

УДК 620.179

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДКРИТОМУ БІКОНІЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ В УМОВАХ ВИНИКНЕННЯ ОЖЕЛЕДІ

С.Ю. Шевченко, В.В. Волохін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, e-mail: vetvol-13@rambler.ru

Проаналізовано основні види ожеледно-паморозевих утворень (ОПУ) та метеофактори, котрі сприяють їхньому виникненню. Розглянуті результати експериментальних досліджень впливу метеорологічної ситуації утворення ОПУ на параметри електромагнітного поля відкритого біконічного резонатора.

Проанализированы основные виды гололедно-изморозевых образований (ГИО) и метеофакторы, которые способствуют их возникновению. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния метеорологической ситуации образования ОПУ на параметры электромагнитного поля открытого биконического резонатора.

The basic types of the ice-storm-hoarfreezing educations (ISHE) and meteofactors which are instrumental in their origin are analysed. The results of experimental researches of influence of meteorological situation of formation of OPU are considered on the parameters of the electromagnetic field of the opened biconical resonator.

Суттєве потепління клімату, що спостерігається останнім часом на території України, призвело до почастищення виникнення ожеледно-паморозевих утворень (ОПУ) на устаткуванні електроенергетичної системи (ЕЕС). Ожеледно-паморозеві відкладення на проводах повітряних ліній електропередачі (ПЛ), лініях зв'язку й електроустаткуванні електричних станцій і підстанцій спостерігаються при виникненні особливих метеорологічних умов. Прогнозувати виникнення ожеледно-паморозевих відкладень по метеорологічним умовам, у яких перебуває лінія електропередачі, досить складно, але можливо, тому що атмосферний лід утворюється внаслідок двох близьких по характеру фізичних процесів:

- сублимація пари – перетворення крапельок водяної пари в кристалики льоду й утворення опадів у вигляді паморозі з пухкою зернистою структурою;

- кристалізація великих крапель, що перебувають у повітрі у вигляді води. Великі краплі при їхньому переохолодженні й зіштовхуванні із предметами утворюють склоподібну структуру льоду [1].

На сьогодні прийнята наступна класифікація ожеледно-паморозевих утворень на проводах ПЛ:

1) ожеледь – осад прозорого, напівпрозорого або матового непрозорого льоду із

густиною від 600 до 900 кг/м³, яка утворюється при температурі повітря від 0° до -5°С, при туманах, дощах і мряках. У цих умовах переохоложені краплі дощу (туману), зіштовхуючись із твердими навколосемними предметами, замерзають, утворюючи зернисту склоподібну структуру льоду. Ожеледь міцно тримається на проводах і надійно може бути видалена тільки шляхом плавки електричним струмом;

2) суміші ожеледі й паморозі утворюються при періодичних змінах погодних умов у діапазоні температур від 0° до -3°С та мають густину від 150 до 600 кг/м³;

3) мокрий сніг утворюється при температурі близько 0°С, має велику липкість й обтягує весь провід. При зниженні температури нижче 0°С мокрий сніг на проводі замерзає й заляклий шар міцно примерзає до проводу. Густина зледенілого шару становить близько 200 кг/м³;

4) зерниста або щільна паморозь – сніговий осад білих кольорів, що утворюється в мрячну й вітряну погоду при температурі повітря від мінус 3 до мінус 10° С. Густина такого утворення близько 100 кг/м³. Вона міцно тримається на проводах ПЛ і найбільш ефективно її видалення здійснюється за допомогою плавки електричним струмом;

5) кристалічна паморозь – наліт кристалів білого льоду з густиною 200 – 800 кг/м³. Паморозь тримається на проводах погано й небезпеки для ПЛ не представляє [2,3].

Наведена класифікація дає уяву про діапазон значень метеопараметрів, при яких виникають ОПУ.

Як видно з вищесказаного, врахувати усі фактори, котрі впливають на виникнення того чи іншого виду ОПУ, неможливо. Але були визначені граничні умови найбільш розповсюджених факторів, при яких можливе виникнення будь-якого виду ОПУ, а саме:

- відносна вологість повітря $\varphi > 85\%$,
- швидкість вітру $V_g < 10$ м/с,
- температура повітря $-6^\circ\text{C} < T_{нов} < +0,5^\circ\text{C}$,
- температура проводу $T_{пр} < -0,5^\circ\text{C}$.

Існуючі в даний момент давачі можливого утворення ожеледі в певній мірі вирішують задачу короткострокового прогнозу цього явища. Однак необхідно відзначити, що одним з конструктивних елементів таких давачів є структура, на якій утвориться шар льоду, що вимагає плавлення. Природно, що ця операція не може бути виконана миттєво, тому після появи ожеледі швидкість передачі інформації значно падає. Крім того, функціонування всіх відомих давачів вимагає наявності в їхньому складі нагрівальних елементів, що споживають певну кількість електроенергії.

Існуюча мережа стандартних метеостанцій не дає можливості надійно охарактеризувати ожеледне навантаження на повітряні лінії електропередач (засоби спостереження та вимірювання на метеостанціях нерідко є застарілими і не відповідають сучасному рівню розвитку техніки) [6,7].

Тому створення систем контролю за утворенням ожеледі, які мають високу чутливість, є безінерційними, споживають мало енергії, є досить актуальною задачею.

На сьогодні існує можливість практично миттєво визначати характеристики атмосферного повітря, які корелюють із початком появи ожеледі. Мова йде про резонансні методи дослідження електрофізичних параметрів речовини.

З огляду на те, що наближення моменту льодоутворення пов'язане із цілком певною концентрацією вологи в повітрі і його температурою, а це, у свою чергу, безпосередньо пов'язано з електрофізичними характеристиками повітря, можливе використання резонансних пристроїв, параметри яких прямо пов'язані із цими характеристиками. Принцип роботи таких пристроїв полягає в тому, що при внесенні в резонатор якої-небудь речовини, його резонансна

частота й добротність змінюються. По зсуву цієї частоти й добротності можна зробити вимірювання як дійсної, так і уявної частини діелектричної проникності, що залежить від структури, складу, густини й інших параметрів цієї речовини.

Дана стаття присвячена експериментальному дослідженню резонансних характеристик біконічного відкритого резонатора в умовах утворення ожеледі.

Згідно розрахунків, приведених в [8,9], для раннього виявлення ОПУ було побудовано стенд на основі відкритого біконічного резонатора. Для використання у експерименті нами були розраховані параметри резонатора із резонансною довжиною хвилі $\lambda = 16$ мм. Загальний вигляд цього резонатора зображено на рис. 1, з якого видно що, окрім торцевих отворів для вільного проникнення повітря резонатор також має отвори для вводу та виводу електромагнітної енергії. Ці отвори розташовані на бокових поверхнях конусів як найближче до осі резонатора, але не потрапляють до зони відсічки.

Загальний вид схеми експериментальної установки для дослідження резонансних характеристик біконічного резонатора в умовах виникнення ОПУ представлений на рис. 2. Схема функціонує таким чином. Високочастотний сигнал від генератора СВЧ коливаний 1 з діапазоном перебудови 13÷80 ГГц, пройшовши через розв'язуючий атенюатор 2, хвилемір 3, направлений відгалужник 5, збуджує електромагнітне поле у відкритому біконічному резонаторі 6. Контроль частоти сигналу в тракці здійснюється хвилеміром 3. Рівень сигналу, що надходить до біконічного резонатора, контролюється через спрямований відгалужник 5 термісторним вимірником потужності W_1 . Потужність на виході резонатора реєструється через направлений відгалужник 7 термоелектричним ватметром W_2 . Узгоджене навантаження 4 використовується в схемі для зменшення відбиття у лінії передачі, тим самим виключаючи додаткові похибки у вимірюваннях.

В експериментальній установці в якості об'єкта візуального спостереження за процесом утворення ОПУ використовується провід марки АС-400/51 довжиною 0,5 м.

На рис.3 приведені типові резонансні характеристики коливаний відкритого біконічного резонатора в діапазоні частот від 16 до 27 ГГц (P/P_{\max} – відносні значення потужності коливаний) при нормальних кліматичних умовах. За P_{\max} приймаються значення потужності коливаний при нормальних метеоумовах. Нормальними вважаються умови: $T_{нов}=20^\circ\text{C}$; $p_{нов}=760$ мм.рт.ст.; $V_g=0$ м/с; $\varphi = 65\%$.

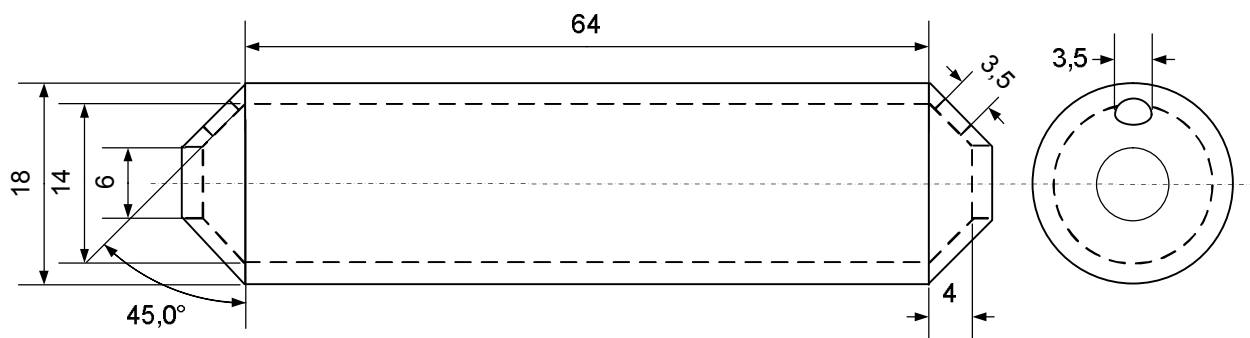


Рисунок 1 – Загальний вигляд відкритого біконічного резонатора

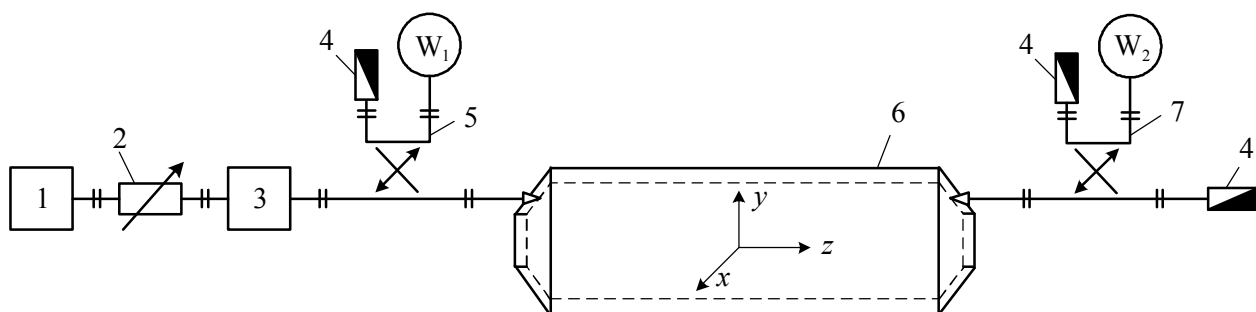


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки для дослідження резонансних характеристик біконічного резонатора в умовах виникнення ОПУ

На частоті $f=18,75$ ГГц можна спостерігати основну моду коливань для даного резонатора – E_{010} . Також видно присутність інших типів коливань, зокрема моду H_{11p} , котра є найнижчим типом хвилі у резонаторі круглого перерізу. Деякі коливання можуть виникнути внаслідок неточностей, допущених при виготовленні резонатора. Але потужність таких коливань мала у порівнянні з основною модою і на результат експерименту не впливає. На рис. 4 зображено основну моду коливань розрахованого резонатора в діапазоні частот від 18 до 19 ГГц.

Важливою характеристикою коливальної системи є її добротність. Добротність навантаженого резонатора, у найпростішому випадку, можна визначити по його частотній характеристиці, знявши залежність коефіцієнта передачі по потужності від частоти та виміривши ширину резонансної кривої Δf на рівні 0,5. Добротність резонатора знаходять із такого співвідношення:

$$Q_n = f_0 / \Delta f,$$

де f_0 – частота, що відповідає максимуму потужності резонансної кривої.

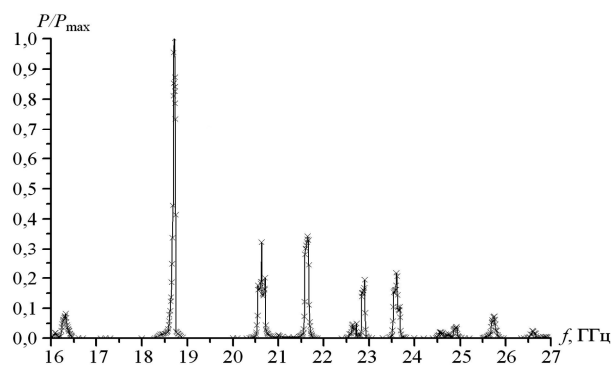


Рисунок 3 – Резонансні характеристики коливань біконічного резонатора при нормальних кліматичних умовах

Результати вимірювання резонансних характеристик (рис. 4) показали, що для заданого діапазону частот присутні високодобротні коливання $Q \geq 8000$, які відповідають E_{010} моді. Велике значення

добротності вказує на «гостроту» графіка. Будь-які зміни в резонансній системі, котрі призвели до незначного зсуву резонансної частоти, супроводжуються стрімким зростанням або падінням потужності коливань. А це, в свою чергу, свідчить про досить високу чутливість даного пристрою.

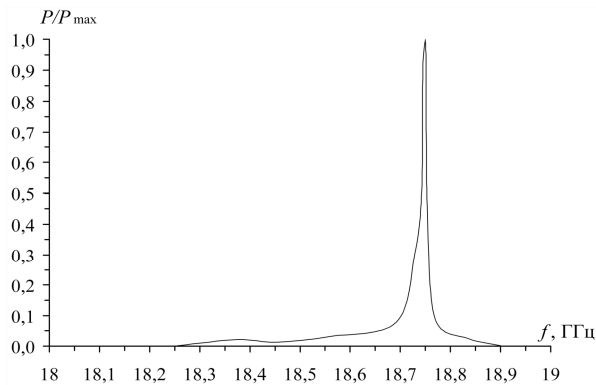
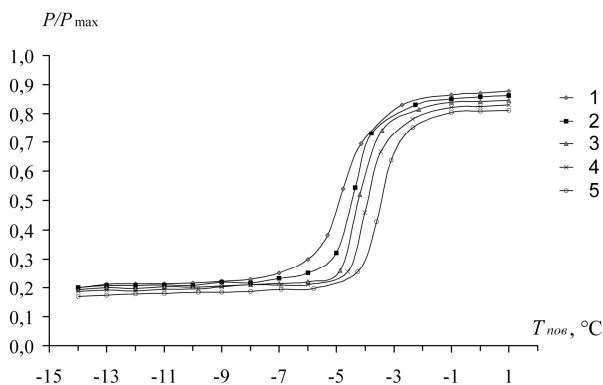


Рисунок 4 – Резонансні характеристики коливань біконічного резонатора при нормальних кліматичних умовах (основний резонанс)

На рис. 5 зображено залежність відносної потужності коливань біконічного резонатора, працюючого на частоті $f=18,75$ ГГц, від температури повітря при різних значеннях відносної вологості. Різке зростання потужності коливань в діапазоні температур від -7 до -1°C відповідає утворенню кристалічної структури на поверхні імітатора проводу. При цьому вважається, що $T_{np} \approx T_{нов}$.



1 – $\varphi = 85\%$; 2 – $\varphi = 87\%$; 3 – $\varphi = 90\%$; 4 – $\varphi = 93\%$; 5 – $\varphi = 96\%$

Рисунок 5 – Залежність відносної потужності коливань резонатора від температури повітря при $p_{нов}=747$ мм.рт.ст.; $V_в = 0$ м/с

Присутність в атмосфері водяного пару визначається вологістю. Вологість змінюється залежно від температури й тиску. Ступінь насичення повітря парами характеризується відносною вологістю, вираженою у відсотках. Кількість водяного пару, що містить 1 кг вологого повітря в умовах зледеніння, не перевищує 1 г/кг [10].

Загальний атмосферний тиск газів складається з тисків, створюваних молекулами сухого повітря й молекулами водяного пару при їхньому хаотичному русі.

Тиск вологого повітря в метеорології викликається пружністю водяного пару. Пружність водяної пари є основною характеристикою вологості повітря. Відносна вологість, виражена у відсотках, являє собою відношення наявної пружності водяної пари до пружності насиченої пари для даної температури. Крапля води діаметром $1,5 \cdot 10^{-6}$ м (15 мк) при відповідних умовах може наситити $1,5 \cdot 10^{-6}$ м³ сухого повітря, викликавши тим самим бурхливий ріст кристала льоду. Таким чином, контролюючи зміни пружності водяної пари (а значить і відносної вологості), можна підвищити точність роботи давачів сигналізації ожеледної ситуації.

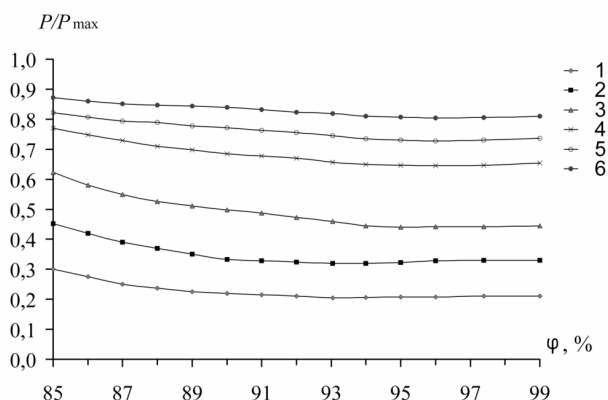
В реальних умовах деякі поєднання відносної вологості та температури можуть не зустрічатися, так як значення вологості постійно падає при пониженні температури. Але в лабораторних умовах вдалося отримати залежність потужності коливань від відносної вологості повітря при різних температурах (рис. 6). Графік має схожу на параболу форму (з вітками догори), вершина якої відповідає моменту сублимації пари в повітрі, тобто моменту утворення ожеледі.

Пружність насиченої пари залежить від температури й не залежить від тиску повітря. Вона має значення 6,1 мілібара (гектопаскала) при температурі 0°C і приблизно подвоюється через кожні 10°C . Пружність водяної пари пропорційна радіусу крапель і чим більше розмір краплі, тим меншою є пружність насиченої пари. В основному ці умови й визначають різну густину ожеледних відкладень. Густина ожеледі в різних умовах її утворення змінюється в інтервалі від 600 до 900 кг/м³ (густина звичайного льоду 680...920 кг/м³, щільність повітря при -10°C та нормальному тиску 760 мм рт.ст. становить 1,342 кг/м³).

Залежність пружності від температури описується формулою:

$$G = G_0 \cdot 10^{\frac{7,45t}{235+t}}$$

де $G_0 = 6,1$ мд при температурі 0°C ; t – температура, $^\circ\text{C}$.



1 – $T_{нов} = -6^\circ\text{C}$; 2 – $T_{нов} = -5^\circ\text{C}$; 3 – $T_{нов} = -4^\circ\text{C}$;
4 – $T_{нов} = -2^\circ\text{C}$; 5 – $T_{нов} = -1^\circ\text{C}$; 6 – $T_{нов} = 0^\circ\text{C}$

Рисунок 6 – Залежність відносної потужності коливань резонатора від відносної вологості повітря при: $V_в = 0$ м/с

При туманах з розмірами переохолоджених крапель від 7 до 15 мк спостерігається утворення сніговидної паморозі. Ожеледь утворюється, якщо розмір переохолоджених крапель становить 15 мк і більше [11].

Значною мірою на величину ожеледних відкладень на проводах ПЛ впливає вітер і його напрямок. Чим сильніший вітер, тим більше крапель осаджується із завітрянної сторони проводу в одиницю часу і тим інтенсивніше відкладення льоду. Залежність ваги льоду від кута зустрічного повітряного потоку на один погонний метр лінії визначається по формулі:

$$Q = \rho S h s \sin \alpha,$$

де Q – маса відкладення льоду, ρ – густина льоду, S – площа перетину льоду, h – товщина відкладення льоду, α – кут повітряного повороту.

Максимальне відкладення льоду утворюється на проводах, розташованих перпендикулярно до вітру (при такому напрямку вітру утворюються односторонні ОПУ), тому в експерименті необхідно використовувати саме цей напрямок вітру. На проводах, підвішених паралельно вітру, у середньому відкладається 18% максимального відкладення. Всі відкладення льоду залежать також від висоти підвісу проводів над поверхнею землі [12].

В лабораторних умовах за допомогою побутового розпилювача вдалося отримати мряку з розмірами крапель $\sim 30 \div 45$ мк. На рис. 7 приведена залежність відносної потужності коливань резонатора від температури повітря при мряці. Як видно із графіка, реакція резонатора у цьому випадку більш явно виражена, ніж при інших умовах утворення ожеледі. А на замерзання під час перпендикулярного вітру резонатор реагує практично миттєво.

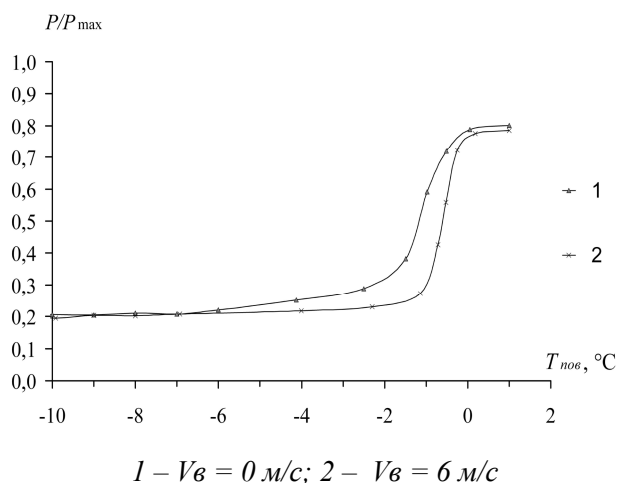


Рисунок 7 – Залежність відносної потужності коливань резонатора від температури повітря при мряці при $p_{нов} = 745$ мм.рт.ст.; $\varphi = 98\%$

Із порівняльного аналізу рис. 5 та рис. 7 можна зробити висновок, що давач реагує на основні метеопараметри, котрі сприяють утворенню ОПУ. Під дією вітру та при мряці утворення ожеледі відбувається при температурах вищих, ніж при замерзанні без вітру. Усі ці залежності мають S-подібну форму, а різкий перепад потужності коливань відповідає моменту утворення ожеледі (сублімації водяної пари). Також показано, що потужність коливань резонатора залежить від пружності водяної пари та відносної вологості повітря (рис. 6), що підтверджує можливість його використання у системах контролю процесу утворення ОПУ.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні види ОПУ та метеофактори, котрі сприяють їхньому виникненню. З'ясовано, що атмосферний лід утворюється внаслідок двох фізичних процесів: сублімація пари та кристалізація великих крапель води.

Визначено граничні умови, при яких можливе виникнення ОПУ.

Розроблено і описано експериментальну установку для дослідження параметрів біконічного резонатора під дією різних метеофакторів, котрі супроводжуються утворенням ОПУ.

Експериментально встановлено, що процес льодоутворення впливає на параметри електромагнітного поля відкритого біконічного резонатора, а саме: відбувається зсув його резонансної частоти.

Література

1. Кильницький О. Финансовая защита электропроводов // *Киевские ведомости*. – 2002. – № 19 (2533). – С. 1.
2. Мартазінова В.Ф. Довгостроковий прогноз вітроенергетичних зон на території України. – К.: Видання МНТЦ вітроенергетики НАН України. – 2001.
3. Будзко І.А., Колмогорова І.М. Сигналізація о начале и интенсивности образования гололеда на воздушных линиях // *Энергетик*. – 1979. – Вып. 2. – С. 31-36.
4. Руднева А.В. Гололед и обледенение проводов на территории СССР. – М.: Гидрометеоиздат, 1961. – 276с.
5. Федосенко Р.Я., Мельников А.Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. – М.: Энергия, 1977. – 320с.
6. Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Оцінка можливості використання даних державних метеостанцій для контролю стану об'єктів електричних мереж // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових

праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2008. – №21 – С. 143-147.

7. Лебединський І.Л., Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Способы и устройства предупреждения гололедно-изморозевых образований // *Вісник Сумського державного університету*. – 2008. – № 2. – С. 21-25.

8. Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Моделирование розподілу електромагнітних полів у відкритому біконічному резонаторі // *Методи та прилади контролю якості*. – 2008. – № 20. – С. 65-69.

9. Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Розрахунок електромагнітних полів у відкритому біконічному резонаторі // *Енергетика та електрифікація*. – 2008 – № 11. – С. 36-44.

10. Лопатин В.Н. Метеослужба энергетике // *Энергия, экономика, техника, экология*. – 1986. – Вып.10. – С.30-32.

11. Заглиев И.Г. Методика расчета изменения характеристик гололедного осадка вдоль провода на пролете // *Ветровые и гололедные нагрузки на линиях электропередачи и надежность электроснабжения*. – 1981. – Вып.1. – С.51-58.

12. Заглиев И.Г. Расчет ветровой нагрузки на обледенелые провода с учетом изменения характеристик осадка вдоль пролета // *Ветровые и гололедные нагрузки на линиях электропередачи*. – 1981. – Вып.1. – С.42-50.

Поступила в редакцію 04.02.2009р.

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Набока Б.Г.**