

До питання визначення опору ожеледно-паморозевих відкладень

Запропоновано спосіб вимірювання електричного опору ожеледно-паморозевих відкладень за допомогою двоканального осцилографа, що базується на методі використання закону Ома для змінного струму. Приведені вирази для розрахунку значень опору та ємності дослідного зразка, а також метрологічні оцінки розробленого способу вимірювання.

вимірювання електричних величин, електричний опір, ожеледно-паморозеві відкладення

Вступ. Щорічно у зимовий період року повітряні лінії електропередачі (ПЛЕ) піддаються дії ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ), що призводить до скорочення їх розрахункового строку служби, а у найбільш тяжких випадках — і до руйнування. Традиційно захист ПЛЕ від ожеледно-вітрових аварій проводиться за допомогою електротеплового методу, що передбачає профілактичний нагрів проводів або плавку ожеледі. При необгрунтовано ранньому профілактичному нагріві з наступним

© І. С. Гришук, М. В. Кубкін, О. А. Козловський, 2012

зниженням інтенсивності ожеледоутворення витрати на проведення цих заходів будуть марними. Якщо ж початок плавки ожеледі запізнений, а процес обледеніння інтенсивний, то можливе виникнення значних пошкоджень ПЛЕ. Точно визначити час проведення того чи іншого заходу захисту ПЛЕ від ОПВ можливо використовуючи прогнозування та контроль процесу утворення відкладень.

В останній час проводиться розробка та удосконалення інформаційних систем контролю обледеніння (ІСКО) проводів та тросів ПЛЕ [1, 2]. Складовими частинами сучасної ІСКО є наступні підсистеми: прогнозування часу початку обледеніння проводу; раннього визначення утворення ОПВ та класифікації їх типу; контролю ожеледного навантаження; передачі даних.

Постановка задачі. Ефективність підсистеми раннього визначення утворення ОПВ та класифікації їх типу визначається насамперед її здатністю класифікувати максимальну кількість видів ОПВ (з урахуванням ступеню їх небезпеки для ПЛЕ) на ранній стадії їх утворення. Існуючі підсистеми мають ряд недоліків, що пов'язані, насамперед, з типами первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) та алгоритмами обробки отриманої інформації [3].

Проведений аналіз існуючих ПВП показав, що у якості параметру контролю необхідно використовувати електричний опір ОПВ. Для спрощення розробки запропонованого ПВП [4] доцільно провести комп'ютерне моделювання його режимів роботи для різних типів ОПВ при різній температурі останніх. Так як для цього необхідна інформація про залежність питомого опору ОПВ від його густини та температури, виникає необхідність визначення опору для зразків різних типів ОПВ при їх різній температурі.

Аналіз публікацій. Вимірювати опір речовини можливо в постійному електричному та у змінному електромагнітному полях.

Визначити опір ОПВ на постійному струмі складно, так як дія постійного електричного поля викликає поляризацію ОПВ, через яку якої його опір значно зростає,

тому такі вимірювання не дають надійних результатів. Таким чином вимірювання доцільно проводити на змінному струмі.

Для вимірювання електричного опору змінному струму найбільше розповсюдження отримали методи: 1) порівняння з мірою; 2) використання закону Ома для змінного струму.

Методи порівняння з мірою реалізуються за допомогою мостів та потенціометрів змінного струму. Незважаючи на високу точність вимірювання, мости та потенціометри мають значні розміри. Окрім того, так як не існує взірцевої міри змінної ЕРС, потенціометри за точністю вимірювання значно поступаються мостам змінного струму. Реалізація цифрових приладів на основі мостових схем супроводжується значними ускладненнями як схемного рішення, так і автоматизації процесу зрівноваження.

Суть *методу використання закону Ома* полягає у вимірюванні напруги та струму в колі, а також зсуву фаз між ними і обчислення значення опору за законом Ома. До переваг цього методу можна віднести відносно просту реалізацію. Метод закону Ома по відношенню до методу порівняння з мірою має невисоку точність. Проте, така точність зазвичай є достатньою для практичних застосувань результатів вимірювання.

Існує декілька реалізацій цього методу.

У цифрових *RLC*-метрах вимірювання базуються на аналізі проходження тестового синусоїдального сигналу з заданою частотою через коло вимірювання. Недоліками цих приладів є фіксовані частоти вимірювання та низька верхня межа вимірювального діапазону опору — до 10 МОм. Прилади з плавним регулюванням тестової частоти та з широкими вимірювальними діапазонами (до 100 ГОм) мають значну вартість.

Спосіб «вольтметрів–фазометра» полягає в наступному: коло, що складається із послідовно з'єднаних елементів з відомим та невідомим (шуканим) значеннями опору під'єднується до генератора сигналів. Проводяться вимірювання напруги генератора, спаду напруги на відомому опорі та кута зсуву фаз між цими напругами. За значенням спаду напруги на відомому опорі та значенням самого опору обчислюється струм в колі, а після за законом Ома знаходиться значення шуканого опору. Недоліком методу є велика кількість приладів вимірювання (2 вольтметри та 1 фазометр), перевагою — можливість вимірювання опору на різних частотах та можливість плавного регулювання частоти тестової напруги.

Аналогом способу «вольтметрів—фазометра» є спосіб, в якому в якості вимірювального пристрою використовується двоканальний осцилограф. Значення напруг та зсуву фаз обчислюються за осцилограмою. Сучасні цифрові осцилографи дозволяють провести вимірювання зазначених величин в автоматичному режимі. Метод є достатньо простим, легко реалізується та добре зарекомендував себе у частотному діапазоні від 10^{-4} до 10^7 Гц [5]. Таким чином, для вимірювання опору ОПВ доцільним є метод закону Ома з використанням осцилографа.

Метою статті є висвітлення способу вимірювання електричного опору ожеледно-паморозевих відкладень за допомогою осцилографа.

Основна частина. Схема запропонованого способу представлена на рис. 1. Відмінною рисою способу є використання в якості опору з відомим значенням не окремого елемента (резистора), а внутрішнього опору осцилографа. Це пов'язано з наступними міркуваннями. Так як за попередньою оцінкою значення опору зразка ОПВ знаходиться в межах 1...4 ГОм, то струм через зразок буде достатньо малим. Тому, якщо в якості елемента з відомим опором використовувати низькоомний резистор, спад напруги на ньому буде нижче межі чутливості осцилографа. У разі використання

резистора з великим значенням опору $10^5 \dots 10^7$ Ом, він буде шунтуватись близьким по значенню внутрішнім опором осцилографа. Тому, при вимірюванні за наведеним нижче способом, в якості опору з відомим значенням використовується вхідний опір осцилографа.

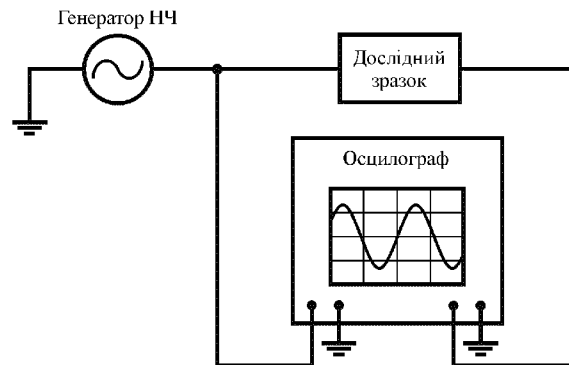
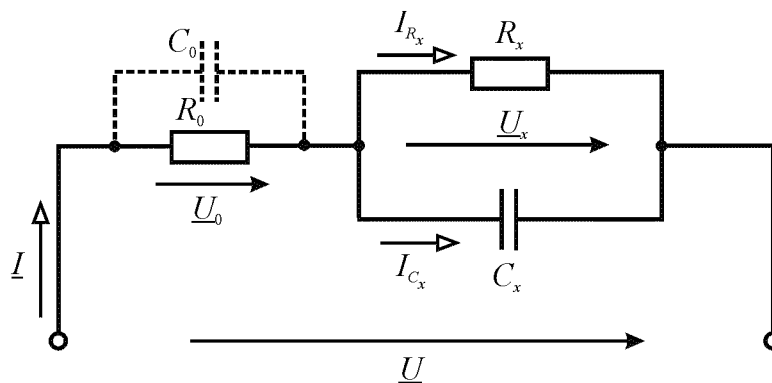


Рисунок 1 — Функціональна схема вимірювання опору з використанням осцилографа

Дослідний зразок можна представити у вигляді еквівалентної схеми заміщення паралельно з'єднаних опору R_x та ємності C_x , а вхідний опір осцилографа — у вигляді з'єднаних паралельно активного опору R_0 та ємності C_0 (рис. 2). Для усунення впливу ємності C_0 необхідно, щоб виконувалась умова:

$$\frac{1}{2\pi f C_0} \gg R_0, \quad (1)$$

де f — частота напруги генератора сигналів.



R_0, C_0 — відповідно вхідні опір та ємність осцилографа; R_x, C_x — відповідно опір та ємність дослідного зразку; I — повний струм в колі; I_{R_x}, I_{C_x} — відповідно активна та реактивна складові повного струму; U — напруга генератора сигналів; U_0 — спад напруги на опорі R_0 ; U_x — спад напруги на дослідному зразку

Рисунок 2 — Електрична схема заміщення функціональної схеми

Виходячи зі схеми заміщення, значення шуканих опору R_x та ємності C_x можна визначити як:

$$R_x = \frac{U_x}{I_{R_x}}; \quad (2)$$

$$C_x = \frac{1}{\omega X_{C_x}} = \frac{1}{\omega} \frac{I_{C_x}}{U_x}. \quad (3)$$

Значення U_x, I_{R_x}, I_{C_x} , знаходяться за векторною діаграмою струмів та напруг (рис. 3).

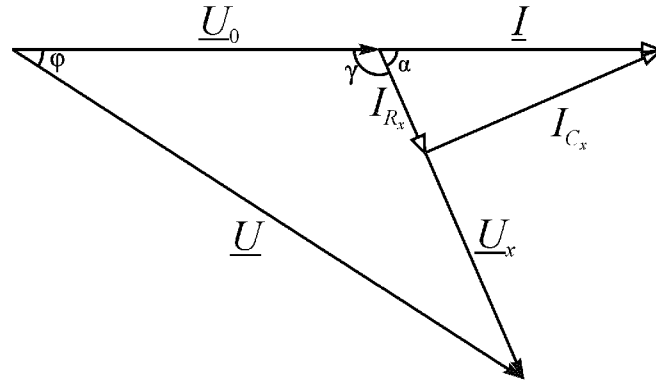


Рисунок 3 — Векторна діаграма струмів та напруг для кола зображеного на рис. 2

Шляхом вимірювань, згідно схеми (рис. 1), отримуються значення напруг U , U_0 та кут зсуву фаз φ між ними:

$$\varphi = \omega \tau = 2\pi f \tau, \quad (4)$$

де τ — горизонтальна різниця фаз (рис. 4).

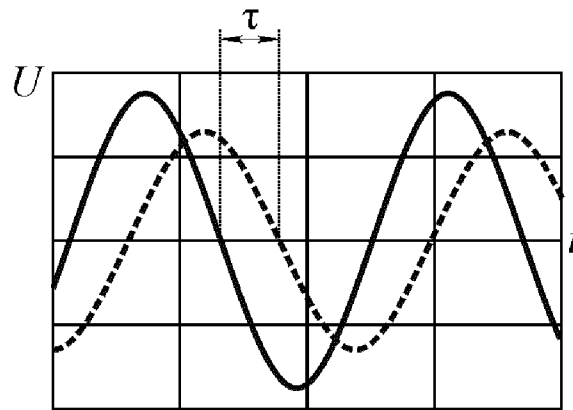


Рисунок 4 — До визначення кута зсуву фаз φ між U та U_0 за осцилограмою

За теоремою косинусів, згідно векторної діаграми, значення напруги U_x визначається як:

$$U_x = \sqrt{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos \varphi}. \quad (5)$$

Струми I_{R_x} та I_{C_x} будуть відповідно визначатись:

$$I_{R_x} = I \cos \alpha; \quad (6)$$

$$I_{C_x} = I \sin \alpha, \quad (7)$$

де $I = \frac{U_0}{R_0}$ — значення повного струму;

$\alpha = \arcsin\left(\frac{U}{U_x} \sin \varphi\right)$ — кут зсуву фаз між складовими струму I .

Підставивши вирази (5), (6), (7) в рівняння (2) та (3) отримуємо:

$$R_x = \frac{\sqrt{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}}{\frac{U_0}{R_0} \cos \left[\arcsin \left(\frac{U}{\sqrt{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}} \sin(2\pi f \tau) \right) \right]}; \quad (8)$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi f} \frac{\frac{U_0}{R_0} \sin \left[\arcsin \left(\frac{U}{\sqrt{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}} \sin(2\pi f \tau) \right) \right]}{\sqrt{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}}. \quad (9)$$

Перетворюючи (8) та (9) остаточно маємо:

$$R_x = \frac{R_0}{U_0} \frac{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}{\sqrt{U^2 \cos^2(2\pi f \tau) + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}}; \quad (10)$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_0}{R_0} \frac{U \sin(2\pi f \tau)}{U^2 + U_0^2 - 2UU_0 \cos(2\pi f \tau)}. \quad (11)$$

Вирази (10) та (11) є справедливими для випадку, коли опір дослідного зразка приблизно дорівнює вхідному опору осцилографа ($R_x \approx R_0$), тоді й напруга генератора сигналів U не буде значно відрізнятися від спаду напруги на опорі U_0 ($U \approx U_0$). Коли опір дослідного зразка є значно більшим ніж вхідний опір осцилографа ($R_k \gg R_0$), напруга генератора сигналів U буде значно більшою за спад напруги U_0 на опорі R_0 ($U \gg U_0$), а отже падіння напруги на дослідному зразку U_x буде близьке до напруги генератора сигналів ($U \approx U_x$). Зважаючи на це, вирази (10) та (11) приймуть вигляд:

$$R_x = \frac{R_0}{U_0} \frac{U}{\cos(2\pi f \tau)}; \quad (12)$$

$$C_x = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_0}{R_0} \frac{\sin(2\pi f \tau)}{U}. \quad (13)$$

Абсолютні похибки визначення опору ΔR_x та ємності ΔC_x , враховуючи кореляцію між U та U_0 , φ та τ , будуть [6]:

$$\Delta R_x = \left| \frac{\partial R_x}{\partial U} \Delta U \right| + \left| \frac{\partial R_x}{\partial U_0} \Delta U_0 \right| + \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_0} \Delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial R_x}{\partial f} \Delta f \right| + \left| \frac{\partial R_x}{\partial \tau} \Delta \tau \right|; \quad (14)$$

$$\Delta C_x = \left| \frac{\partial C_x}{\partial U} \Delta U \right| + \left| \frac{\partial C_x}{\partial U_0} \Delta U_0 \right| + \left| \frac{\partial C_x}{\partial R_0} \Delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial C_x}{\partial f} \Delta f \right| + \left| \frac{\partial C_x}{\partial \tau} \Delta \tau \right|, \quad (15)$$

де $\Delta U, \Delta U_0, \Delta R_0, \Delta f, \Delta \tau$ — абсолютні похибки вимірювання U, U_0, R_0, f, τ відповідно.

Вирази (14) та (15) будуть давати *верхню* межу похибок вимірювання.

Для перевірки методики проведено експеримент з відомими значеннями опору резистора $R_x = 22 \text{ МОм} \pm 5\%$ та ємності конденсатора $C_x = 2,7 \text{ нФ} \pm 10\%$. Для виконання умови (1) вимірювання проводились на частоті $f \approx 20 \text{ Гц}$. В якості джерела тестового сигналу використано генератор низькочастотних сигналів ГЗ-102, а в якості осцилографа — цифровий чотирьохканальний осцилограф RIGOL DS1104B. Вхідний опір осцилографа $R_0 = 1 \text{ МОм} \pm 2\%$. Похибки вимірювань осцилографа за напругою та часом складають відповідно [7]:

$$\Delta U = \pm(3\%U_{\text{вим}} + 0,05C_U); \quad (16)$$

$$\Delta \tau = \pm(T_s + 50 \cdot 10^{-6} \tau_{\text{вим}} + 0,4 \cdot 10^{-9} \text{ с}), \quad (17)$$

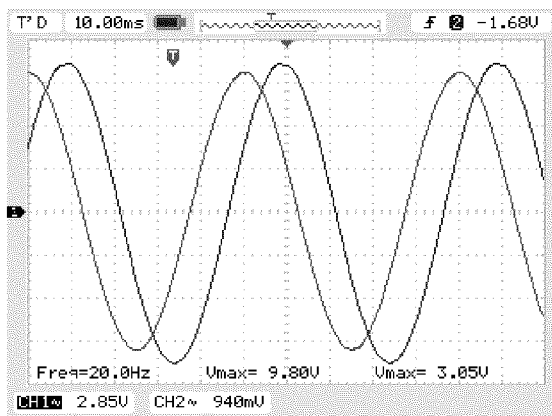
де $U_{\text{вим}}$ — виміряне значення напруги, В;

C_U — ціна поділки шкали напруг, В/под.;

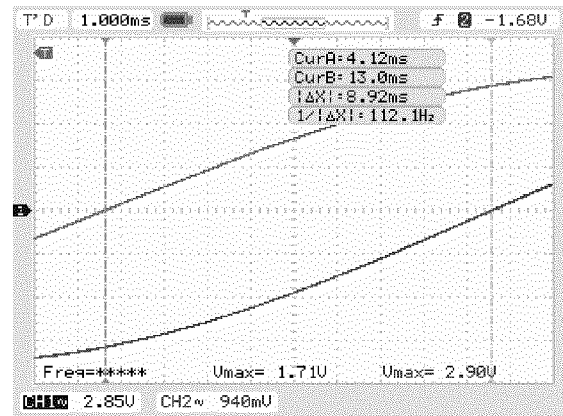
T_s — час дискретизації, с;

$\tau_{\text{вим}}$ — виміряне значення часу, с.

На рис. 5 представлено осцилограми, на яких наведено криві напруг та результати автоматичного вимірювання їх параметрів: $U = 9,80 \text{ В}$, $U_0 = 3,05 \text{ В}$, $f = 20,0 \text{ Гц}$ (рис. 5, а), $\tau = 8,92 \text{ мс} = 8,92 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ (рис. 5, б). При цьому: $C_U = 2,85 \text{ В/под.}$, $C_{U_0} = 0,940 \text{ В/под.}$, $T_s = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Відповідно до (16), (17) похибки вимірювань будуть складати: $\Delta U = 0,4 \text{ В}$; $U = 0,1 \text{ В}$; $\Delta R_0 = 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}$; $\Delta f = 0,01 \text{ Гц}$; $\Delta \tau = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.



а)



б)

Рисунок 5 — Осцилограми напруг

Середні значення опору R_x та ємності C_x обчислені за (10) та (11):

$$R_x = 21 \text{ МОм}, C_x = 2,7 \text{ нФ}.$$

Абсолютні похибки вимірювання опору ΔR_x та ємності ΔC_x за (14) та (15):

$$\Delta R_x = 3 \text{ МОм}, \Delta C_x = 0,3 \text{ нФ}.$$

Таким чином:

$$R_x = (21 \pm 3) \text{ МОм}, C_x = (2,7 \pm 0,3) \text{ нФ}.$$

Відносні похибки вимірювання:

$$\delta R_x = \pm 15\%, \delta C_x = \pm 10\%.$$

Номінальні значення використаних в досліді резистора та ємності, а також їх значення, обчислені за результатами експерименту, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 — Порівняння номінальних та експериментальних значень

Величина	Номінальні значення	Обчислені значення
R_x , МОм	22	21
ΔR_x , МОм	1,1	3
C_x , нФ	2,7	2,7
ΔC_x , нФ	0,27	0,3

З результатів вимірювань можна побачити, що довірчі інтервали номінальних значень та значень, виміряних непрямым методом, перекриваються (рис. 6).

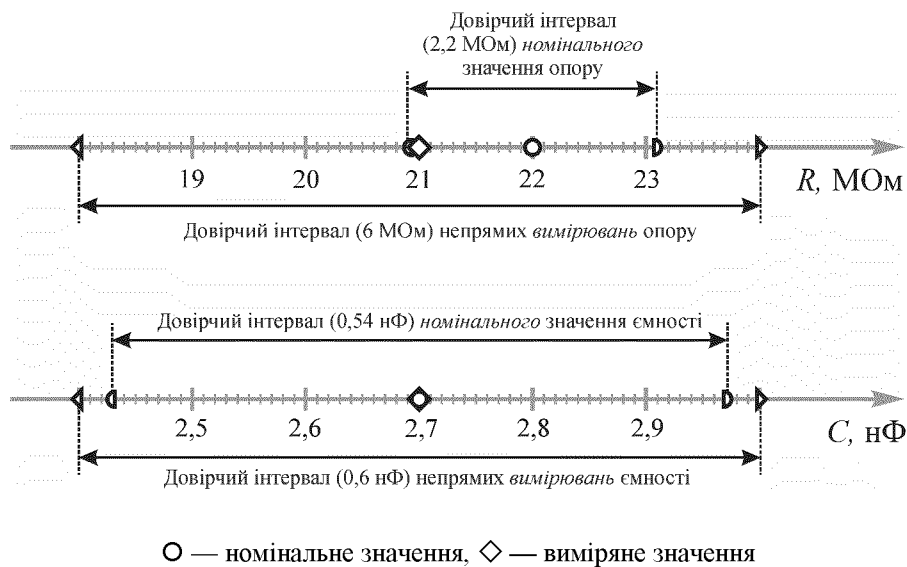


Рисунок 6 — Результати обробки експериментальних даних

Висновки.

- 1) Запропонований спосіб вимірювання опору має необхідну для практичних застосувань точність.
- 2) На підставі проведених досліджень відкривається перспектива проведення експериментальних вимірювань електричного опору ОПВ та розробки алгоритму класифікації типів ОПВ на резистивних ПВП.

Список літератури

1. Дьяков А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем / А. Ф. Дьяков, А. С. Засыпкин, И. И. Левченко. — Пятигорск: РП «Южэнерготехнадзор», 2000. — 284 с.
2. Козловський О. А. Комп'ютеризована система контролю за станом повітряних ліній електропередачі при ожеледоутворенні / О. А. Козловський, С. В. Серебренніков, М. В. Кубкін // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: V міжнародна науково-технічна конф.: 75-річчю Приазов. держ. техн. ун-ту присвячується: зб. праць. — Маріуполь: Вид-во ПДТУ, 2005. — С.327—329.
3. Козловський О. А. Розробка та комп'ютерне моделювання режимів роботи первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення / О. А. Козловський, М. В. Кубкін, І. С. Грищук // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: збірник наукових праць КНТУ — Кіровоград, 2011. — Вип. 24, Ч.І. — С. 308—315.
4. Пат. 63655 Україна, МПК⁸ H02G 7/16. Сигналізатор обледеніння проводів повітряних ліній електропередачі / О. А. Козловський, І. С. Грищук; заявник і патентотримувач Кіровоградський національний технічний університет – №u201106291; заявл. 19.05.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. №19, 2011 р.
5. Petrenko V. Electrical Properties of Ice / Petrenko V. // Special Report 93-20, August 1993. — 70 p.
6. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
7. Rigol User Guide DS1000B Series Digital Oscilloscopes. — Rigol Technologies Inc., 2009 — 166 p.

И. Грищук, М. Кубкин, А. Козловский

К вопросу расчета сопротивления гололедно-изморозевых отложений

Предложен способ измерения электрического сопротивления гололедно-изморозевых отложений с помощью двухканального осциллографа, который базируется на методе использования закона Ома для переменного тока. Приведены выражения для вычисления значений сопротивления и емкости, а также метеорологические характеристики предложенного способа.

I. Gryshchuk, M. Kubkin, O. Kozlovskyi

On defining resistance of glaze-ice and rime deposition

The article offers the method of measuring electrical resistance of glaze-ice and rime deposition with the help of dual channel oscilloscope. It is based on the method of usage of Ohm's law for alternating current. The article provides expressions for the calculation of resistance value as well as meteorological evaluation of the developed method of measuring.

Одержано 15.09.12