

УДК 621.315.175: 624.144.24

МЕЗЕРЯ А. Ю., кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроенергетика»

ЗАНИХАЙЛО Є. О., аспірант, асистент кафедри «Електроенергетика»

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОЖЕЛЕДІ НА ПРОВОДАХ І ТРОСАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

У статті розглянуто фактори, які впливають на фізико-механічні властивості ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній електропередачі. В статті була побудована структурна схема, виявлено ступінь впливу різних факторів на фізико-механічні властивості ожеледі.

Ключеві слова: фізико-механічні властивості, ожеледь, провід, повітряні лінії електропередачі.

В статье рассмотрены факторы, влияющие на физико-механические свойства гололеда на проводах и тросах воздушных линиях электропередачи. В статье была построена структурная схема, выявлена степень влияния различных факторов на физико-механические свойства гололеда.

Ключевые слова: физико-механические свойства, гололед, провод, воздушные линии электропередачи.

Вступ

Повітряні лінії електропередачі (ПЛЕП) середньої та високої напруги є основою енергосистеми України . Пошкодження ПЛЕП 35–750 кВ призводить до багатомільйонних збитків і знеструмлення цілих районів і населених пунктів При аваріях на повітряних лініях електропередачі в результаті ожеледі часто відбуваються обриви проводів і тросів. Середній час ліквідації аварій від ожеледі перевищує середній час ліквідації аварій, викликаних іншими причинами, в 10 і більше разів. Це висуває підвищені вимоги до надійності і якості електропостачання.

Значною мірою аварійність повітряних ліній (ПЛ) обумовлена недостатнім урахуванням всіх кліматичних факторів у зоні проходження трас ПЛ. Статистика аварійних ситуацій свідчить, що більше половини відмов елементів ПЛ викликано дією над розрахункових навантажень від ожеледі та вітру на дроти, троси і будівельні конструкції [1, 2]. Зазвичай вони є наслідком недообліку при проектуванні фактичних вітрових навантажень і навантажень від ожеледі, а також їх поєднань [1] .

Звідси підвищення надійності ліній електропередачі, що проходять в районах з підвищеною ожеледицею, стало актуальним завданням.

Основна частина

Ожеледно-паморозеві відкладення (ОПВ) зазвичай відбуваються на великій території, і пошкодження виникають одночасно на багатьох лініях , що посилює аварійні ситуації [3]. При поєднанні вітру та ожеледиці, особливо в початковий період ожеледі, часто виникають такі явища, як закручування, вібрація і коливання проводів, що обумовлюють динамічні навантаження .

Аналіз статистичних даних показує, що до числа причин аварій від ожеледі на ПЛ відносяться серйозні недоліки в проектуванні, спорудженні та експлуатації ПЛ в районах з підвищеною ожеледицею, що потребує розробки спеціальних заходів. Переважна кількість аварій сталося не тільки при великих, але і при менших, ніж розрахункові, навантаженнях на ПЛ [3, 4].

Аналіз ситуацій утворення ожеледі на ПЛ показує, що значна частина ліній схильна локальному утворенню ожеледі, коли на окремих ділянках з'являються критичні навантаження від ожеледі, а на інших ці навантаження менше або взагалі відсутні.

Таким чином для повного врахування впливу ОПВ на механічну міцність ПЛЕП необхідно провести систематизацію даних про фізико-механічні властивості ожеледі на ПЛ. Виявити ступінь вплив зовнішніх факторів на фізико-механічні властивості ОПВ.

Найбільш часто зустрічаються такі види відкладень на проводах ПЛ: ожеледь, паморозь, іній, мокрий сніг і суміш [5, 6].

Ожеледь являє собою шар щільного льоду, який наростає при морозі внаслідок намерзання крапель дощу, мряки або туману. Ожеледь підрозділяють на прозорий з щільністю 800 ... 940 кг/м³ і мутний з щільністю 500 ... 800 кг/м³. Утворюється він зазвичай при швидкій відлизі [3, 5]

Кристалічна паморозь – білий осад з кристалів льоду вельми ніжною і тонкої структури. Вона утворюється шляхом безпосередньої сублімації водяної пари і перегонки пари з крапель туману. Щільність її 20 - 80 кг/м³, в середньому дорівнює 50 кг/м³.

Зерниста паморозь – осад льоду пухкої зернистої будови з щільністю 100–400 кг/м³, зазвичай матово-білого кольору. Утворюється від послідовного намерзання один на одного крапель переохолодженого туману.

Іній спостерігається, як правило, в нічний і ранковий час, тривалість відкладень складає всього кілька годин. Це білий осад з кристалів льоду, що виростають на поверхні проводу внаслідок їх радіального охолодження. Залежно від температури повітря щільність його коливається від 10 до 500 кг/м³ [5, 6].

Мокрий сніг налипає на дроти шаром. Елементами обмерзання в даному випадку є мокрі сніжинки, в зчленуваннях яких знаходяться крапельки води. Утворюється мокрий сніг переважно при плюсовій температурі, але близькою до нуля. При зниженні температури відкладення замерзає, щільність його становить 200–300 кг/м³.

Суміш, або складне відкладення, являє собою послідовне нашарування ожеледі і паморозі. Спостерігається при періодичній зміні погодних умов. Залежно від співвідношення товщини шарів ожеледі та паморозі щільність змінюється від 200 до 600 кг/м³ [5, 6]

Основні фактори, що впливають на процес утворення ОПВ, показані на структурній схемі (рис. 1). На даній структурній схемі фактори, що впливають на фізико-механічні властивості ОПВ, поділяються на обумовлені природним впливом на ОПВ, що носить імовірнісний характер, і конструктивними особливостями і режимами роботи ПЛЕП.

Для виявлення впливу механізму теплопередачі при утворенні ожеледі, температури дроти в момент утворення ОПВ, товщини плівки води при утворенні ОПВ можна скористатися теорією утворення шаруватої структури льоду.

При реальних значеннях швидкості повітряного потоку і товщини плівки рух плівки може бути як ламінарний, так і турбулентний. Це в свою чергу призводить до двох механізмів теплопередачі при кристалізації плівки: молекулярному і турбулентному. При молекулярному механізмі плівка виявляється нестійкою, вона зникає, краплі кристалізуються, не зливаючись воєдино, і утворюють матову неоднорідну структуру льоду. При турбулентному механізмі кристалізація йде під усталеною товщиною плівки і утворюється прозора однорідна структура льоду [7].

З феноменологічної теорії утворення шаруватої структури льоду, розвиненою в [7], випливає, що шарувата структура льоду визначається параметром h_b - рівноважної товщини плівки:

$$h_b = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{q \cdot E \cdot V [L_c - c(T_0 - T_\infty)]} \quad (1)$$

де: c – питома теплоємність води, Дж/кг·К;

L_c – питома теплота кристалізації води, Дж/кг;

λ – теплопровідність води, Дж/м·с·К;

T_0 – температура фронту кристалізації, $T_0 = 273$ К;

T_∞ – температура навколишнього середовища, К;

q – водність потоку, кг/м³;

E – коефіцієнт захвата крапель поверхнею плівки, у розрахунках коефіцієнт захвата вважається постійним;

V – швидкість повітряного потоку, m/c ;

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

T_1 – температура поверхні плівки, K .

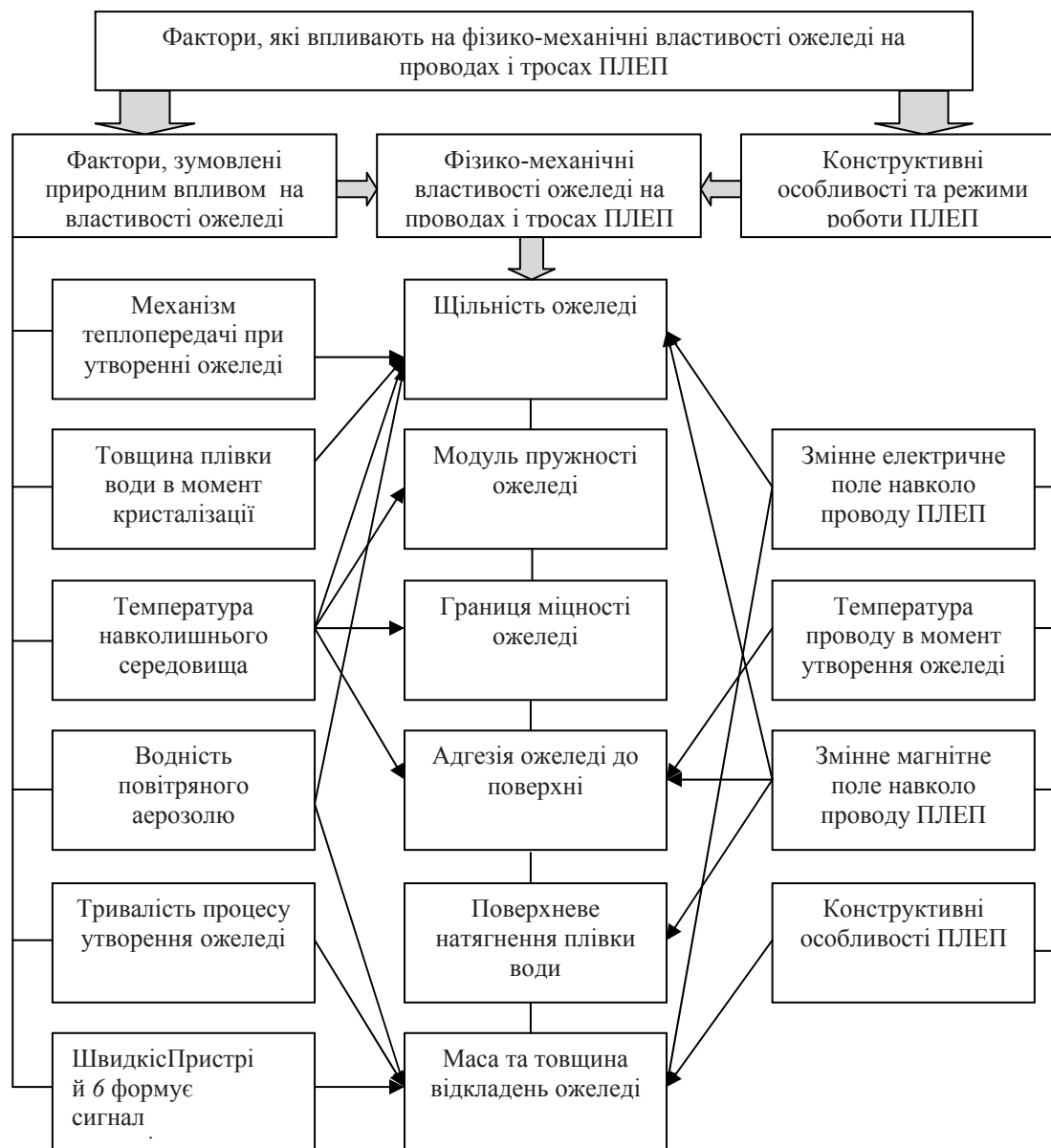


Рисунок. Фактори, які впливають на фізико-механічні властивості ожеледі на проводах і тросах ПЛЕП

Вимірювання щільності крижаних нашарувань ρ_i на перешкодах, які обтікає потік водного аерозолі, при різних значеннях h_b добре апроксимується формулою:

$$\rho_i = \rho_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{0,32}{h_b}\right) \right) \quad (2)$$

де ρ_0 – щільність прозорої однорідної ожеледі, $\rho_0 = 900 \text{ кг/м}^3$.

З (2) видно, що при малих h_b утворюється прозора однорідна структура льоду, при великих h_b – матова неоднорідна структура льоду.

Істотний вплив на фізико-механічні властивості ОПВ надає температура зовнішнього середовища. Найбільш часто ожеледь утворюється при температурі від 0 до -5 °С. При температурах вище $0,1$ °С і нижче -10 °С ожеледь спостерігається рідше. Зерниста паморозь утворюється при температурі $-5 \dots -10$ °С. При температурі вище -5 °С і нижче -10 °С зерниста паморозь спостерігається рідше. Зерниста паморозь в основному утворюється при температурі не нижче -7 °С, верхня межа дорівнює $-1,3$ °С. У 72 % випадків зерниста паморозь утворюється при $-2 \dots -9$ °С. Кристалічна паморозь спостерігається, як правило, при температурах від -10 °С до -20 °С. За даними автора [6], кристалічна паморозь утворюється в діапазоні температур $-3 \dots -40$ °С. Мокрий сніг до проводів налипає при температурі повітря від -3 до $+3$ °С [6].

Також температура навколишнього середовища істотно впливає на модуль пружності і границю міцності ОПВ. Із зниженням температури зростає щільність, модуль пружності і границю міцності ОПВ.

Щодо відносної вологості повітря, то ожеледь та паморозь утворюється при 76...100 %. Паморозь і інші спостерігаються при вологості 90 %, налипання мокрого снігу при 86...100 %. З ростом висоти відносна вологість змінюється в невеликих межах [3]. Як вказує автор [3], утворення ожеледі йде при відносній вологості від 94 до 100 %.

Щодо впливу змінного магнітного поля від проводів ПЛЕП, то в експериментальних дослідженнях низки вітчизняних та зарубіжних вчених встановлено, що зміни макроскопічних властивостей води і льоду, індуковані змінним магнітним полем, залежать від його величини, частоти, тривалості дії і температури навколишнього середовища [8].

Ефект дії магнітного поля на лід у кілька разів перевершує аналогічний ефект в рідкій воді. Так при цілком певних частотах змінного магнітного поля досягається помітна зміна ряду фізичних властивостей води і льоду (збільшенню адгезії льоду в 4 рази і підвищенню поверхневого натягу води в 7 разів). В льоду зміни ідентичних фізичних параметрів у декілька разів більше, ніж у воді. Обробка магнітним полем води і льоду призводить до її щільнішою структурної упаковки [8]. В умовах впливу на лід це призводить до підвищення його щільності.

Причиною виявлених ефектів є дія магнітного поля на вірогідність перенесення протонів по ланцюжках водневих зв'язків води, що і призводить до зміни структури кластерів [8]. У магнітному полі, під дією сили Лоренца, утворюються пластинчасті домени орієнтованих молекул води, стабілізовані іонами, а неміцні сполучення розпадаються на мономолекули (плоскі шари диполів води).

Дія електричного поля проводу в даний час не враховується при визначенні навантажень від ОПВ на проводи ПЛ. В [6] проведено практичні спостереження за ОПВ на проводах ПЛЕП, що знаходяться під напругою. Автор оцінює збільшення маси ожеледі на проводах під впливом електричного поля в 30 %, а також збільшення щільності ожеледі. Причиною цього є тяжіння краплі до проводу, що зумовлено наведеним зарядом, який утворює диполь. Порівнюючи електричну силу з силою тяжіння випливає висновок, що електричне поле є додатковим чинником, що впливає на збільшення маси та щільності ожеледиці.

Іншим чинником, що обумовлює тяжіння краплі, є її поляризація в електричному полі проводу ПЛ. Сила взаємодії визначається рівнянням [3]:

$$F_e = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^3 \cdot \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) \cdot \text{grad} E^2 \quad (2)$$

де r – радіус краплі, м;

E – напруженість поля в даній точці, В/м;

ε_0 – відносна діелектрична постійна, Ф/м;

ε – діелектрична проникність краплі, Ф/м.

При змінній напрузі диполь змінює полярність у відповідності з напрямком поля, а сила залишається спрямованою завжди в одну сторону, притягаючи краплю до проводу.

Щодо конструктивних особливостей ПЛЕП, то на фізико-механічні властивості ОПВ впливають діаметр проводу, матеріал проводу, висота підвісу проводу, наявність засобів захисту від ожеледі.

Із збільшенням діаметра проводу від 5 до 50 мм маса відкладення збільшується середньому в 2,5 рази.

Маса ожеледі залежить від швидкості повітряного потоку та діаметру проводу. Утворення ожеледі відбувається частіше при швидкості вітру до 10 ... 20 м/с. Паморозь, особливо кристалічна паморозь, характерні для погоди з малою швидкістю вітру або штильовою погоди [6]. Кристалічна паморозь характерна для швидкості вітру не більше 1 м/с в 60–80 % випадків, зерниста – лише в 25–50 % випадків. Так, при швидкості 5 м/с маса осаду на проводі діаметром 5 мм менше, ніж на проводі діаметром 30 мм, в 2,2 рази. При швидкості 15 м/с відмінність у масі відкладень на цих же проводах становить 3,9 рази. У зоні швидкостей повітряного потоку 20 м/с і більше спостерігається зменшення маси ОПВ. Це пояснюється інтенсивним випаровуванням ожеледиці. При підвищенні температури від -5°C до -1°C випаровування ОПВ збільшується до 40 %, а при температурі від -5°C до -10°C випаровування маси ОПВ становить менше 10 % [3].

Також на фізико-механічні властивості ОПВ впливає кут напрямку вітру до проводу. Зі збільшенням кута напрямку вітру до проводу маса відкладення і щільність зростає. Найменші відкладення мають місце при паралельності вітру до ПЛЕП, механічне навантаження лінії за такої умови в п'ять разів менше, ніж при перпендикулярному напрямку вітру.

Висота підвісу проводу ПЛЕП завжди більше висоти підвісу проводу на метеостанціях, де $h_o = 2$ м. С зростанням висоти підвісу проводів маса ожеледі зростає. Тому при розрахунку дійсної стінки ОПВ необхідно враховувати поправочний коефіцієнт K_h , який залежить від висоти підвісу проводу.

Матеріал проводу на масу відкладення впливає незначно. Наявність засобів пасивного та активного захисту ПЛЕП від утворення ОПВ значно зменшують адгезію ОПВ та масу відкладень.

Висновки

1. Складена структурна схема, яка наглядно ілюструє фактори, які впливають на фізико-механічні властивості відкладень ожеледі на повітряних лініях електропередачі.
2. Виявлено ступінь впливу різних факторів на фізико-механічні властивості ОПВ.
3. Виявлено залежність фізико-механічних властивостей відкладень ожеледі на повітряних лініях електропередачі від електромагнітного поля, зокрема ущільнення кристалічної структури у збільшення щільності відкладень.

Перелік літератури

1. Горохов Е.В. Анализ причин и последствий аварий на участках ВЛ 330 кВ Джанкойских МЭС крымской электроэнергетической системы НЭК "Укрэнерго" / Е. В. Горохов, С. Н. Бакаев, Я. В. Назим, В. В. Моргай, М. С. Попов // Металеві конструкції. — Макеевка, 2010. — Том 16, № 2. — С. 75–92.
2. Горохов Е. В. Гололедные и ветровые воздействия на воздушные линии электропередачи / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. В. Турбин, Я. В. Назим / Под. ред. Горохова Е. В. — Донецк, 2005. — 348 с.
3. Николаев Н. Я. Исследование и разработка способа снижения гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи сельской электрификации: автореф. дис. ... на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» / Н. Я. Николаев – Челябинск, 1999. – 24 с.
4. Крымский М. М. Об учете механической прочности гололедных отложений при расчете проводов ВЛ / М. М. Крымский. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – № 3. – С. 73–78.

5. Бургсдорф В. В. О Физике гололедно-изморозевых явлений/ В. В. Бургсдорф // Тр. ГТО. – М.: Гидрометиздат, 1947 – Вып. 3. – С. 3–12.
6. Бургсдорф В. В. Сооружение и эксплуатация линий электропередачи с сильно гололедных районах/ В. В. Бургсдорф. – М.: Госэнергоиздат, 1947. – 196 с.
7. Закинян Р. Г. К теории образования слоистой структуры льда на поверхности пластины, помещенной в поток переохлажденного водного аэрозоля / Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 9–14
8. Семихина Л. П. Влияние слабых магнитных полей на свойства воды и льда/ В. Ф. Киселев, Л. П. Семихина // Известия вузов. Физика. – 1988. – № 5. – С. 12–17.

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ICING ON WIRES AND CABLES OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

MEZERJY A. J. , Candidate of Engineering, Associate Professor
ZANYKHAYLO Y. O., assistant of pedagogics

The paper considers factors influencing physical and mechanical properties of icing on wires and cables of overhead power transmission lines. The paper presents a schematic diagram, founds the degree of influence of various factors on physical and mechanical properties of icing.

Key words: *physical and mechanical properties, icing, wire, overhead power transmission lines.*

1. E. V. Gorokhov , S. N. Bakaev, Y. V. Nazim , V. V. Morgay, M. S. Popov., (2010) Analysis of the causes and consequences of accidents on land 330kV Dzhankoyskyh SES Krimskaya elektroenergetiks system NEK " Ukrenergo ", [Analiz prichin i posledstvij avarij na uchastkah VL 330 kV Djankoyskih MES krymskoy elektroenergeticheskoy sistemy NEK «Ukrenergo»], *metallic design*, Makeevka, Volume 16 , № 2. – P. 75–92 .

2. E. V. Gorokhov, M. I. Kazakevych , S. V. Turbin , Y. V. Nazim,(2005) Glaze and wind impact on lines air power, [Gololednye i vetrovye vozdeystviya na vozdushnye linii elektroperedachi] *Pod. eds. Pea E.V. Gorokhov*, Donetsk , – 348 p.

3. N.Y. Nikolaev (1999) Exploration and creative reduction formation of ice preferred method for wire lines air power countryside electrification, [Issledovanie i razrabotka sposoba snijeniya gololedoobrazovanie na provodah vozdushnyh linii elektroperedachi selskoy electroficacii]: *Author. thesis . competition ... the science of Powers candidate. Sc. sciences specials. 05.20.02 " Electrification countryside production "*, Chelyabinsk, – 24 p.

4. M. M. Crymskiy, (1989) Rev accounting mechanical strength glaze deposits at calculation wires, [Ob uchete mehanicheskoy prochnosti gololednyh otlojeniy pri raschete provodov VL], Moscow: Energoatomizdat, № 3. – P. 73–78.

5. V. V. Burhsdorf (1947) On physical phenomena glaze, [O fizike gololedno-izmorozevykh yavleniy], *Tr. TRP.*, Moscow: Hydrometizdat, – Vol. 3. – P. 3–12.

6. V. V. Burhsdorf (1947) Construction and operation lines with much lines air power glaze areas, [Sooruzenie i ekspluataciya linii elektroperedachi s silno gololednyh rayonah], Moscow: Hosenerhoizdat , – 196 p.

7. R. G. Zakynyan (2004) Number theory education laminate ice structure on the surface bar, which is placed in supercooled aerosol, [K teorii obrazovaniya sloistoy strukturi lda na poverhnosti plastiny, pomeshennoj v potok pereohlajdennoogo vodnogo aerolya], *Journal Tehnicheskoe physics*, – Т. 74, № 9. – P. 9–14.

8. V. F. Kiselev, L. P. Semihina (1988) Effect of magnetic field on weak properties of water and ice, [Vliyanie slabyyh magnitnyh polej na svojstva vody i lda], *Proceedings of universities. Physics*, – № 5. – P. 12–17.

Поступила в редакцию 11.02 2014 г.