

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КОЗЛОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР АНТОНОВИЧ

УДК 621.315.175

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ
В УМОВАХ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Кропивницький.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Орлович Анатолій Юхимович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
професор кафедри електротехнічних систем
та енергетичного менеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Говоров Пилип Парамонович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
професор кафедри світлотехніки і джерел світла

кандидат технічних наук, доцент
Савченко Олександр Анатолійович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
доцент кафедри електропостачання та енергетичного
менеджменту

Захист відбудеться « 7 » вересня 2017 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий « 1 » серпня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. Ю. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Повітряні лінії електропередавання – це найбільш чутлива до атмосферних навантажень ланка енергосистеми. Так, за даними статистики, 85% випадків руйнування наземних ліній електропередавання відбувається внаслідок дії наднормативних ожеледно-вітрових навантажень.

Екстремальні навантаження, що витримує конструкція повітряної лінії під дією атмосферних факторів, враховуються за допомогою коефіцієнта запасу міцності, залежно від заданого середнього періоду повторюваності найбільш несприятливих сполучень погодних умов для даної місцевості на основі карт кліматичного районування. Однак у теперішніх умовах зміни клімату нівелюють передбачений запас міцності. Крім того, в експлуатації знаходиться значна кількість повітряних ліній розподільних електромереж, що побудовані за умовами 5-річної повторюваності ожеледно-вітрових навантажень. Тому вони виявляються найбільш вразливими до дії атмосферних навантажень, що підтверджується статистичними даними.

Виходом з даної ситуації, що забезпечить надійну роботу повітряних ліній електропередавання, є усунення короточасних наднормативних ожеледно-вітрових навантажень за допомогою плавки ожеледі струмами штучного короткого замикання.

Для підвищення ефективності захисту електричних мереж електропостачальні компанії використовують комплексні інформаційні системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях електропередавання. Але ці системи потребують подальшого удосконалення первинних вимірювальних перетворювачів та алгоритмів прогнозування ожеледоутворення, а також розширення їх функціональних можливостей за рахунок використання локальних інформаційних систем прогнозування обледеніння та раннього підтвердження появи ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній. Тому доцільним є шлях створення систем моніторингу стану, в основу яких покладено сучасні методи прогнозування та контролю ожеледно-паморозевих відкладень з можливістю їх апаратної та програмної інтеграції до комплексу технічних засобів платформи Smart Grid.

Таким чином, вирішення науково-практичної задачі розробки систем моніторингу стану повітряних ліній як однієї зі складових підвищення ефективності експлуатації наземних електромереж України в умовах ожеледоутворення є актуальним та визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету в рамках науково-дослідних робіт МОН України: «Діагностування ожеледоутворення на повітряних лініях розподільних електричних мереж» (№ ДР 0115U003186), «Розробка енергозберігаючих режимів та енергетичного контролю для промисловості» (№ ДР 0103U006105) та госпдоговірної науково-дослідної роботи «Дослідження електромагнітної сумісності та підвищення надійності роботи електричних мереж та підстанцій» (ПАТ «Кіровоградобленерго», м. Кіровоград), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є зниження відмов у електропостачанні на основі впровадження інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній розподільних електричних мереж при ожеледно-вітрових явищах на базі розроблених методів та технічних засобів їх реалізації.

Для досягнення мети поставлені завдання:

- провести аналіз досвіду експлуатації повітряних ліній електропередавання та методів підвищення їх надійності при ожеледно-вітрових явищах;
- розробити метод прогнозування ожеледоутворення на повітряних лініях електропередавання;
- провести експериментальні дослідження теплових режимів неізольованих проводів повітряних ліній електропередавання перед процесом ожеледоутворення;
- створити вимірювальний перетворювач ожеледоутворення на проводі;
- розробити технічні рекомендації щодо побудови інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення.

Об'єкт дослідження – процес утворення ожеледно-паморозевих відкладень на повітряних лініях електропередавання.

Предмет дослідження – електричні та теплові параметри ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід до проведення теоретичних та експериментальних досліджень, що базуються на використанні теорії тепломасообміну, теорії диференціального та інтегрального числення, методів твердотільного моделювання, математичних методів і обчислювального експерименту в задачах теплопередачі, класичних методів вимірювання електричних та метеорологічних параметрів при проведенні експерименту і статистичної теорії обробки результатів експерименту. Комп'ютерне моделювання проводилося у програмному комплексі SolidWorks.

Наукова новизна одержаних результатів:

- уперше науково обґрунтовано використання часу штучного охолодження ділянки контрольованого проводу як первинного інформативного параметру початку ожеледоутворення, що дозволяє підвищити точність методів прогнозування процесу утворення ожеледно-паморозевих відкладень;

- уперше розроблено метод прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електропередавання, який полягає в контролі зміни тривалості інтервалів часу при циклічному штучному охолодженні контрольованої ділянки проводу зі сталою швидкістю, що дозволяє скоротити час прийняття експлуатаційним персоналом рішень щодо проведення заходів захисту повітряних ліній;

- отримав подальший розвиток метод визначення появи ожеледно-паморозевих відкладень, який, на відміну від відомих, враховує параметри проводу повітряної лінії, що дозволяє зменшити розміри первинних вимірювальних перетворювачів і на ранній стадії фіксувати початок ожеледоутворення шляхом контролю електричного опору між електродами, утвореними з дротин верхнього повиву ділянки неізольованого проводу повітряних ліній електропередавання;

– розроблено узагальнену математичну модель роботи вимірювального перетворювача для інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення, що дозволило врахувати параметри навколишнього середовища при проведенні його теплового аналізу.

Практичне значення отриманих результатів роботи для електроенергетичної галузі полягає в розробці алгоритму прогнозування часу появи ожеледно-паморозевих відкладень. Створена електронна модель вимірювального перетворювача ожеледоутворення була використана при розробці мікроконтролерного блоку і вимірювального перетворювача інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення. Розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній розподільних електричних мереж в умовах ожеледоутворення. Ефективність результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджено експериментальними випробуваннями, проведеними під час експлуатації повітряних ліній розподільних мереж 10 кВ загальною довжиною 84,5 км, що входять до зони обслуговування однієї підстанції 35/10 кВ ПАТ «Кіровоградобленерго».

Результати даної роботи впроваджені в ПАТ «Кіровоградобленерго» та використовуються в навчальному процесі кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету в курсах лекцій та лабораторних робіт із дисциплін «Електричні системи та мережі», «Основи електропостачання».

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Серед них: дослідження сучасних методів і засобів підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній в умовах ожеледоутворення; обґрунтування використання часу штучного охолодження ділянки контрольованого проводу як первинного інформативного параметра ожеледоутворення; зробка методу прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електропередавання з інтервальною оцінкою; удосконалення методу визначення ранньої появи ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії; розробка чисельної моделі вимірювального перетворювача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи заслуговувалися й обговорювалися на: VII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів» (с.м.т. Славське, 2002 р.); XIV-й науково-технічній конференції з участю закордонних спеціалістів «Датчики и преобразователи, информации систем измерения, контроля и управления» (м. Судак, 2002 р.); VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів» (с.м.т. Славське, 2003 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергозбереження та автоматизація в промисловості та сільському господарстві» (м. Кіровоград, 2004 р.); V-й Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств» (м. Маріуполь, 2005 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2010 р.); 16-й Міжнародній науково-технічній конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» (с.м.т. Славське, 2011 р.); XVII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» (с.м.т. Славське, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Автоматика та енергозберігаючі технології» (м. Кіровоград, 2012 р.); XVI-й Міжнародній конференції «Computational Problems of Electrical

Engineering» (м. Львів, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (м. Кіровоград, 2015 р.); щорічних наукових конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Кіровоградського національного технічного університету (м. Кіровоград, 2000–2016 рр.).

Публікації. Основний зміст, наукові положення та результати дисертації відображено у 19 наукових публікаціях, з яких: 9 – у наукових фахових виданнях України (3 статті – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 5 – патентів України, 5 – у матеріалах конференцій (1 – у виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 217 сторінок; з них 33 рисунки по тексту; 24 рисунки на окремих 19 сторінках; 11 таблиць по тексту; 1 таблиця на окремій 1 сторінці; списку використаних джерел зі 151 найменування на 16 сторінках, 8 додатків на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи та її зв'язок з науково-дослідними роботами; сформульовано мету й основні задачі дослідження; визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів та засобів підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення.

Досвід експлуатації повітряних ліній в Україні свідчить, що найчастіше ожеледо-небезпечна ситуація одночасно виникає в 1-3 областях, рідше – у 4 і більше. Максимум технологічних порушень у роботі повітряних ліній припадає на розподільні електричні мережі (рис. 1). Аналіз причин технологічних порушень при експлуатації повітряних ліній електропередавання за елементами показує, що 30...35% з них складають ушкодження опор, а решта – електропроводів та ізоляторів, причому 85% руйнування повітряних ліній відбувається за наднормативної ожеледі. Основними причинами ушкоджень повітряних ліній є: надрозрахункові механічні навантаження; відсутність встановлених засобів захисту проводів і грозозахисних тросів від ожеледно-вітрових навантажень або неоптимальне їх використання; неякісна експлуатація; закінчення розрахункового строку експлуатації; помилки проектування та ін.

У результаті проведеної систематизації методів і технічних засобів підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній в умовах ожеледоутворення виявлено, що незважаючи на економічну доцільність активних методів, їх дієвість цілком визначається своєчасністю проведення. Напрямом удосконалення цих методів є впровадження в електричних мережах енергопостачальних компаній комплексних інформаційних систем моніторингу ожеледоутворення. Перспективним є спрямування зусиль на покращення алгоритмів прогнозування ожеледоутворення, первинних вимірювальних перетворювачів і локальних інформаційних систем.

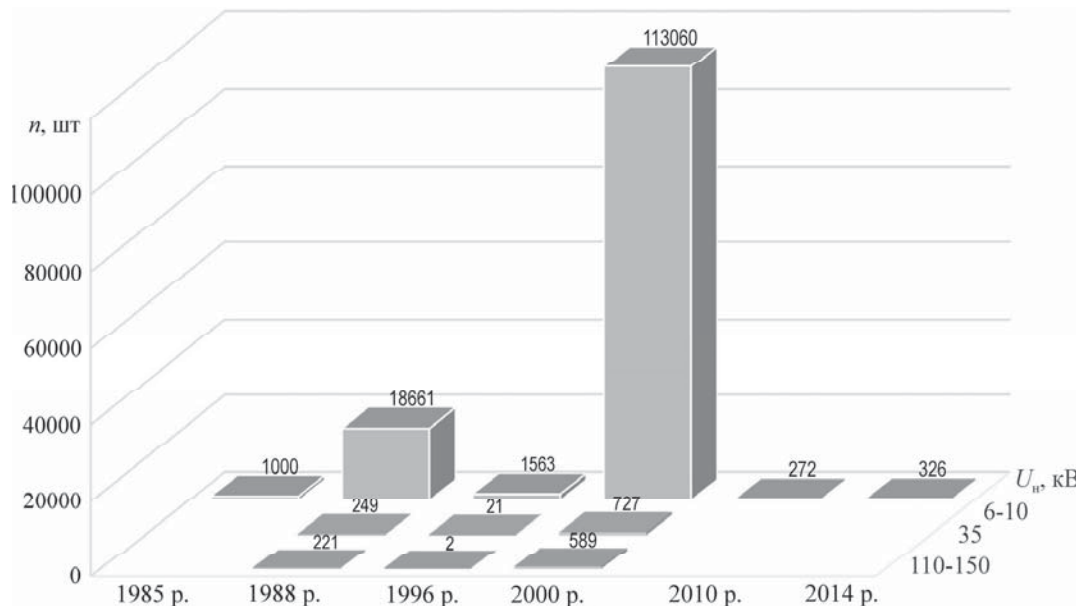


Рисунок 1 – Кількість ушкоджених електроопор n у суттєвих ожеледно-вітрових аваріях 1985–2014 рр. за класами напруги U_n

Тому на практиці ушкодження повітряних ліній починаються раніше, ніж вдається усунути ожеледь, а повідомлення про початок ожеледоутворення з контрольних постів у більшості випадків значно запізнюються і часто бувають недостовірними. Таким чином, відсутність оперативної інформації про стан повітряної лінії в зоні ожеледоутворення не дозволяє черговому персоналу своєчасно приймати правильні рішення щодо проведення заходів захисту, що призводить до зростання витрати часу на прийняття рішень.

На підставі проведеного дослідження й аналізу стану задачі підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній розподільних електричних мереж в умовах ожеледоутворення обґрунтовано необхідність удосконалення методів прогнозування процесу утворення ожеледно-паморозевих відкладень та показана доцільність розробки інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній.

У **другому розділі** проведено теоретичні дослідження інструментального методу прогнозування ожеледоутворення на базі аналізу існуючих методів прогнозування ожеледоутворення, обґрунтованого первинного інформативного параметра і моделі прогнозування часу утворення ожеледно-паморозевих відкладень.

Виявлено, що найбільш придатним для прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній є інструментальний метод, оскільки при прогнозуванні враховуються параметри проводу. Однак його точність залежить від взятого за основу первинного інформативного параметра та способу аналізу отриманих даних.

Утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії електропередавання відбувається внаслідок сублімації водяної пари і/або гравітаційного осідання переохолоджених крапель води. В обох випадках водяна пара або краплі води проходять через один із метастабільних станів: «пара – переохолоджена пара – кристал», «рідина – переохолоджена рідина – кристал». Метастабільний стан цієї системи є термодинамічно нерівноважним і характеризується ентропією S .

При фазовому переході відбувається зміна ентропії системи

$$\Delta S = -Q_3/T_2,$$

де $\Delta S = S - S_0$, Дж/К; S_0 – ентропія системи у стані рівноваги, Дж/К; Q_3 – енергія зовнішнього джерела при зворотному процесі, Дж; T_2 – температура нової фази, К.

Отже, утворення природних ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії, що знаходиться в замкнутій системі і термічно врівноважений з нею, можливо діагностувати за зміною величини витраченої енергії Q_3 (або за часом роботи джерела охолодження τ_{fr} , за умови постійної потужності охолодження $P_{fr} = \text{const}$) при періодичному штучному охолодженні проводу до появи на ньому ожеледно-паморозевих відкладень.

Для аналітичного обґрунтування τ_{fr} як первинного інформативного параметра визначено закон зміни температури ділянки проводу повітряної лінії в часі. Проаналізовано два характерних випадки, що передують ожеледоутворенню на проводі:

- 1) поверхня проводу змочується дощем;
- 2) провід знаходиться у вологому повітрі.

Аналітичні вирази для визначення часу штучного охолодження отримано шляхом розв'язання диференційного рівняння теплового балансу ділянки проводу з урахуванням потужностей: внутрішніх джерел нагріву (електричний струм), внутрішніх джерел охолодження (штучне охолодження), зовнішніх джерел (ділянка проводу набуває (втрачає) потужність від дії дощу), яке описується рівнянням

$$mc \frac{dt(\tau)}{d\tau} = q_{V.h} V - q_{V.fr} V - h_c S [t(\tau) - t_a] - m_w c_w [t(\tau) - t_{dr}] S_{p.a}, \quad (1)$$

де m – маса ділянки проводу, кг; c – теплоємність проводу, Дж/кг·°С; $q_{V.h(fr)}$ – потужність внутрішніх джерел теплоти, що представляє собою кількість теплоти, яка виділяється (поглинається) джерелами (стоками) в одиниці об'єму тіла за одиницю часу, Вт/м³; V – об'єм ділянки проводу, м³; h_c – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/м²·°С; S – площа поверхні ділянки проводу на площину, паралельну її вісі, м² (площею поверхні торців знехтувано); $t(\tau)$ – температура ділянки проводу в момент часу τ , °С; t_a – температура повітря, °С; t_{dr} – температура крапель, °С; m_w – маса води, що потрапляє на одиницю площі проводу за одиницю часу, кг/с·м²; c_w – теплоємність води, Дж/кг·°С; $S_{p.a}$ – площа проекції поверхні ділянки проводу, м².

У результаті розв'язання рівняння (1) із врахуванням початкових умов отримується вираз для визначення первинного інформативного параметра, а саме необхідної тривалості штучного охолодження ділянки проводу до моменту появи штучних ожеледних відкладень

$$\tau_{fr} = -T_0 \ln \left(1 - \frac{\Delta T}{\Theta_{st}} \right), \quad (2)$$

де T_0 – стала часу нагріву (охолодження) ділянки проводу

$$T_0 = \frac{mc}{h_c S + m_w c_w S_{p.a}};$$

ΔT – різниця між температурою замерзання (кристалізації) води на проводі та температурою повітря, $\Delta T = t_{fr} - t_a$;

Θ_{st} – усталене значення температури переохолодження ділянки проводу

$$\Theta_{st} = \frac{P_j - P_{fr} + m_w c_w S_{p.a} (t_a + t_{dr})}{h_c S + m_w c_w S_{p.a}},$$

P_j , P_{fr} – потужність, відповідно, внутрішніх джерел нагріву та охолодження, Вт.

За умов відсутності дощу (другий випадок) очевидно, що величина $m_w = 0$. При цьому параметр t_{fr} для даного випадку є температурою точки роси (льоду) – t_f . Зважаючи на це, рішення (2) має вигляд

$$\tau_{fr} = -\frac{mc}{h_c S} \ln \left(1 + \frac{h_c S (\beta_{w(i)} + t_a)^2 \ln \varphi_a}{(P_j - P_{fr}) (t_a \ln \varphi_a + \beta_{w(i)} \ln \varphi_a - \alpha_{w(i)} \beta_{w(i)})} \right), \quad (3)$$

де φ_a – відносна вологість повітря, в.о.; $\alpha_w = 17,5043$ і $\beta_w = 241,2^\circ\text{C}$ – постійні для води; $\alpha_i = 22,4893$ і $\beta_i = 272,881^\circ\text{C}$ – постійні для льоду.

Графічна інтерпретація розв'язку рівняння (2) представлена на рис. 2, а на рис. 3 представлено графік залежності відносного часу охолодження $\tau_{fr*} = \tau_{fr}/T_0$ від відносної температури переохолодження $\Theta_* = \Delta T/\Theta_{st}$.

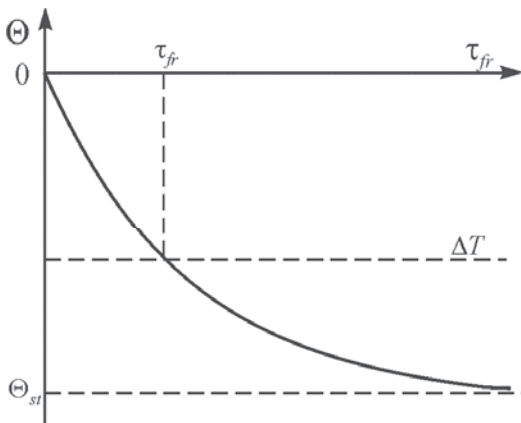


Рисунок 2 – Графічна інтерпретація розв'язку рівняння (2)

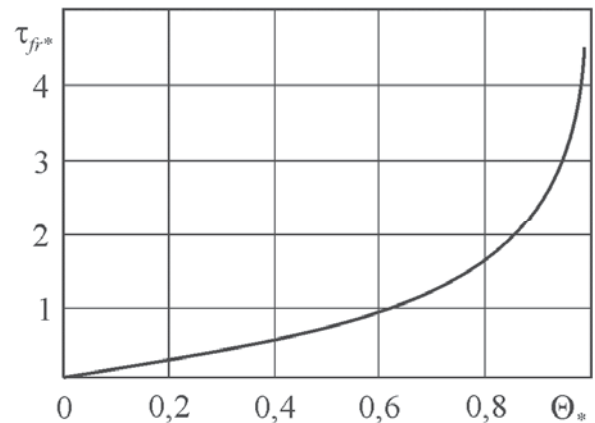


Рисунок 3 – Графік залежності $\tau_{fr*} = f(\Theta_*)$

Визначення часу природного ожеледоутворення виконується на основі аналізу дискретного динамічного ряду $\{\tau_{fr,\tau}\}$, який розглядається як сукупність двох складових: квазідетермінованої функції (тренду) – $\varphi_i = f(\tau_{fr,i})$ і послідовності незалежних, центрованих, випадкових величин – ε_i . Для аналітичного опису його тренду використано лінійну модель регресії $\hat{\tau}_{fr} = b_0 + b_1\tau$. Коефіцієнти b_0 , b_1 визначаються за допомогою зваженого методу найменших квадратів по m останніх рівнях ряду $\{\tau_{fr,\tau}\}$.

Час появи ожеледно-паморозевих відкладень ($\tau_{fr,\tau} = 0$) визначається з виразу

$$\hat{\tau}_{ic} = \frac{-b_0}{b_1}, \quad (4)$$

де b_0 – постійний член рівняння; b_1 – кутовий коефіцієнт прямої $\hat{\tau}_{fr}$.

Оцінки надійності отриманого значення $\hat{\tau}_{ic}$ визначалися як $100(1-\alpha)\%$ -ві, відповідно, ліва τ_L та права τ_R фідучіальні межі (рис. 4)

$$\tau_{L,R} = \frac{d\bar{\tau} + \frac{b_0}{b_1} \pm \frac{ts}{b_1} \sqrt{\frac{(b_0 + b_1\bar{\tau})^2}{S_{xx}b_1^2} - \frac{d-1}{n+k}}}{d-1}, \quad (5)$$

де S_{xx} – сума квадратів відхилень відносно загального середнього; t – звичайна відсоткова точка для t – критерію; $\bar{\tau}$ – середнє значення відліків поточного часу, с; d – параметр; k – ціле число; s^2 – оцінка дисперсії відносно регресії, що базується на двох степенях свободи ($n-2$); n – кількість рівнів динамічного ряду.

Оцінка точності моделі проводилася за фактичними значеннями прогнозованого показника. У якості оцінок точності прогнозу використані: середня відсоткова похибка (MPE), середньоквадратична похибка ($RMSE$), середня абсолютна похибка (MAE) і середня абсолютна похибка у відсотках ($MAPE$).

Тестування прогнозової моделі проведено на основі експериментальних дискретних динамічних рядів $\{\tau_{fr,\tau}\}$ за умов утворення паморозі та ожеледі (рис. 5).

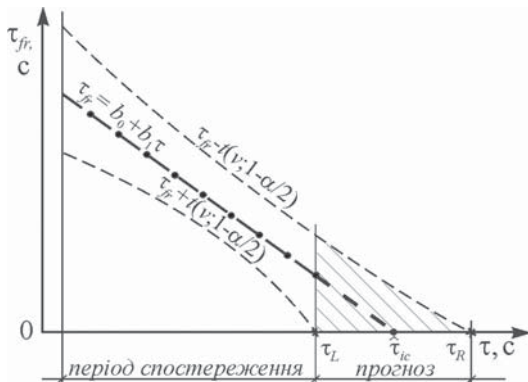


Рисунок 4 – Фідучіальні межі прогнозного часу утворення ожеледно-паморозевих відкладень

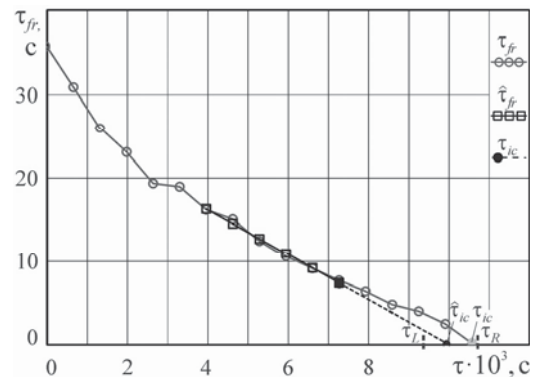


Рисунок 5 – Приклад прогнозу часу появи паморозі

Точність вимірювання інформативного параметра значною мірою залежить від точності фіксації моменту ожеледоутворення. Однак існуючим первинним вимірювальним перетворювачами притаманний ряд недоліків, що унеможлиблює їх застосування для визначення $\tau_{fr.\tau}$.

Основою розробленого первинного вимірювального перетворювача (рис. 6, б) є ділянка проводу типу А(АС) з довжиною робочої частини, що пропорційна кроку повиву проводу контрольованої лінії електропередавання. Для фіксації появи ожеледно-паморозевих відкладень одна з його дрітин електрично ізольована від інших.

При збереженні точності вимірювань довжину первинного вимірювального перетворювача можливо скоротити, збільшивши кількість ізольованих електродів m , за умови рівності центральних кутів α між ними (рис. 7). Із розв'язку рівняння циліндричної гвинтової лінії при заданих обмеженнях отримано вираз його мінімальної довжини за умови гарантованого перекриття електродів ожеледною доріжкою

$$l_{\min} = h - \frac{kh}{m}, \quad (6)$$

де h – крок гвинтової лінії проводу, м; k – параметр, $k = 0, 1, \dots, m-1$; m – кількість ізольованих електродів.

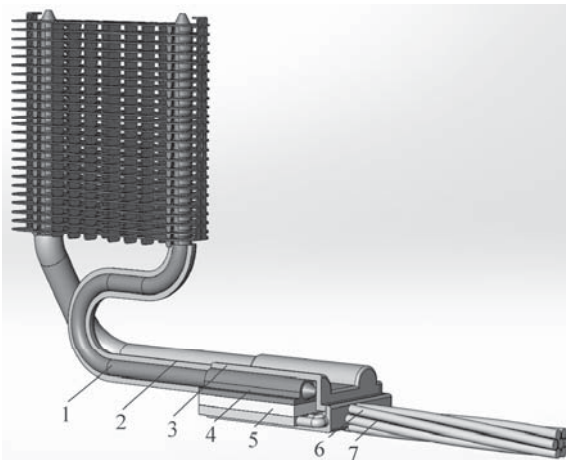


Рисунок 6 – Конструкція вимірювального перетворювача

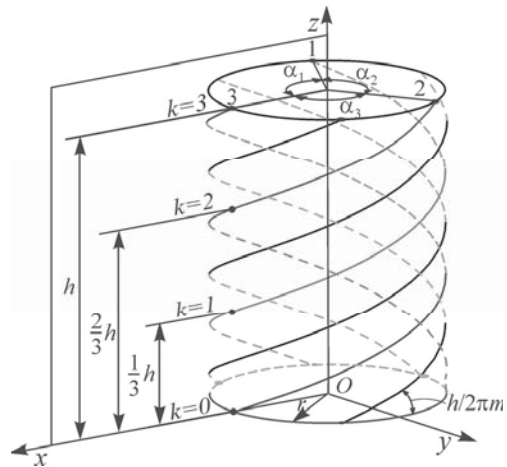


Рисунок 7 – Геометрична модель первинного вимірювального перетворювача
($m = 3$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 120^\circ$)

У третьому розділі наведені результати експериментальних досліджень процесів утворення ожеледно-паморозевих відкладень на неізолюваних проводах повітряних ліній електропередавання.

Моделювання процесів ожеледоутворення зразків проводилося за допомогою експериментальної установки, створеної на основі кліматичної камери Ungermann BHS 1880. Зразки проводу, первинні вимірювальні перетворювачі температури та вимірювальний перетворювач відносної вологості повітря розміщувалися в аеробоксі. Для зменшення турбулентності поблизу зразків проводу проведено їх комп'ютерне моделювання у програмному комплексі SolidWorks. Визначено оптимальні відстані

безпосередньо між зразками ($6,52d_{\text{пр}}$, де $d_{\text{пр}}$ – діаметр проводу АС-50/8) та зразком і ближчою стінкою аеробоксу ($3,26d_{\text{пр}}$). Для рівномірного охолодження досліджуваного зразка проводу використовувався холодоносіє – 50% (за масою) розчин пропіленгліколю $\text{C}_3\text{H}_7(\text{OH})_2$ у дистильованій воді, з температурою замерзання -40°C . Реєстрація змін у часі параметрів зразків проводу та середовища навколо них (температур, відносної вологості повітря та ін.) здійснена автоматизованою системою збору експериментальних даних на базі універсального вимірювача-регулятора ТРМ-138. Візуальний контроль вимірюваних та розрахованих параметрів, їх аналіз та архівування проводилося за допомогою проекту, розробленого в SCADA-системі – Master SCADA RT32.

Експериментальні дослідження проводились на підготовлених модифікованому та незмінному зразках проводу АС-50/8. У модифікованому зразку дробини зовнішнього шару були герметизовані, а центральна жила – видалена. Фіксація початку утворення ожеледно-паморозевих відкладень на модифікованому зразку проводу здійснювалася шляхом контролю електричного опору між багатодрововим та однодротовим електродами. Для цього одна з дробин проводу ізолювана від інших за допомогою тefлонової ізоляції.

Для визначення моменту утворення ожеледно-паморозевих відкладень на первинному вимірювальному перетворювачі проведено дві серії вимірювань його омичного опору R_{tr} при температурі поверхні $t_{\text{пп}} \leq -9,0^\circ\text{C}$ для паморозі і $t_{\text{пп}} \geq -0,8^\circ\text{C}$ для льоду, при швидкості повітря 4 м/с. За допомогою критерію Пірсона перевірено гіпотезу про нормальний закон розподілу R_{tr} . Умова $\chi_{\text{експ}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$ виконується для рівня значимості $\alpha = 5\%$. Порогові значення R_{tr} визначені за правилом 3σ , але замість σ використана незміщена оцінка середньоквадратичного відхилення випадкового опору $\bar{S}_{tr}$, і при довірчій ймовірності 0,955 склали: для паморозі – $454,3 \leq R_{tr.I} \leq 542,2$ МОм; для льоду – $16,5 \leq R_{tr.II} \leq 21,0$ МОм.

Для експериментального підтвердження запропонованого інформативного параметра τ_{fr} проводилось моделювання процесів утворення паморозі та ожеледі. На рис. 8 представлено теоретичні та експериментальні дискретні динамічні ряди різниці температур повітря і точки льоду а), в) та часу охолодження ділянки зміненого зразка проводу АС-50/8 при його штучному охолодженні б), г). В обох випадках тренди динамічних рядів при наближенні ожеледної ситуації до точки ожеледоутворення (точка А) мають характер, близький до лінійного. Для експериментальних даних була розрахована стандартна похибка $m = \sqrt{\bar{S}^2/n}$, де $\bar{S}^2$ – дисперсія емпіричного розподілу; n – кількість рівнів динамічного ряду.

Статистична адекватність залежностей (2), (3) встановлювалась за допомогою критерію Фішера і визнана адекватною експериментальним даним для обох видів ожеледоутворення (умова $F_{\text{експ}} < F_{\text{кр}}$ виконується для рівня значимості $\alpha = 5\%$). Розходження дослідних та експериментальних даних склало від 2% до 10% у межах 2 годин від початку експерименту.

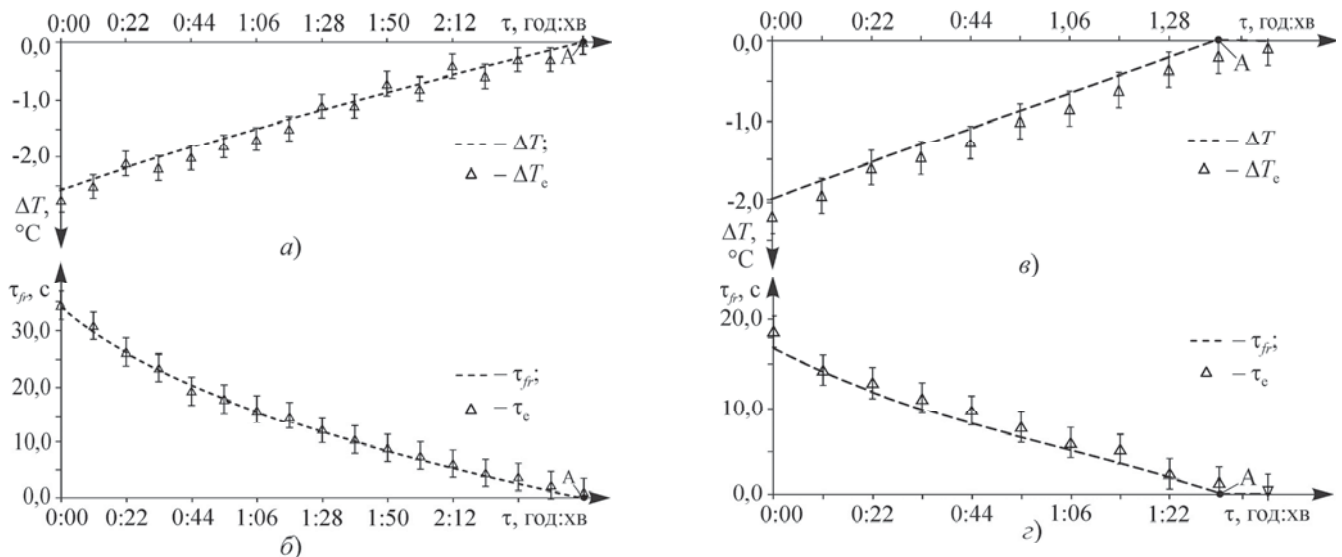


Рисунок 8 – Теоретичні та експериментальні дискретні динамічні ряди:

а), б) за умов утворення паморозі;
в), г) за умов утворення ожеледі.

У **четвертому розділі** обґрунтовано конструкцію вимірювального перетворювача та проведено чисельне моделювання його функціонування.

На основі обраного підходу моніторингу стану повітряної лінії обґрунтовано конструкцію вимірювального перетворювача (рис. 6), що включає в себе первинний вимірювальний перетворювач 6, холодоприймач 5, мідний теплоприймач 3, дві теплові трубки 2 з мідним радіатором, теплоізоляцію 1, електроізоляційні вставки 7. Охолодження (нагрів) його вимірювальної частини здійснюється за допомогою термоелектричного модуля 4. Перетворювач розміщується на мінімально безпечній відстані від паралельно проводу повітряної лінії електропередавання. Для визначення теплових та електричних параметрів вимірювального перетворювача було розроблено його комп'ютерну модель у програмному комплексі SolidWorks. Моделювання проводилось для вимірювального перетворювача зі встановленим термоелектричним модулем CP-1,4-127-06L з довжиною первинного вимірювального перетворювача 82,5 мм, виконаного з проводу AC-50/8 за наступних граничних умов:

- гідродинамічних: перетворювач у потоці нерухомий – $\Omega = 0$ м/с; швидкість повітря на вході вздовж координати x – $v_{a,x} = 10$ м/с при тиску $p_a = 101325$ Па; турбулентність повітряного потоку – 0,1%; сила тяжіння – $9,81$ м/с²;

- теплових: температура повітря – $t_a = 2,05$ °С, початкова температура вимірювального перетворювача – $t_w = 2,05$ °С, теплоізоляція тіл – *Ideal Wall*. Вказані умови характерні для найбільш несприятливого теплового режиму роботи перетворювача.

Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 9–11. Як видно з отриманої розрахункової термограми (рис. 9), найбільш холодною частиною первинного вимірювального перетворювача є місце контакту з термоелектричним модулем. За довжиною первинного вимірювального перетворювача температура підвищується і є максимальною в першій контрольній точці: $t_1 = -9$ °С. Температура радіатора максимальна в місцях контакту з тепловими трубками. Встановлено, що відведене від термоелектричного модуля тепло не впливає на первинний вимірювальний

перетворювач, що підтвердило правильність прийнятих конструктивних рішень. Для заданих умов було визначено діапазон оптимальних значень сили струму термоелектричного модуля для режиму охолодження. При заданому тепловому навантаженні термоелектричного модуля та найскладніших метеоумовах найкраща ефективність охолодження досягається при струмі живлення $4,0 \div 5,0$ А (рис. 10). Моделювання процесу охолодження первинного вимірювального перетворювача показало, що час охолодження до замерзання (кристалізації) води при збільшенні струму термоелектричного модуля лінійно зменшується і є мінімальним при робочому струмі 4,5 А (рис. 11).

У п'ятому розділі на базі проведених досліджень представлено технічну реалізацію інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення та проведено її техніко-економічну оцінку.

Структурна схема розробленої інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній складається з трьох ієрархічних рівнів (рис. 12). Рівень об'єктів контролю утворює множина блоків збору даних (БЗД), що розміщуються на контрольованих повітряних лініях електропередавання або на підстанціях 35/10 кВ. Регіональний рівень системи складає комунікаційне обладнання – центр збору та обробки даних. Його основними компонентами є сервер додатків, сервер баз даних (БД) та ядро системи. Даний рівень забезпечує прийом інформації від блоків збору даних, її упорядкування, приведення до єдиного формату та збереження, а також надає доступ до неї користувачам. Центральний рівень інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній призначений для збору, упорядкування, накопичення, консолідації та тривалого зберігання інформації з усіх регіональних центрів збору та обробки даних.

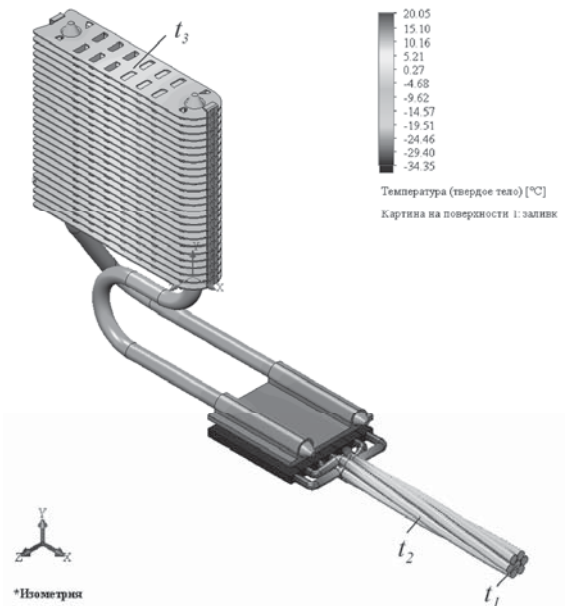


Рисунок 9 – Розподіл температури на поверхні моделі вимірювального перетворювача (теплоізоляція не показана)

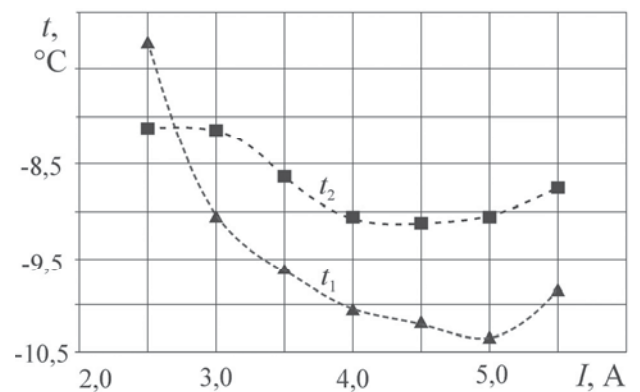


Рисунок 10 – Залежність температури в контрольних точках K_1 та K_2 від струму термоелектричного модуля

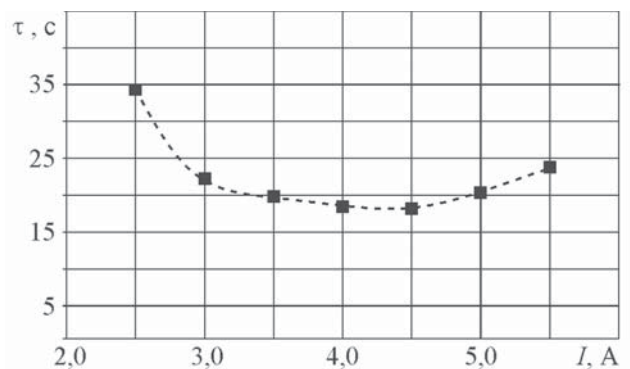


Рисунок 11 – Залежність часу охолодження сенсору від струму термоелектричного модуля при $t_1 = -0,5$ °C

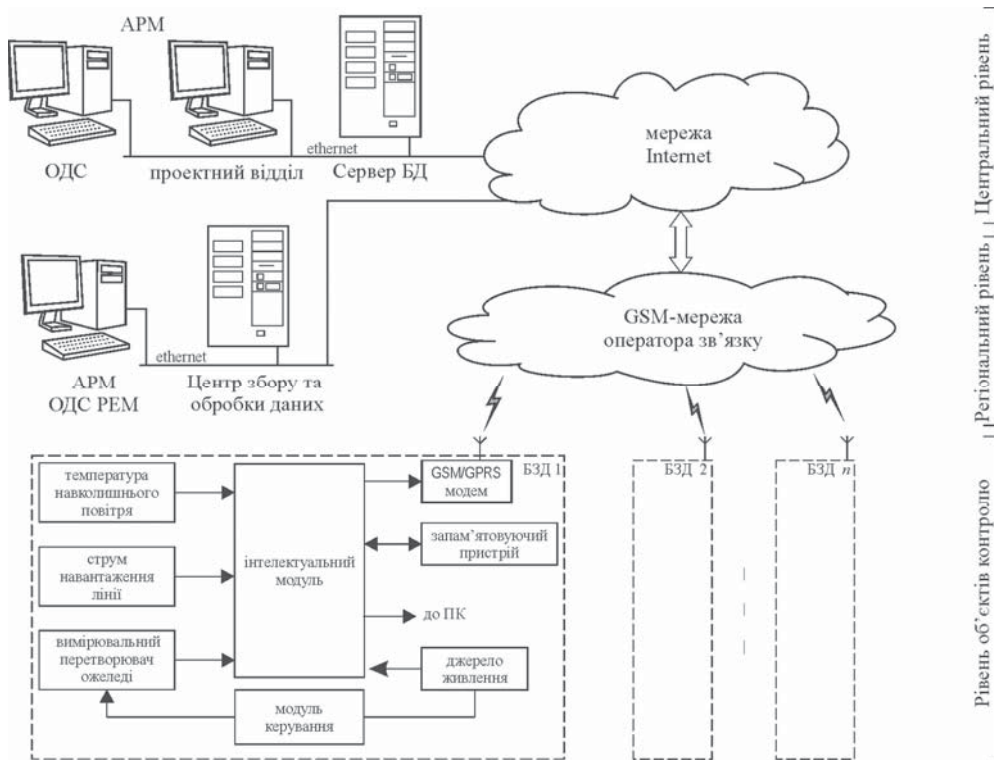


Рисунок 12 – Структурна схема інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній

В основу роботи розробленого блоку збору даних, структурна схема якого зображена на рис. 13, покладено запропонований первинний інформативний параметр і розроблений алгоритм прогнозування ожеледоутворення. Зв'язок із комплексною інформаційною системою моніторингу ожеледоутворення здійснюється за допомогою GSM-модему, що підключається до мікроконтролерного блоку.

Алгоритм роботи блоку збору даних полягає в наступному. Після ввімкнення відбувається його ініціалізація й перехід у режим очікування, у якому проводиться контроль температури повітря t_a . Якщо значення t_a потрапляє в діапазон температур, характерний для ожеледоутворення ($-6 \leq t_a \leq +1^\circ\text{C}$), то проводиться опитування первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення (ПВПО). За наявності на ньому ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ) видається сигнал – «ОПВ на проводі», а за їх відсутності перевіряється режим роботи повітряної лінії. Якщо значення поточного струму лінії I_d менше від струму плавки ожеледі $I_{пл}$, то мікроконтролерний блок (МКБ) за допомогою силового Н-мосту вмикає термоелектричний модуль (ТЕМ) у режимі охолодження, тривалість роботи якого обмежується уставкою часу τ_{y1} . Інформативний параметр τ_{fr} визначається моментом часу спрацювання первинного вимірювального перетворювача при появі на ньому штучних ожеледно-паморозевих відкладень. Якщо за час τ_{y1} штучні

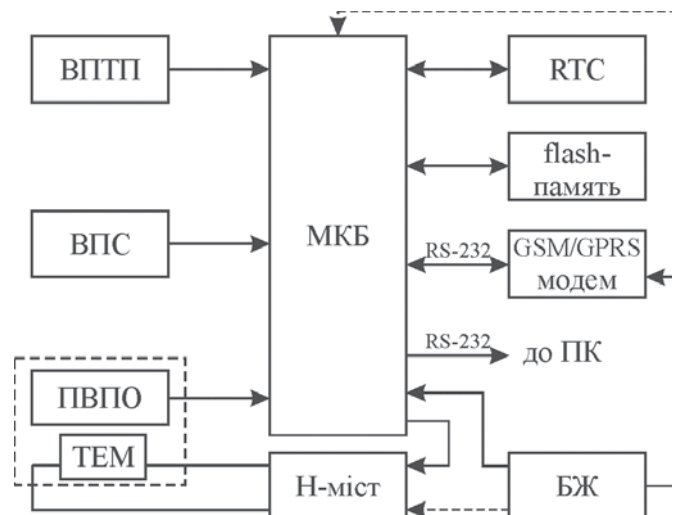


Рисунок 13 – Структурна схема блоку збору даних

ожеледно-паморозеві відкладення не утворилися, то система, витримавши паузу 15 хв, повторює цикл вимірювання. У випадку проведення плавки ожеледі ($I_{\text{л}} > I_{\text{пл}}$) проводиться перевірка наявності на проводі відкладень і, якщо вони наявні, то ініціалізується процедура очищення первинного вимірювального перетворювача від них шляхом реверсування термоелектричного модуля з метою усунення хибних спрацювань блоку. По отриманні шести значень τ_{fr} проводиться розрахунок прогнозного часу утворення ожеледно-паморозевих відкладень $\hat{\tau}_{\text{ic}}$ за виразом (4) і 95%-х фідучіальних меж $\tau_{L,R}$, згідно з (5). Якщо можливе ожеледоутворення почнеться через 120 хвилин або раніше, то видається повідомлення «Утворення ОПВ через $\tau_{\text{ic}} \pm \tau_{L,R}$ хв».

Розроблений макет блоку збору даних, який є частиною запропонованої інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення на базі мікроконтролера Atmega64A, успішно пройшов випробування у розподільних мережах 10 кВ ПАТ «Кіровоградобленерго». На основі цих випробувань розроблено пропозиції та рекомендації стосовно виробничого використання інформаційної системи моніторингу стану, які дозволять підвищити ефективність її використання.

Проведені розрахунки показали, що очікуване підвищення надійності повітряних ліній при впровадженні інформаційної системи моніторингу стану досягається за рахунок підвищення успішності плавки ожеледі на 36% і зниження потоку відмов повітряних ліній в умовах ожеледоутворення у 7 разів. Даний ефект забезпечується за рахунок скорочення часу прийняття рішень стосовно проведення заходів захисту в межах 2-х год.

Очікуваний техніко-економічний ефект від впровадження запропонованої інформаційної системи складає 51,6 тис. грн. для зони обслуговування однієї підстанції 35/10 кВ та розрахований за статистичними даними ожеледно-вітрових аварій у розподільних мережах 10 кВ ПАТ «Кіровоградобленерго» і отриманий за рахунок зниження: витрат на електроенергію при проведенні плавки ожеледі, витрат на відновлення пошкоджених ліній, збитків споживачів, що спричинені перервами в електропостачанні, збитків від неподаної споживачам електроенергії внаслідок аварій.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання, що спрямоване на розробку методів і засобів моніторингу стану повітряних ліній, що дозволило підвищити ефективність експлуатації розподільних електричних мереж в умовах ожеледоутворення.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасного досвіду експлуатації повітряних ліній України в умовах ожеледоутворення. Встановлено, що найбільше ушкоджень, за кількістю опор, отримують лінії розподільних електричних мереж 6-10 кВ через виникнення наднормативних кліматичних навантажень, а також через закінчення розрахункового строку експлуатації. А інформаційні системи моніторингу ожеледоутворення на повітряних лініях не дозволяють електротехнічному персоналу вчасно приймати правильні рішення щодо проведення плавки ожеледі і тому потребують удоскона-

лення шляхом розробки нових способів і засобів прогнозування часу утворення ожеледно-паморозевих відкладень та контролю ожеледоутворення на ранніх стадіях.

2. Розроблено метод прогнозування на базі математичного апарату ковзної регресії та концепції фідучіальних меж, який дозволяє визначати час утворення природних ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії електропередавання з оцінкою надійності прогнозу шляхом аналізу динамічного ряду запропонованого первинного інформативного параметра – часу штучного охолодження ділянки проводу.

3. Проведено експериментальні дослідження нестационарних теплових режимів, що передують процесам утворення паморозі та ожеледі на ділянках неізольованих проводів. Результати досліджень показали, що динамічні ряди запропонованого первинного інформативного параметра з наближенням моменту утворення природних ожеледно-паморозевих відкладень прямують до нуля, що свідчить про правильність проведених теоретичних досліджень.

4. Розроблено вимірювальний перетворювач ожеледоутворення, що містить: первинний вимірювальний перетворювач, основою якого є ділянка проводу АС-50/8; термоелектричний модуль, що слугує для його охолодження. Експериментально доведено, що порогові значення омичного опору R_{tr} спрацювання первинного вимірювального перетворювача склали: для паморозі $454,3 \leq R_{trI} \leq 542,2$ МОм, для ожеледі $16,5 \leq R_{trII} \leq 21,0$ МОм при довірчій імовірності 0,955.

5. Розроблено технічні рекомендації щодо побудови інформаційної системи моніторингу стану як основи для підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення шляхом зменшення витрати часу на прийняття рішення електротехнічним персоналом у межах 2-х годин, стосовно проведення плавки ожеледі на повітряних лініях.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ПАТ «Кіровоградобленерго» та використовуються в навчальному процесі кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Козловский А. А., Орлович А. Е., Серебренников С. В. Автоматизированная система прогнозирования разрушающих атмосферных нагрузок на элементы конструкций воздушных линий электропередач // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2002. №2. С. 46–48. *Здобувачем досліджені причини та механізми руйнування елементів конструкцій ліній електропередавання, запропоновано підхід до розв'язку задачі завчасного прогнозування початку ожеледоутворення.*

2. Козловский А. А., Орлович А. Ю. Прогнозирование обледенения проводов воздушных линий электропередачи // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, Кіровоград: КНТУ, 2004. Вип. 15. С. 119–122. *Здобувачем розроблено функціональну схему мікроконтролерного пристрою прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

3. Козловський О. А., Сіріков О. І. Автоматизована система технічної діагностики проводів повітряних ліній електропередачі 6-10 кВ // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 25, Ч.1. С. 383–390. *Здобувачем розроблено принципову електричну схему мікроконтролерного блоку інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення.*

4. Козловський О. А., Орлович А. Ю., Клименко В. В. Експериментальні дослідження нестаціонарних теплових режимів неізолюваних проводів повітряних ліній перед процесом обледеніння // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, Кіровоград: КНТУ, 2014. Вип. 27. С. 373–381. *Здобувачем розроблено умови та методи експериментальних досліджень нестаціонарних теплових режимів неізолюваних зразків проводу перед процесом ожеледоутворення.*

5. Козловський О. А., Орлович А. Ю., Некрасов А. В. Обґрунтування вибору параметру діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ, 2015. Вип. 3. 2015. С. 149–157. *Здобувачем обґрунтовано вибір граничної умови ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

6. Kozlovskiy O., Trushakov D., Rendzinyak S. A measuring transducer in the system of technical diagnosis of overhead lines icing in electrical distribution networks // Computational Problems of Electrical Engineering. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 17–22. *Здобувачем обґрунтовано конструкцію вимірювального перетворювача інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення.*

7. Козловський О. А. Удосконалення первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення для повітряних ліній електропередачі // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, Кіровоград: КНТУ, 2015. Вип. 28. С. 290–294.

8. Козловський О. А., Орлович А. Ю. Математична модель прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 29. С. 213–221. *Здобувачем розроблено математичну модель прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

9. Kozlovskiy O., Trushakov D., Rendzinyak S. Computer simulation of measuring transducers used for diagnosis of icing in Solidworks software package // Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol. 6. No. 2. P. 75–81. *Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання вимірювального перетворювача інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення у програмному комплексі SolidWorks.*

10. Пат. 49138 Україна, МКВ⁷ Н 02 G 7/16. Пристрій для контролю маси ожеледних відкладень на проводах повітряних ліній електропередач / Орлович А. Ю., Козловський О. А.; заявник і патентовласник Кіровоградський державний технічний університет. № 2000042316; заявл. 24.04.2000; опубл. 16.06.03, Бюл. № 6. *Здобувачем обґрунтовано конструкцію первинного вимірювального перетворювача пристрою контролю маси ожеледних відкладень на проводах повітряних ліній електропередавання.*

11. Пат. 53235 Україна МКВ⁷, Н 02 G7/16. Спосіб прогнозування обледеніння дротів повітряних ліній електропередач / Козловський О. А., Орлович А. Ю.; заявник і патентовласник Кіровоградський державний технічний університет. № 2002042886; заяв. 10.04.02; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1. *Здобувачем розроблено спосіб прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

12. Пат. 49394 Україна МПК (2009), Н 02 G7/16. Сигналізатор обледеніння дротів повітряних ліній електропередачі / Козловський О. А., Орлович А. Ю., Грищук І.С.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. № u200911992; заяв. 23.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8. *Здобувачем запропоновано нову конструкцію первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

13. Пат. 74251 Україна МПК (2006.01), Н 02 G7/16. Пристрій ранньої ідентифікації типу ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі / Козловський О. А., Грищук І. С.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. № u201203322; заяв. 20.03.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20. *Здобувачем розроблено структурну схему та алгоритм роботи пристрою контролю ожеледоутворення на проводі з урахуванням температури проводу лінії.*

14. Пат. 83138 Україна МПК (2006.01), Н 02 G7/16. Сигналізатор обледеніння проводів повітряних ліній електропередачі / Козловський О.А.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. № u201303288; заяв. 18.03.2013; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.

15. Козловський О. А. Радіоактивний пристрій для контролю маси ожеледних відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 8: Неруйнівний контроль конструкційних та функціональних матеріалів: зб. наук. праць. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2003. С. 228–230.

16. Козловський О. А., Серебренніков С. В., Кубкін М. В. Комп'ютеризована система контролю за станом повітряних ліній електропередач при ожеледоутворенні // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: зб. праць, Маріуполь: ПДТУ, 2005. С. 327–329. *Здобувачем розроблено концепцію автоматизованої інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній електропередавання в умовах ожеледоутворення.*

17. Козловський О. А., Кубкін М. В. Обґрунтування критерію прогнозування обледеніння проводів повітряних ліній електропередачі 6-10 кВ // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Матеріали 16-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 21–26 лютого 2011 р., м. Славське Львівської області. Львів, 2011. С. 205–208. *Здобувачем обґрунтовано вибір критерію прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.*

18. Козловський О. А. Удосконалення інформаційної системи контролю обле-деніння повітряних ліній електропередачі 6-10 кВ // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Матеріали 17-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 20–25 лютого 2012 р., м. Славське Львівської області. Львів, 2012. С. 142–144.

19. Kozlovskyi O., Trushakov D., Rendzinyak S. Icing Sensor on the Overhead Powerlines Wires // Обчислювальні проблеми електротехніки (СРРЕ-2015): Матеріали 2015 16-ї Міжнародної конференції 2-5 вересня 2015 року. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 88–91. *Здобувачем визначено порогові значення спрацювання первинного вимірювального перетворювача мікроконтролерного блоку інформаційної системи моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення.*

АНОТАЦІЇ

Козловський О. А. Підвищення ефективності експлуатації повітряних ліній розподільних електричних мереж в умовах ожеледоутворення. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертація присвячена дослідженню проблемних питань, пов'язаних із розробкою інформаційних систем моніторингу стану повітряних ліній в умовах ожеледоутворення, що забезпечують зниження відмов у електропостачанні шляхом надання електротехнічному персоналу завчасної інформації про момент ожеледоутворення. У роботі представлено критичний аналіз існуючих систем моніторингу ожеледоутворення. З метою усунення їх недоліків, запропоновано нові первинний інформативний параметр і вимірювальний перетворювач ожеледоутворення. Для цього вдосконалено нестационарну теплову модель ділянки проводу, на основі якої, для заданих умов, досліджено інформативний параметр. Розроблено модель прогнозування динамічного ряду інформативного параметра, що дозволяє оцінити надійність отриманого прогнозу. Проведено необхідні експериментальні дослідження. Обґрунтовано архітектуру системи моніторингу стану повітряних ліній електропередавання. Для технічної реалізації системи моніторингу стану обґрунтовано структуру та будову вимірювального перетворювача блоку збору даних. Розроблено чисельну модель вимірювального перетворювача у програмному комплексі SolidWorks, що поєднує в собі розв'язок гідродинамічної та теплової задач. Також розроблено макет пристрою блоку збору даних системи моніторингу.

Ключові слова: *повітряна лінія електропередавання, розподільна мережа, надійність, ефективність експлуатації, обледеніння проводів, інформаційна система моніторингу стану, первинний інформативний параметр, комп'ютерне моделювання, первинний вимірювальний перетворювач.*

Козловский А. А. Повышение эффективности эксплуатации воздушных линий распределительных электрических сетей в условиях гололедообразования. На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2017.

Диссертация посвящена исследованию проблемных вопросов, связанных с разработкой информационных систем мониторинга состояния воздушных линий в условиях гололедообразования, обеспечивающих снижение отказов в электроснабжении путем предоставления электротехническому персоналу заблаговременной информации о моменте гололедообразования.

Рассмотрены технологические нарушения в работе воздушных линий во время значительных гололёдно-ветровых явлений, установлено, что больше всего повреждений (по количеству опор) получают линии распределительных сетей 6-10 кВ из-за сверхнормативных механических нагрузок, окончания срока эксплуатации, а также несовершенства существующих информационных систем мониторинга гололедообразования на проводах воздушных линий. Анализ этих систем мониторинга показал, что они не позволяют электротехническому персоналу принимать верные решения о проведении плавки гололеда. Поэтому были предложены новые первичный информативный параметр и измерительный преобразователь гололедообразования. С этой целью была усовершенствована нестационарная тепловая модель участка провода и на ее основе, для заданных условий, проведен анализ информативного параметра. Разработана модель прогнозирования динамического ряда информативного параметра с возможностью оценки надежности прогноза. Проведены экспериментальные исследования участка провода АС-50/8 в климатической камере до начала процессов образования изморози и гололеда.

Для технической реализации системы мониторинга состояния воздушных линий электропередачи была разработана ее архитектура, обоснована конструкция измерительного преобразователя блока сбора данных и конструкция его датчика гололеда. Получено аналитическое выражение минимальной длины датчика гололеда. Разработана численная модель измерительного преобразователя в программном комплексе SolidWorks, сочетающая в себе решение гидродинамической и тепловой задач. На базе микроконтроллера разработан макет устройства блока сбора данных системы мониторинга состояния, который позволяет получать прогноз о начале гололедообразования на воздушной линии с упреждением до 2 часов, фиксировать начало процесса образования гололедно-изморозевых отложений и передавать по GSM-каналу полученную информацию диспетчеру электросетей.

Производственные испытания и технико-экономическая оценка подтвердили целесообразность использования разработанной информационной системы мониторинга состояния воздушных линий в распределительных сетях.

Ключевые слова: *воздушная линия электропередачи, распределительная сеть, надежность, эффективность эксплуатации, обледенение проводов, информационная система мониторинга состояния, первичный информативный параметр, компьютерное моделирование, датчик.*

Kozlovskiy O. A. Improving the efficiency of overhead power lines operation of distribution electric networks in the conditions of ice formation. – Manuscript.

Thesis for getting scientific degree of the Candidate of technical science on the specialty 05.14.02 – electric power stations, network and system. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2017.

The thesis is devoted to the study of problematic issues related to the development of information systems for monitoring the state of overhead power lines in icing conditions, ensuring reduction of failures in the power supply, through the provision of electrical engineering personnel advance information about the icing point. The work presents a critical analysis of existing ice formation monitoring systems. In order to correct their deficiencies, proposed a new primary informative parameter and an ice accretion measuring transducer. To this end, the transient thermal model of the wire section of overhead power lines was improved. And based on this improved model, for the given conditions, an informative parameter was researched. The developed model for forecasting the time series of the informative parameter let to estimate the reliability of the obtained forecast. The necessary experimental studies were carried out. Architecture of the monitoring system of overhead power lines was justified. For the technical implementation of information monitoring system is justified the structure and a design of the measurement transducer of data collection unit. In this work were developed the numerical model in the SolidWorks software package, which combines the solution of the hydrodynamic and thermal problems. Also, was developed the device layout for the data acquisition unit of the monitoring system.

Keywords: *overhead power line, distribution network, reliability, operational efficiency, wire icing, information monitoring system, primary informative parameter, computer simulation, sensor.*

Підписано до друку 9.06.2017. Формат 60х84 1/16. Папір офісний.
Надруковано на різнографі. Умов. друк. арк. 0,9.
Зам. № 114/2017. Тираж 100 прим.

© РВЛ ЦНТУ, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.
Тел. (0522) 390-541, 559-245, 390-551.