлені у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок ожеледного навантаження на проводи

Марка проводу	Розрахунковий параметр					
	k_1	μ_l	g_{mp} , Н/м	γ_{fg}	g_p , Н/м	G_{mp} , Н
АС-70/11	1,0	1,028	12,6	0,63	20	910,0
АСм-70/11	-	-	-	-	-	0,0

Виконані розрахунки показали, що створення на проводі захисного покриття дозволяє знизити на нього вітрове навантаження з 96,0 Н до 88,5 Н або на 7,8%. Якщо захисне покриття має ожеледофобний шар, то ожеледні навантаження знижуються до 0 Н/м (рис. 3.14).

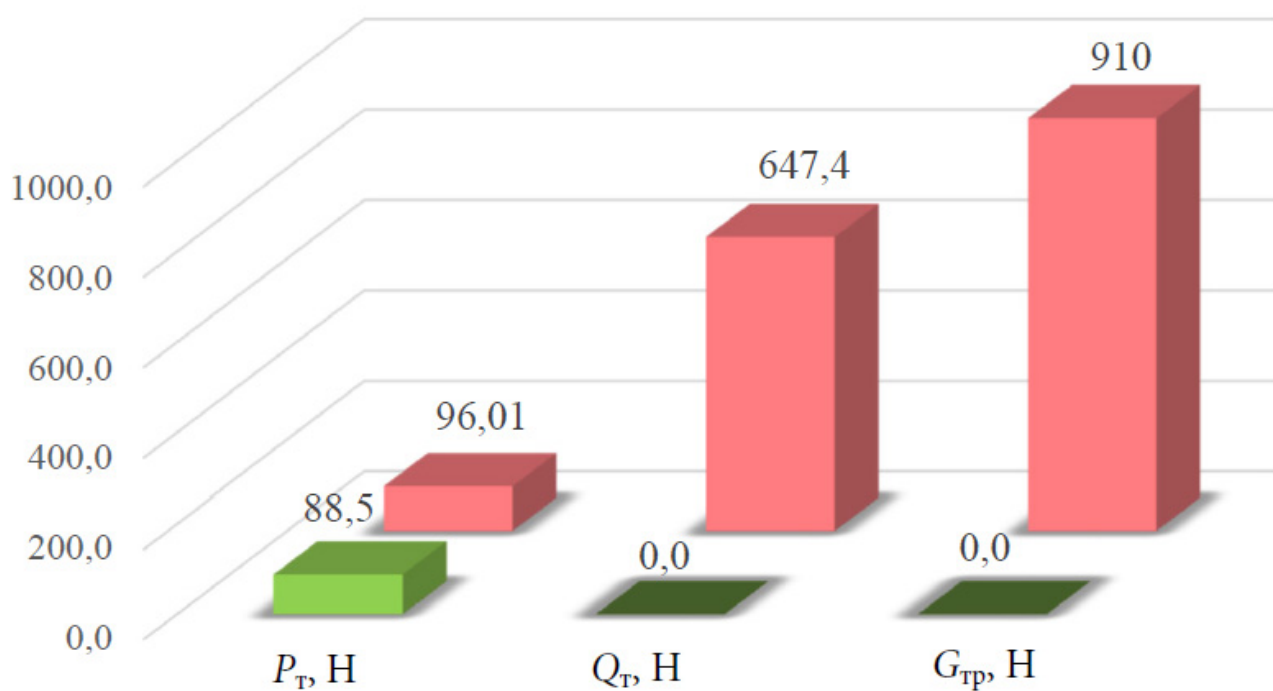


Рисунок 3.14 – Порівняльна діаграма вітрових навантажень на проводи ПЛ (АС-70/11, АСм-70/11)

3.5 Технічні рекомендації, щодо нанесення захисного покриття

На базі проведених досліджень розроблено наступні технічні рекомендації, щодо нанесення захисного покриття на неізолюваний провід ПЛ, що знаходиться в експлуатації:

1. Перед створенням захисного покриття необхідно перевірити провід повітряної лінії на наявність ушкоджень, зокрема переламаних, оплавлених дротин.
2. Захисна стрічку доцільно транспортувати та наносити на провід з рулонів заданої ширини та однакової, фіксованої довжини.
3. Довжина стрічки визначається довжиною прогону ПЛ та діаметром проводу.
4. Захисне покриття повинно наноситися на попередньо очищений від пилу провід за допомогою щіток, що мають металевий і капроновий ворс.
5. Перед нанесенням покриття провід повітряної лінії необхідно знежирити за допомогою бензину чи розчинника.
6. Найбільша ефективність нанесення покриття можлива лише при використанні автоматизованих комплексів типу LineScout (рис. 1.5) зі встановленою обмотувальною машиною.
7. Піднімання та установку на провід ПЛ автоматизованого комплексу доцільно робити за допомогою вантажного дрона яким керує оператор.
8. Початок і кінець захисного покриття в прогоні повітряної ліній повинні бути герметизовані.
9. Нанесення захисної стрічки на провід здійснюється шляхом спірального її намотування під рівномірним натягом і з нахлистом у місці найбільшої концентрації ожеледно-паморозевих відкладень у прогоні повітряної лінії.
10. Одночасно з нанесенням захисного покриття, доцільно перевіряти його якість за допомогою засобів неруйнівного контролю.
11. При використанні автоматизованих комплексів необхідно суворо дотримуватись правил техніки безпеки.

3.6 Оцінка очікуваного підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній

Експлуатаційна надійність повітряної лінії – це її дійсна надійність під час експлуатації, що зумовлена якістю проектування і будувannya, умовами її експлуатації, технічного обслуговування і ремонту.

У процесі експлуатації, після ушкоджень і технологічних відмов працездатність повітряної лінії відновлюється, тому основним показником її експлуатаційної надійності є параметр потоку відмов $\omega(t)$.

Параметр потоку відмов повітряної лінії – це математичне сподівання сумарної кількості відмов її конструктивних елементів n_0 , що відбулися за певний проміжок часу, за умови, що всі конструктивних елементів були відновлені, тобто їх кількість за весь строк експлуатації не змінилася – $n_0 = const$. Потік відмов ω є сумою двох складових – $\omega_1(t)$ і ω_2 :

$$\omega = \omega_1(t) + \omega_2, \quad (3.5)$$

де $\omega_1(t)$ – складова, що характеризує природне старіння та знос конструктивних елементів повітряної лінії;

ω_2 – складова, що зумовлена випадковими зовнішніми чинниками.

Чисельно параметр $\omega_1(t)$ дорівнює відношенню кількості конструктивних елементів ПЛ, що відмовили $\Delta n(t)$ за проміжок часу Δt до кількості n_0 , що знаходились у роботі впродовж цього проміжку часу [8]:

$$\omega_1(t) = \frac{\Delta n(t)}{n_0 \cdot \Delta t}. \quad (3.6)$$

З урахуванням вище викладеного рівняння (3.5) можливо записати

наступним чином

$$\omega = \frac{\Delta n(t)}{n_0 \cdot \Delta t} + \omega_2.$$

З метою оцінювання очікуваного підвищення надійності повітряних ліній 35 кВ необхідні вихідні дані про кількість відмов, що є випадковими величинами, залежать від великого числа різних причин і мають регіональний характер. Тому найбільш доцільним методом визначення цих параметрів є статистична обробка експлуатаційних даних про розподільну електромережу 35 кВ конкретної енергопостачальної компанії.

У табл. 3.4 представлений статистичні дані, зібрані для повітряних ліній розподільної мережі 35 кВ енергопостачальної компанії України загальною протяжністю 3283,9 км, що працюють у 4-му районі, за характеристичним значенням ожеледі та результати розрахунку значень їх параметра потоку відмов ω^* на 100 км.

Параметр потоку відмов розраховується за виразом (1.1), який для періоду усереднення $\Delta t = 1$ рік, набуде вигляду:

$$\omega(t) = \frac{n}{L_{\Sigma}}.$$

де n – число відмов конструктивних елементів ПЛ за 1 рік.

Згідно статистичних даних (табл. 3.4), параметр потоку відмов для ПЛ 35 кВ, що не обладнані засобами захисту від ожеледно-паморозевих відкладень (системами плавки ожеледі, захищеними проводами і т.п.) внаслідок їх ушкоджень вітровими та ожеледно-вітровими явищами, складе $\omega(t)_{\Sigma} = 0,021$ 1/рік · км.

Таблиця 3.4 – Кількість відмов повітряних ліній 35 кВ за календарний рік

Причина технологічного порушення	Параметр		
	<i>n</i> , шт.	%	ω^* , 1/рік·км
Пошкодження ізоляції			
Грозові перенапруги	38	55,07	1,157
Старіння ізоляції	3	4,35	0,132
Сторонній вплив	2	2,90	0,061
Всього	43	62,32	1,309
Пошкодження проводу			
Падіння дерев, гілок	5	7,25	0,152
Вітрові навантаження	4	5,80	0,122
Ожеледно-вітрові явища	12	17,39	0,365
Сторонній вплив	4	5,8	0,122
Всього	24	36,23	0,731
Пошкодження опор			
Ожеледно-вітрові явища	1	1,45	0,03
Всього	1	1,45	0,03
ВСЬОГО	69	100,0	2,1

Для повітряних ліній, що будуть обладнані модифікованими проводами показник $\omega(\tau)_{\Sigma}$ знизиться, за рахунок відсутності ушкоджень від ожеледно-вітрових явищ $\omega_{\text{пров.ОВЯ}} = \omega_{\text{опор.ОВЯ}} = 0$ 1/рік·км та зниження вітрового навантаження на $\Delta P_m = 7,8\%$:

$$\omega(t)'_{\Sigma} = \frac{1}{100} \left[\frac{1 - \Delta P_m}{100} \omega_{\text{пров.В.Н}} + \sum_{i=1}^m \omega_i \right] = \frac{1}{100} [0,922 \cdot 0,122 + 1,309 + 0,152 + 0,122] = 0,017 \text{ 1/рік} \cdot \text{км.}$$

Таким чином, очікуване зменшення потоку відмов ПЛ або підвищення надійності (спад параметру потоку відмов) за умови модифікації їх проводів для захисту від дії вітрових навантажень становитиме

$$\Delta\omega = \omega(t)_{\Sigma} - \omega(t)_{\Sigma}' = 0,021 - 0,017 = 0,004 \text{ 1/рік}\cdot\text{км.}$$

Нерівність $\omega(\tau)_{\Sigma}' = 0,004 > 0 \text{ 1/рік}\cdot\text{км}$ показує, що модифікація проводу ПЛ 35 кВ лише частково вирішує проблему ушкоджень їх від вітрових навантажень і повністю усунути її повністю таким способом не можливо. Тим не менш, запропонований метод підвищення надійності електромереж за рахунок зниження питомої пошкоджуваності конструктивних елементів повітряних ліній в умовах ожеледоутворення та вітрових навантажень є дієвим.

На рис. 3.15 представлені основні причини технологічних порушень у роботі ПЛ 35 кВ за один календарний рік у відсотках.

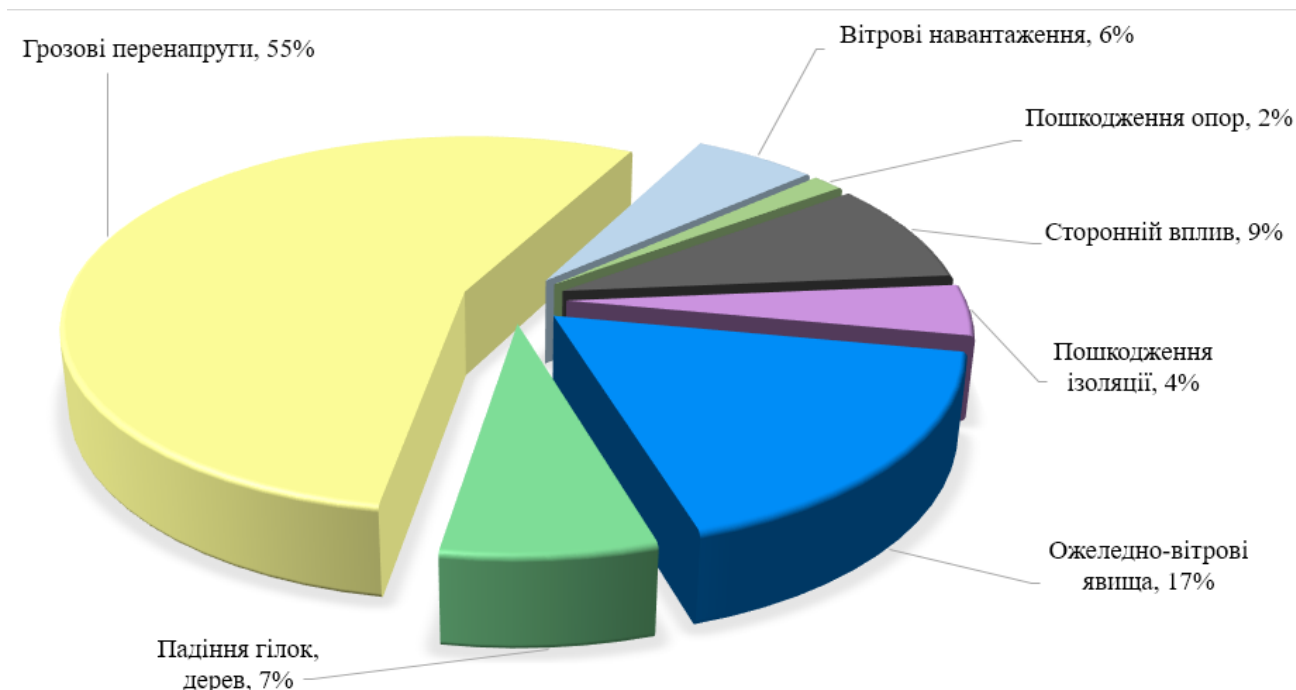


Рисунок 3.15 – Причини технологічних порушень у роботі ПЛ 35 кВ

3.7 Висновки

1. Розроблено чисельні моделі стандартного та модифікованого проводів АС-70/11 у програмному комплексі SolidWorks, що містять в собі розв'язок гідродинамічної задачі та дозволяють проводити їх дослідження при різних кліматичних умовах.

2. Виконано аналіз режимів обтікання стандартного та модифікованого проводів АС-70/11 на основі розроблених чисельних моделей. Результати досліджень показали, що коефіцієнт опору форми модернізованого проводу виявився на 7,8% нижчим ніж у стандартного в найтяжчому режимі роботи.

3. Встановлено, що вітрове навантаження на модифікований провід у порівнянні зі звичайним АС-70/10 знижується на 7,5 Н на вітровий прогін лінії. При застосуванні захисного покриття з ожеледофобним шаром, ожеледне навантаження на провід відсутнє.

4. Розроблено технічні рекомендації, щодо нанесення захисного покриття на неізолювані ПЛ 35 кВ, що знаходяться в експлуатації як основи підвищення їх стійкості до несприятливих кліматичних факторів шляхом зниження на них вітрових та ожеледних навантажень.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації повітряних ліній

У ході проведення обслуговування повітряних ліній, персонал стикається із різноманітним спектром небезпечних і шкідливих факторів. Серед них слід виділити наступні: вплив електромагнітних полів і випромінювань, ризик ураження електричним струмом, рухоме робоче обладнання, взаємодія з хімічно агресивними речовинами, робота на відкритому повітрі, виконання робіт на висоті та недостатня освітленість робочого місця.

Електромагнітні поля та випромінювання. Під час роботи ПЛ по їх проводах протікає електричний струм, що призводить до паразитного випромінювання електромагнітних хвиль. До біологічних систем людини, що найбільше реагують на дію електромагнітного поля, відносяться центральна нервова, серцево-судинна, гормональна та репродуктивна системи.

Електричний струм. Ураження електрострумом виникає, коли людина занадто близько наближається до проводах ПЛ під напругою або коли вона потрапляє у зону дії потенціалу обірваного проводу (відомого як «крокова напруга»). Це може статися через контакт з неструмопровідними частинами, що виготовлені з матеріалів, які проводять електрострум, і внаслідок розряду напруги з провідних деталей на ці неструмопровідні. Електрострум впливає на організм людини термічно, електролітично, біологічно та механічно. Це може призвести до травм або навіть летальних наслідків. Найбільша небезпека полягає в електричних ударах, коли живі тканини стають провідниками для електричного струму, що протікає через тіло людини та супроводжується судорожними скороченнями м'язів. Крім зупинки серця та функції дихання, смертність може бути зумовлена електрошоком – серйозною нервово-рефлекторною реакцією організму на сильну дію електричного струму. Стан шоку може тривати від кількох десятків хвилин до

добу, після чого може відбутися або одужання через інтенсивний медичний вплив, або настання летального результату.

Рухоме обладнання. Джерелом механічних травм можуть бути: рухомі машини, гострі кромки, задирки та шорсткості на поверхні виробів, інструментів і обладнання, підйомно-транспортне обладнання та машини, а також падіння предметів з висоти.

Хімічні шкідливі речовини. Пари, гази (наприклад, озон та оксиди азоту), рідини, аерозолі та суміші, коли вони взаємодіють з організмом людини, можуть викликати зміни в стані її здоров'я або викликати захворювання. Вплив хімічних речовин на людину може призвести до отруєння або навіть летального кінця.

Із аналізу небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації повітряних ліній слідує, що основною небезпекою є можливість ураження людини електрострумом, внаслідок дотику до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, а також при попаданні під крокову напругу та напругу дотику. Додаткові ризики становлять: роботи, що виконуються на висоті 1,3 м і більше, робота поза приміщенням.

4.2 Організація безпечної експлуатації повітряних ліній

На основі проведеного аналізу потенційно небезпечних і шкідливих факторів, які можуть виникнути при експлуатації ПЛ, були розроблені наступні організаційні та технічні заходи безпеки.

До організаційних заходів, якими досягається безпека робіт на повітряних лініях належать [70]:

- затвердження переліку видів робіт, що виконуються за нарядами, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;
- призначення відповідальних осіб за безпечне проведення робіт;
- оформлення робіт нарядом, розпорядженням або затвердженим переліком робіт, що виконуються в рамках поточної експлуатації;
- підготовка робочих місць робітниками;

- допуск до виконання роботи;
- проведення нагляду під час виконання регламентних робіт;
- переведення робітників на інше робоче місце;
- оформлення документації щодо перерв у роботі та її завершення.

Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт на повітряних лініях включають наступні дії: відключення ліній, що ремонтуються, встановлення переносних заземлень, вивішування плакатів із правилами безпеки. Зняття напруги здійснюється шляхом відключення вимикачів і роз'єднувачів. Приводи відключених електроапаратів замикають на замки, а на їх рукоятки вивішують плакати «Не вмикати – робота на лінії». Цей захід виконується оперативним персоналом підстанції, яка живить лінію, що підлягає ремонту.

На місці робіт, виконавець переконується у відсутності напруги і, як тільки це підтверджено, негайно накладає переносне заземлення. Один кінець заземлення попередньо підключається до заземлюючого спуску на електроопорі, а в разі його відсутності – до сталевого стрижня, який вбивається в ґрунт на глибину не менше 0,5 метра. Електротехнічний персонал накладає заземлення в діелектричних рукавичках за допомогою штанги.

При виконанні робіт із застосуванням автокранів, бурових машин і екскаваторів безпосередньо на повітряних лініях напругою від 35 до 110 кВ або в безпосередній близькості до них, відстань від висувної частини таких машин до найближчого електропроводу повинна бути не менше 4 метрів.

Під час виконання робіт із використанням підйомних машин в охоронній зоні повітряної лінії, яка знаходиться під напругою, ці машини повинні бути заземлені проводом переносного заземлення того ж перерізу, що і заземлення, яке використовується для відключених проводів лінії.

Великим ризиком є виконання робіт на відключеній повітряній лінії, яка знаходиться поблизу інших працюючих ліній і може піддаватися впливу напруги взаємної індукції, а також напруги, яку наводить грозова хмара. В 1-му випадку безпека досягається тимчасовим замиканням всіх фаз відключеної лінії, а в 2-му – шляхом припинення всіх видів робіт на повітряній лінії при наближенні грози.

4.3 Розрахунок заземлення опори повітряної лінії

Опір заземлювальних пристроїв опор за їх висоти до 50 м має бути меншим або рівним 10 Ом [69]. Необхідний опір заземлювальних пристроїв опор ПЛ напругою 35 кВ повинен забезпечуватися використанням наявних штучних заземлювачів, а природну провідність фундаментів і підземних частин опор під час розрахунків враховувати немає потреби.

Виконаємо розрахунок опору заземлювального пристрою опори У-35-1 ПЛ 35 кВ (рис. 4.1), що встановлена на сільськогосподарському полі.

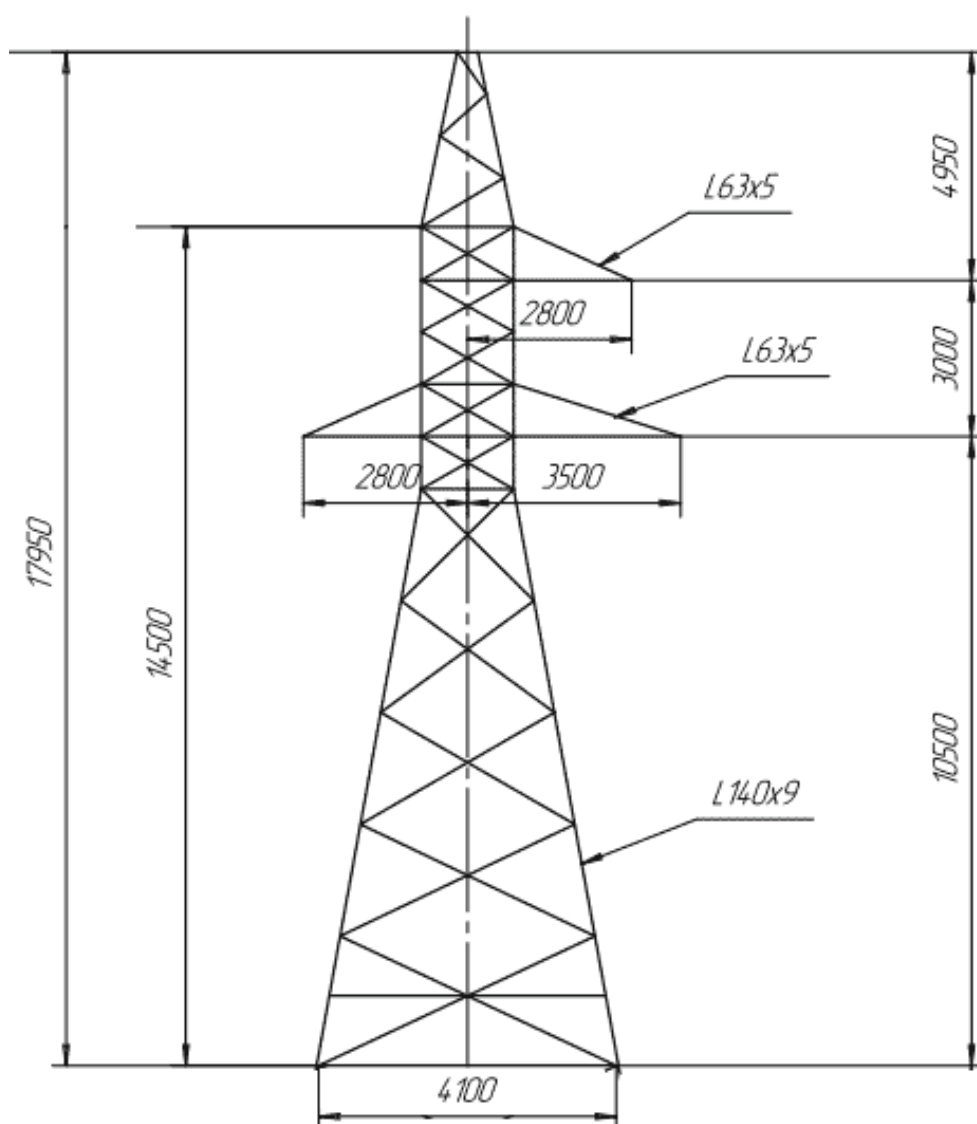


Рисунок. 4.1 – Опора анкерно-кутова У-35-1

Ґрунт двошаровий, товщина верхнього шару 0,6 м. Оскільки, опора знаходиться на сільськогосподарському полі горизонтальні електроди встановлюються на глибині 1 м, тобто весь заземлювальний пристрій знаходиться у нижньому шарі ґрунту (рис. 4.2).

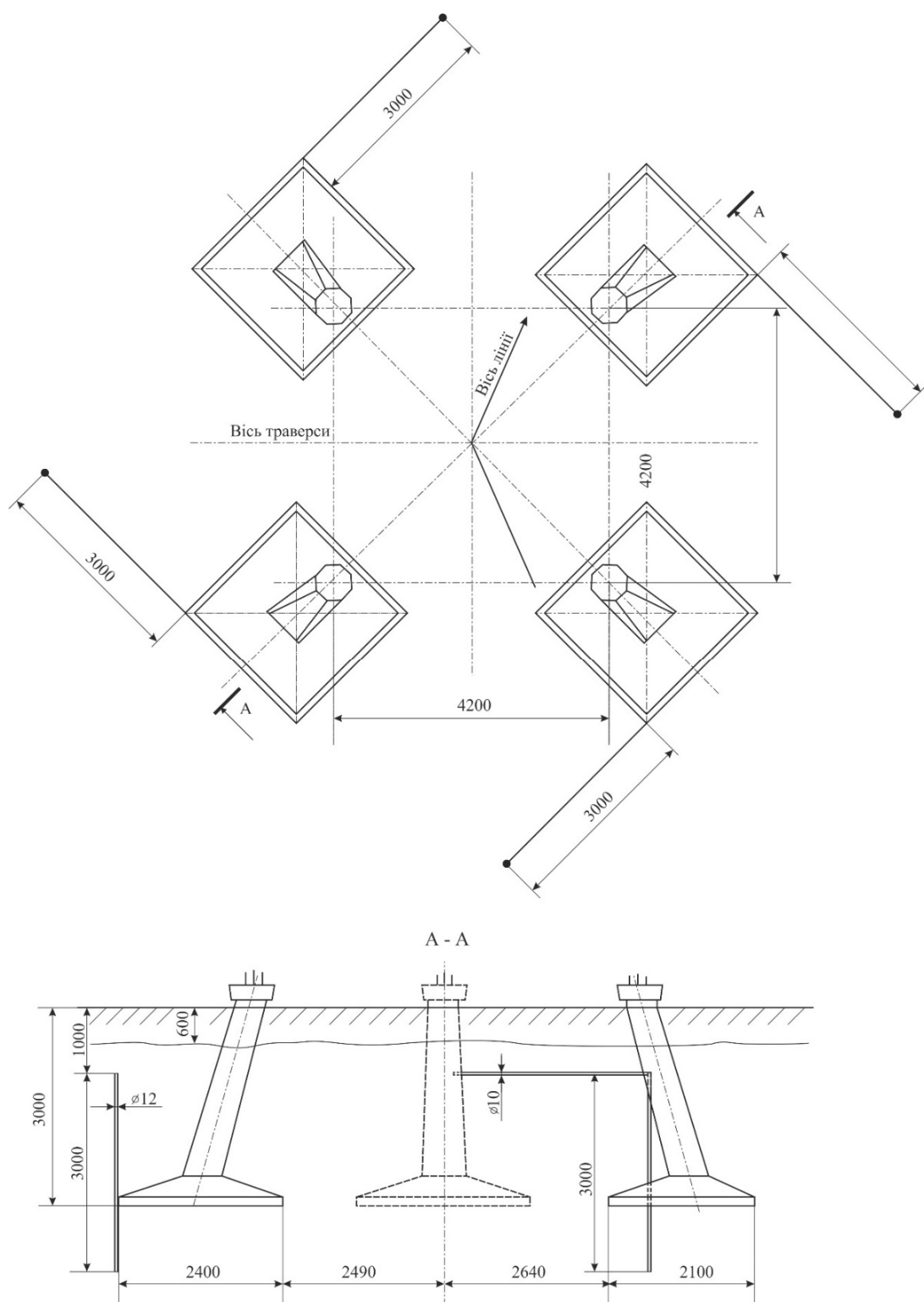


Рисунок 4.2 – Схематичне зображення фундаменту та заземлення опори У-35-1

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних та горизонтальних електродів [71]:

$$\rho_{p.v} = K_{3.v} \cdot \rho_{п} = 1,3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\rho_{p.g} = K_{3.g} \cdot \rho_{п} = 1,6 \cdot 100 = 160 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

де $\rho_{п}$ – питомий опір ґрунту [71];

$K_{3.v}, K_{3.g}$ – коефіцієнти запасу для кліматичної зони 4, приймаємо згідно [71].

Контур заземлення анкерно-кутової опори У-35-1 складається з 2-х заземлювальних пристроїв, що з'єднані паралельно.

Опір розтіканню одного вертикального електроду [71]:

$$\begin{aligned} R_{в.о} &= \frac{\rho_{p.v}}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{2l}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4t_1 + l}{4t_1 - l} \right] = \\ &= \frac{130,0}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot \left[\ln \frac{2,0 \cdot 2}{10,0 \cdot 10^{-3}} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 2,0 + 3}{4 \cdot 2,0 - 3} \right] = 46,3 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина електроду, м;

d – діаметр електроду, м;

t_1 – відстань від поверхні ґрунту до середини електроду [71]:

$$t_1 = t_r + 0,5 \cdot l = 1,0 + 0,5 \cdot 3,0 = 2,5 \text{ м.}$$

Приблизна кількість вертикальних електродів за попередньо прийнятого коефіцієнта використання $K_{i.v} = 0,8$ [71]:

$$n'_{.в} = \frac{R_{в.о}}{K_{i.v} \cdot R_i} = \frac{40,25}{0,8 \cdot 20} = 2,9 \text{ шт.}$$

Розрахунковий опір розтіканню горизонтальних електродів [71]:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{p,\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Gamma} \cdot K_{i,\Gamma}} \cdot \ln \left[\frac{l_{\Gamma}^2}{b \cdot t_{\Gamma}} \right] = \frac{160}{2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 0,7} \cdot \ln \left[\frac{6^2}{10 \cdot 10^{-3}} \right] = 49,7 \text{ Ом.}$$

де $K_{i,\Gamma}$ – коефіцієнт використання горизонтальних електродів.

Уточнене значення бажаного опору вертикальних електродів [71]:

$$R_B = \frac{R_{\Gamma} \cdot R_i}{R_{\Gamma} - R_i} = \frac{49,67 \cdot 20}{49,67 - 20} = 33,5 \text{ Ом.}$$

Остаточна, кількість вертикальних електродів за умови, що коефіцієнт використання дорівнює 0,8:

$$n_B = \frac{R_{B,0}}{K_{i,B,0} \cdot R_B} = \frac{46,3}{0,86 \cdot 33,5} = 1,6 \approx 2 \text{ шт.}$$

Остаточну приймаємо до установки 2 вертикальні електроди, що поміщуються на протилежних кінцях горизонтальних.

Тоді опір вертикальних електродів складе [71]:

$$R_B = \frac{R_{B,0}}{K_{i,B} \cdot n_B} = \frac{46,3}{0,86 \cdot 2} = 26,89 \text{ Ом.}$$

Загальний опір горизонтального та вертикального електродів

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_{\Gamma}}} = \frac{1}{\frac{1}{26,89} + \frac{1}{49,7}} = 17,45 \text{ Ом.}$$

Сумарний опір двох однакових контурів заземлення, що підключені до анкерно-кутової опори паралельно

$$R_{3\Sigma} = 0,5R_3 = 0,5 \cdot 17,5 = 8,8 \text{ Ом.}$$

Виконуємо перевірку

$$R_{3\Sigma} = 8,8 \text{ Ом} < R_{3,\text{доп}} = 10 \text{ Ом.}$$

4.4 Висновки

1. З'ясовано, що найбільш критичними аспектами для безпеки людини при роботі з повітряними лініями є ризик ураження електричним струмом внаслідок контакту з електричними провідниками та вплив електромагнітних полів і випромінювань частотою 50 Гц.

2. Розроблено перелік організаційних і технічних заходів, які сприяють безпеці під час робіт на повітряних лініях 35 кВ. Найважливішими з них є наступні: документування робіт, надання допуску до роботи, відключення ремонтіваних ліній, встановлення переносних заземлень на місці роботи та вивішування запобіжних написів і плакатів.

3. Визначено, що для створення заземлюючого пристрою анкерно-кутової опори У-35-1 з нормативним значенням опору до 10 Ом включно, що розташована на глинистому ґрунті в 4-й кліматичній зоні, достатньо використати чотири горизонтальних та чотири вертикальних електроди довжиною 3 метри кожний.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, яке спрямоване на удосконалення пасивних методів захисту проводів ПЛ 35 кВ, що дозволило підвищити їх експлуатаційну надійність в ожеледний період.

Основні результати полягають у наступному:

1. Встановлено, що 61% повітряних ліній 35 кВ системи передачі практично вичерпали свій експлуатаційний ресурс, а системи розподілу мають параметр потоку відмов, що перевищує проектні значення від 1,29 до 2,1 разів, а існуючі методи їх захисту від ожеледоутворення мають ряд обмежень і потребують удосконалення, шляхом розробки оболонкових методів захисту.

2. Встановлено, що для використання в якості захисного шару покриття проводу повітряної лінії найбільш придатними є матеріали на основі силіконового каучуку або тefлону. Розроблено технічні рекомендації щодо вибору захисного покриття проводу повітряної лінії 35 кВ.

3. Визначено, що коефіцієнт опору форми модифікованого проводу на 7,8% нижчий ніж у стандартного, а вітрове навантаження на модифікований провід у порівнянні зі звичайним АС-70/10 знижується на 7,5 Н на вітровий прогін лінії. Розроблено технічні рекомендації стосовно нанесення захисного покриття на проводи повітряних ліній 35 кВ, що знаходяться в експлуатації.

4. Встановлено, що очікуване підвищення експлуатаційної надійності повітряних ліній напругою 35 кВ, при впровадженні запропонованих технічних заходів, досягається завдяки зниженню потоку відмов від ожеледних та вітрових навантажень на 0,004 1/рік·км.

5. Встановлено, що найбільш небезпечними і шкідливими факторами при експлуатації повітряних ліній для обслуговуючого персоналу є можливість ураження електричним струмом, вплив електромагнітних полів і випромінювань частотою 50 Гц. Розроблено організаційні та технічні заходи, у тому числі заземлювальний пристрій кутової анкерної опори У-35-1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. – Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE): [Електронний ресурс]. URL: <https://www.osce.org/ru/secretariat/293556>).
2. План розвитку системи передачі на 2022-2031 роки. Укренерго, 422 с.
3. Підвищення надійності функціонування розподільних електричних мереж / Р. В. Бондаренко, О. М. Довгалюк, Г. В. Омеляненко, О. Є. Піротті, Т. В. Сиромятнікова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2018. Вип. 195. С. 69-71.
4. Ганус А. И., Старков К. А. Динамика изменения параметра потока отказов линий электропередачи различных номинальных напряжений. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2016. Вип. 175. С. 3-7.
5. Стрелкова Г. Г., Пустовойтов А. М. Технічний стан та перспективи розвитку розподільних електричних мереж України. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку: зб. наук. пр., Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2018. С. 50-51.
6. Ахромкін А. О. Сучасні характеристики електричних мереж України: регіональний аспект. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2015. №6 (223). С. 7-10.
7. Єгорова О. Ю., Мальцев О. Ю. Аналіз сучасного стану повітряних ліній та визначення шляхів підвищення їх надійності. Зб. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. Харків. Обробка інформації в складних технічних системах, Харків: ХНУПС, 2010. Вип. 5(86). С. 35-38.
8. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. Київ : Вид-во «Політехніка», 2017. 456 с.

9. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2020 році. Затверджено: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 26 травня 2021 року №893.

10. Фокин Ю. А. Туфанов В. А. Оценка надежности систем электроснабжения. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с.

11. Наказ Міністерство палива та енергетики України від 09.06.2005 «Про затвердження Інструкції про розслідування і облік технологічних порушень на об'єктах електроенергетики і в об'єднаній енергетичній системі України» №255. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 7 жовтня 2005 р. за №1165/11445: [Електронний ресурс]. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1165-05>

12. Малиновская Т. В., Левит А., Трибушная Л. В. Винницкой области объявлено чрезвычайное положение, а в Одесской и Херсонской парализовано движение автотранспорта/ 2000. 29 ноября. С. 1-2.

13. Дьяков А. Ф. Засыпкин А. С., Левченко И. И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. Пятигорск: из-во РП «Южэнергонадзор», 2000. 284 с.

14. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под. ред И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 768 с.

15. Development of New Ground Wire De-Icing Methods / A. Leblond, S. Montambault, M. St-Louis, R. Beauchemin and ets.: Proc. 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Brno, Czech Republic, June 17-20, 2002.

16. Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks. Canada: Springer Science, Business Media B.V. 381 p.

17. McComber P. A non-circular accretion shape freezing rain model for transmission line icing”. Proc. of the 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2000), Chester. 2000.

18. Blackburn C. Comparative Study of the Quantity of Rime and Glaze Accreted on Free-Rotating and Fixed Overhead Ground Cables: Effect of Anti-Torsion Device /

C. Blackburn, J. L. Laforte, D. Gagnon and et.: Proc. of 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2002), Brno, June, 2002.

19. Засоби гасіння вібрацій і коливань: [Електронний ресурс]. URL: https://www.sicame.com.ua/pdf/gasnyky_vibratsii.pdf

20. Higuchi N. Snow Accumulation Prevention Methods. Hokkaido Electric Power, 1972.

21. Heat producing composition and method of employment: pat. 3535246 USA, ICI1 C 09 K 3/02, C 09 K 3/18. Jr.; applicants and owners USA as represented by the Secretary of the Navy. № 714779; stat. 21.03.68; pub. 20.10.70.

22. Frost-preventive composition: pat. 7744686 USA, ICI(2010). Applicants and owners NOF Corporation, Kanagawa (JP), Chuo Yuka Co. Ltd., Tokyo (JP). № 11/910094; stat. 28.03.2006; pub. 29.06.10.

23. Deicer composition Pat. 3705854 USA, ICI1 C 09 K 3/18. Applicants and owners Osmose Wood Preserving Co. of America Inc. № 11002; fil. 12.02.70; pub. 12.12.72.

24. Гончар М. И., Белаш И. П. Защита проводов от гололёдоизморозевых отложений. Энергетика и электрификация. 1995. №4. С. 26–28.

25. Saotome H., Yoshioika M., Okada K. Countermeasures for Snow Accretion on Conductors. Proc. of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 1988), Paris. 1988.

26. Предложения по применению фторопластовых поверхностных покрытий для снижения массы гололёдно-изморозевых отложений на проводах и грозозащитных тросах / В.Н. Седунов, А. В. Началов, Н.Г. Царанов и др. Электро. №5. 2005. С. 46-48.

27. Спосіб формування протиожиледного покриття на неізольованих проводах та грозозахисних тросах повітряної лінії електропередавання : патент Україна: МПК (2006.01) H02G 7/16. № 138930; заявл. 03.06.2019 ; опубл. 10.12.2019, Бюл. №23.

28. Козловський О. А., Телюта Р. В. Удосконалення конструкції неізольованих проводів Повітряних ліній, що знаходяться в експлуатації. Вісник

Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. Вип. 201. С. 21-22.

29. Improving the operation characteristics of non-insulated overhead power lines / Kozlovskiy and etc. *Elektrotechniczny*. 2022. 98(2). pp. 28–32.

30. Boluk Y. Adhesion of freezing precipitates to aircraft surfaces. Report (Transportation Development Centre on behalf of Civil Aviation Safety and Security Transport Canada No. TP 12860E). Optima Specialty Chemicals and Technology Inc., 1996.

31. Wenzel R. N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1936. Vol. 28, Issue 8. P. 988–994.

32. Cassie A. B. D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*. 1944. Vol. 40. pp. 546–551.

33. Придатко А. В., Миронюк А. В., Сви́дерский В. А. Анализ подходов к математическому описанию характеристик материалов с повышенной гидрофобностью. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. С. 30-41.

34. Roach P., Shirtcliffe N. J., Newton M. I. Progress in superhydrophobic surface development. *Soft Matter*. 2008. Vol. 4. Iss. 2. pp. 224–240.

35. Dynamics of ice nucleation on water repellent surfaces / A. Alizadeh and etc. *Langmuir*. 2012. 28(6). pp. 3180-3186.

36. Tourkine P., Merrer M. Le, Quéré D. Delayed freezing on water repellent materials. *Langmuir*. 2009. 25(13), pp. 7214-7216.

37. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems / C. Antonini. *Cold Regions Sci. Tech*. 2011, 67(1-2), pp. 58- 67.

38. Predictive model for ice formation on superhydrophobic surfaces / V. Bahadur, and etc. *Langmuir*. 2011. 27(23), pp. 14143-14150.

39. Icephobicity. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Icephobicity#cite_note-R8-10

40. Design of Ice-free Nanostructured Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, and etc. *ACS Nano*. 2010 4(12), pp. 7699-7707.

41. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces / K. K. Varanasi and etc. *Applied Physics Letters*. 2010. 97(23).
42. Coatings for protecting overhead power network equipment in winter conditions. SIGRE. Working Group B2.44. September 2015, 115 p.
43. Nosonovsky M., Hejazi V. I., Nosonovsky M. Why superhydrophobic surfaces are not always icephobic. *ACS Nano*. 2012. 6 (10): 8488–8913.
44. Croutch V. K., Hartley R. A. Adhesion of ice to coatings and the performance of ice release coatings. *Journal of Coatings Technology*. 2009. Vol. 64. pp. 41-53.
45. Mulherin N.D., Haehnel R. B. Progress in Evaluating Surface Coatings for Icing Control at Corps Hydraulic Structures. *Ice Engineering*, Technical Note 03-4, October 2003.
46. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials / S. Yang and etc. *Appl. Surf. Sci.* 2011. 257. pp. 4956–4962.
47. Evaluation of icephobic coatings – screening of different coatings and influence of roughness / M. Susoff, K. Siegmann, C. Pfaffenroth, M. Hirayama. *Appl. Surf. Sci.* 2013. 282. pp. 870–879.
48. Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade / C. Peng and etc. *Appl. Surf. Sci.* 2012. 259. pp. 764–768.
49. Preparation of a durable superhydrophobic membrane by electrospinning poly (vinylidene fluoride) (PVDF) mixed with epoxy-siloxane modified SiO₂ nanoparticles / S. Wang end etc. *Colloid Interface Sci.* 2011. 359 (2). pp. 380–388.
50. Basu B. B., Paranthaman A. K. A simple method for the preparation of superhydrophobic PVDF–HMFS hybrid composite coatings. *Appl. Surf. Sci.* 255. 2009. pp. 4479–4483.
51. Icephobicity of polydimethylsiloxane-b-poly (fluorinated acrylate), *Thin Solid* / H. Li and etc. *Films*. 2014. 573. pp. 67–73.
52. Kulinich S. A., Farzaneh M. Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces / S.A. Kulinich. *Appl. Surf. Sci.* 2009. 255. pp. 8153–8157.
53. Designing durable icephobic surfaces / K. Golovin and etc. *Adv. Sci.* 2016. 2. pp. 1–12.

54. Dotan A., Dodiuk H., Laforte C., Kenig S. The relationship between water wetting and ice adhesion. *J. Adhes. Sci. Technol.* 2009. 23. pp. 1907–1915.
55. Hirayam M., Activated poly (hydromethylsiloxane) as novel adhesion promoters for metallic surfaces. *J. Adhes.* 2000. 72 (1). pp. 51–63.
56. Yazdanshenas M. E., Shateri-Khalilabad K. One-step synthesis of superhydrophobic coating on cotton fabric by ultrasonic irradiation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013. 52. pp. 12846–12854.
57. Anti-icing performance of a superhydrophobic PDMS/modified nano-silica hybrid coating for insulations / J. Li and etc. *Technol.* 2012. 26. pp. 665–679.
58. Anti-icing superhydrophobic coatings / L. Cao and etc. *Langmuir.* 2009. 25 (21). pp. 12444–12448.
59. Ebert D., Bhushan B. Transparent, superhydrophobic, and wear-resistant coatings on glass and polymer substrates using SiO₂, ZnO, and ITO. *Langmuir.* 2012. 28. – pp. 11391–11399.
60. Boinovich L. B., Emelyanenko A. M. Anti-icing potential of superhydrophobic coatings. *Commun.* 2013. 23. pp. 3–10.
61. Bascom W. D., Cottington R. L., Singleterry C. R. Ice adhesion to hydrophilic and hydrophobic surfaces. *Journal of Adhesion.* 1969. Vol. 1. pp. 246-263.
62. Oil-infused superhydrophobic silicone material for low ice adhesion with long-term infusion stability / Y.H. Yeong, C. Wang, K.J. Wynne, M.C. Gupta. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016. 8. pp.32050–32059.
63. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires. *SIGRE. Working Group B2.29.*
64. ДСТУ 839-80. Проводи неізолювані для повітряних ліній електропередачі. Технічні умови. Зі змінами № 1, 2.
65. Limiting windstorm effects on tower by the « low drag » cable / J. I. Lilien, and etc. Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/277210991_Limiting_windstorm_effects_on_tower_by_the_low_drag_cable.
66. SolidWorks Flow Simulation 2020. Technical Reference, 2020. 138 p.

67. Ravindran M. R. Computational study for analysis of the potential for drag reduction for flow around a circular cylinder and cactus-shaped cylinders. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015, №4. pp. 13-24.
68. Patankar S., Patankar. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington DC Hemisphere: CRC Press, 1980. 197 p.
69. Правила улаштування електроустановок. Х.: Вид-во «Форт», 2017.
70. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. НПАОП 40.1-1.21-98.
71. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Под. общ. ред. А. А. Федорова и Г. В. Сербиновского. М.: Энергия, 1980. 576 с.