

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ

УДК 004.94, 621.315.175

### МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

О. Козловський<sup>1</sup>, Д. Трушаков<sup>1</sup>, С. Рендзіняк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет  
просп. Університетський 8, 25006 Кропивницький, Україна  
[kozlovskiyoa@gmail.com](mailto:kozlovskiyoa@gmail.com), [dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:dmitriy-kntu@yandex.ru)

<sup>2</sup>Національний університет “Львівська політехніка”  
вул. Степана Бандери 12, 79000 Львів, Україна  
[emd@polynet.lviv.ua](mailto:emd@polynet.lviv.ua)

Наявні системи діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж мають низку недоліків і в умовах зміни клімату не відповідають сучасним вимогам точності. Запропоновано 3D-модель вимірювального перетворювача в програмному комплексі SolidWorks, яку використано для теплових розрахунків удосконаленої прогнозувальної системи діагностування. За результатами розв’язування гідродинамічної та теплової задач у модулі Flow Simulation визначено розподіл температури на поверхні вимірювального перетворювача. Підтверджено таке: тепло, що його виділяє термоелектричний модуль, не впливає на зону контролю первинного вимірювального перетворювача.

*Ключові слова:* вимірювальний перетворювач, ожеледоутворення, теплообмін, метод скінченних елементів, SolidWorks, Flow Simulation.

Вичерпання розрахункового терміну експлуатації повітряних ліній розподільних електричних мереж на фоні посилення потужності ожеледно-вітрових впливів з огляду на зміни в кліматичній системі України спонукає до невідкладного вдосконалення методів і засобів діагностування аварійних ситуацій. Наявні системи діагностування ожеледоутворення мають низку недоліків і не задовольняють сучасні вимоги точності [1].

Ми обґрунтували вибір параметра діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній [1] та конструкцію первинного вимірювального перетворювача (ПВП) ожеледоутворення [2]. Для технічної реалізації запропонованої системи діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних розподільних електромереж [3] необхідно виконати теплові розрахунки такого вимірювального перетворювача. З огляду на широкий сортамент проводів типу А(АС) та можливості виконання ПВП різної довжини для однієї задачі [2] доцільно розробити комп’ютерну модель вимірювального перетворювача, придатну до застосування у відомому програмному комплексі САПР SolidWorks, який призначений для 3D проектування виробів будь-якої складності.

Наша мета – розроблення комп'ютерної моделі для моделювання процесів охолодження (нагрівання) первинного вимірювального перетворювача; оцінка ефективності відведення тепла термоелектричного модуля (ТЕМ) з вимірювальної зони у заданих кліматичних умовах.

**Формулювання задачі.** Повітряний потік зі сталою швидкістю  $v$  та температурою  $t$  подають на вхід каналу. Швидкість обтікання вимірювального перетворювача відповідає числу Маха  $M \ll 1$ . Деталі вимірювального перетворювача мають певну теплопровідність та конвективний теплообмін між собою і навколишнім середовищем. Первинний вимірювальний перетворювач укритий плівкою води.

**Припущення.** Повітря вважають нестисливою, невагомою, теплопровідною, в'язкою рідиною; режим плинину (плинного середовища) – змішаний (ламінальний і турбулентний); внутрішніх джерел тепла у плинні нема.

Плівка, що покриває первинний вимірювальний перетворювач, має властивості “твердого” тіла, теплові характеристики (теплопровідність і теплоємність) якого ідентичні рідкій воді. Цей підхід дає змогу виконувати аналіз лише для одного плинного середовища – повітря. Виділення тепла під час замерзання плівки води на первинному вимірювальному перетворювачі не враховують.

У ході розрахунку реальну теплоізоляцію елементів вимірювального перетворювача замінено на ідеальну визначенням відповідних граничних умов. Не враховано електричні перехідні процеси у ТЕМ. Усі теплові контакти прийнято ідеальними, а деталі вимірювального перетворювача мають гладку поверхню. Досліджували режим роботи вимірювального перетворювача у найскладніших метеорологічних умовах ( $t_a = 2,05$  °С,  $v_{a,x} = 10$  м/с) щодо охолодження первинного вимірювального перетворювача.

**Опис моделі.** 3D-модель вимірювального перетворювача (рис. 1) складається з теплової трубки, теплоприймача, термоелектричного модуля і первинного вимірювального перетворювача з холодоприймачем.

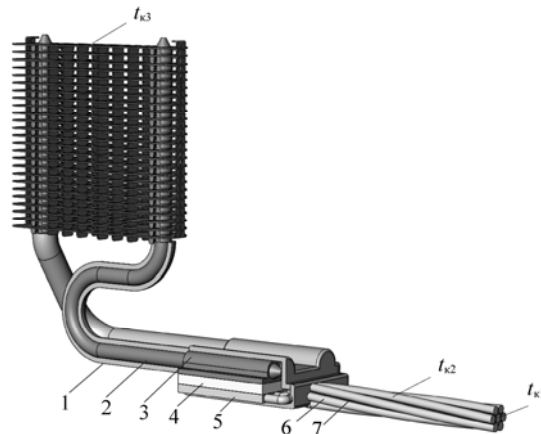


Рис. 1. Кінцева 3D модель вимірювального перетворювача:

- 1 – теплоізоляція; 2 – тепла трубка; 3 – теплоприймач; 4 – термоелектричний модуль; 5 – холодоприймач первинного вимірювального перетворювача; 6 – первинний вимірювальний перетворювач; 7 – електроізоляція.

Тепловим навантаженням ТЕМ є паралелепіеди, виконані з того ж матеріалу, що й дротини первинного вимірювального перетворювача, і розташовані ширшими гранями в одній площині. Первинний вимірювальний перетворювач спроектовано так, що термоелектричний модуль охолоджує окремо кожну з дротин. Таке вирішення дає змогу нівелювати вплив тефлонових електроізоляційних прокладок між головним та додатковими електродами.

За зроблених припущень нестационарний просторовий потік у рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат ( $x_i, i = 1, 2, 3$ ), що обертається з кутовою швидкістю  $\Omega$  навколо осі, яка проходить через її початок, моделюємо за допомогою системи рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії [4, 5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) &= 0; \\ \frac{\partial \rho v_i}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij} + T_{ij}^R) + S_i; \\ \frac{\partial \rho H}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho v_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (T_{ij} + T_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial \tau} - T_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_j v_j + Q_H; \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина плинину;  $x$  – координата;  $\tau$  – час;  $v$  – швидкість повітряного потоку;  $p$  – тиск плинного середовища;  $T_{ij}$  – тензор рейнольдсових напружень для ньютонівського плинину,

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

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $T_{ij}^R$  – тензор рейнольдсових напружень для ньютонівського плинного середовища з урахуванням припущення Бусінеска,

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

$\mu_t$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості,

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

$f_\mu$  – функція турбулентної в'язкості,

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

$R_y, R_T$  – змінні, які визначають з виразів

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}, \quad R_T = \frac{\rho k^2 \varepsilon}{\mu};$$

$y$  – відстань від локального усередненого об'єму плинного середовища до поверхні роз-

рахункової стінки;  $k$  – кінетична енергія турбулентності;  $\varepsilon$  – дисипація кінетичної енергії турбулентності;  $\delta_{ij}$  – дельта-функція Кронекера ( $i=j \rightarrow \delta_{ij}=1, i \neq j \rightarrow \delta_{ij}=0$ );  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Кінетичну енергію турбулентності та її дисипацію визначають, розв'язуючи два додаткові рівняння [5]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k; \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho v_k \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $S_k, S_\varepsilon$  – характеристики пульсацій кінетичної енергії і дисипації цієї енергії,

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

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

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

$P_B$  – турбулентність, зумовлена силою плавучості,

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

$g_i$  – складова гравітаційного прискорення;  $C_B = 1$  при  $P_B > 0$  і  $C_B = 0$  при  $P_B \leq 0$ ;  $\sigma_B = 0,9$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1$ ,  $\sigma_k = 1$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$  – модельні коефіцієнти [5];  $S_i$  – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу повітряного потоку,  $S_i = S_{gravity} = -\rho g_i$ ;  $H$  – повна ентальпія плинину,

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

$h$  – ентальпія;  $\lambda$  – теплопровідність;  $q_i$  – дифузійний тепловий потік,

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

$Pr$  – число Прандтля;  $\sigma_c = 0,9$  – модельна константа;  $Q_H$  – тепло, що його виділяє джерело тепла в одиничному об'ємі плинину.

Теплопередачу у твердому тілі моделює рівняння [4, 5]

$$\frac{\partial \rho e}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i \frac{\partial t}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (4)$$

де  $e = ct$  – питома внутрішня енергія;  $c$  – питома теплоємність за сталого тиску;  $\lambda$  – теплопровідність тіла;  $Q_H$  – питоме (в одиниці об’єму) виділення (поглинання) тепла джерелом;  $Q_H = -Q_{TEC}$ ;  $Q_{TEC}$  – питоме поглинання тепла термоелектричним модулем.

Зведена товщина плівки води

$$l_{film} = \left( \frac{\mu_w^2}{\rho_w^2 g} \right)^{0,33},$$

де  $\mu_w$  – коефіцієнт динамічної в’язкості води;  $\rho_w$  – густина води за температури 2 °С.

У FlowSimulation термоелектричні елементи Пельтьє модельовані відповідними граничними умовами, які задають за їхніми каталожними даними: максимальною кількістю тепла  $Q_{max}$ , максимальним перепадом температур  $\Delta t_{max}$ , максимальною силою струму  $i_{max}$  та максимальною напругою  $U_{max}$ .

Тепло, що передається з “холодної” на “гарячу” сторону термоелектричного модуля, визначають як

$$Q_c = ait_c - \frac{Ri^2}{2} - k\Delta t;$$

відповідно, на гарячій поверхні модуля виділиться тепло

$$Q_h = ait_h + \frac{Ri^2}{2} - k\Delta t,$$

де  $a$  – коефіцієнт Зеєбека;  $i$  – сила струму;  $t_c$  – температура холодної “поверхні” елемента;  $R$  – електричний опір елемента;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності елемента;  $\Delta t$  – перепад температур між холодною та гарячою поверхнею термоелемента,  $\Delta t = t_h - t_c$ ;  $t_h$ ,  $t_c$  – температури, відповідно, “гарячої” та “холодної” поверхонь термоелектричного модуля.

За потреби теплову дію електричного струму на ПВП можна врахувати рівнянням Джоуля–Ленца (для ізотропного матеріалу) [5]

$$Q_j = rj^2,$$

де  $r$  – погонний електричний опір;  $j$  – густина електричного струму.

За умов стаціонарності вектор густини електричного струму

$$\mathbf{j} = - \left( \frac{1}{r_{11}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \frac{1}{r_{22}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2}, \frac{1}{r_{33}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right)$$

визначають через електрорпотенціал  $\varphi$  у  $i$ -й координаті з рівняння Лапласа

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{r_{ii}} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) = 0,$$

де  $r_{ii}$  – температуро-залежний електричний опір у  $i$ -й координаті.

Теплопровідність теплової трубки розраховують на підставі заданого значення ефективного теплового опору між охолоджуванним об’єктом і випаровувальною зоною теплової трубки, а також розрахованого значення теплового опору твердотілого компо-

нента.

Перепад температури за довжиною теплової трубки [5]

$$\Delta t = QR,$$

де  $Q$  – тепловий потік через теплову трубку;  $R$  – повний тепловий опір.

Граничні умови для системи рівнянь (1)–(4) формують так:

гідродинамічні:

- умова на вході (*Velocity*)  $v_i = 10$  м/с;
- умова на виході (*Environment Pressure*)  $p = 101\,325$  Па;
- вимірювальний перетворювач у потоці повітря нерухомий  $\Omega = 0$  м/с;
- сила тяжіння (*Gravity*) –  $9,81$  м/с<sup>2</sup>;
- турбулентність повітряного потоку (*Turbulence Intensity*) –  $0,1\%$ ;

теплові:

- початкова температура ВП (*Wall Temperature*) –  $2,05^\circ\text{C}$ ;
- температура повітряного потоку (*Fluid Temperature*) –  $2,05^\circ\text{C}$ ;
- теплоізоляція тіл (*Ideal Wall*), тобто для них виконується умова Неймана:  $\partial t / \partial n = 0$ , де  $n$  – нормаль до відповідної грані;
- стандартний ТЕМ, керований параметр (*Current, A*);
- омічне нагрівання ПВП (*Current, A*).

**Скінченно-елементна сітка.** Для знаходження числового розв’язку поставленої задачі її нестационарну математичну модель (1)–(4) дискретизують за простором та часом. Для виконання дискретизації за простором усю розрахункову область покривають розрахунковою сіткою, грані комірок якої ортогональні координатним площинам глобальної системи координат 3D моделі SolidWorks. Отже, розрахункову сітку описують комірками, що мають форму паралелепіпедів.

Модуль FlowSimulation використовує метод кінцевих об’ємів, тому значення незалежних змінних розраховуються в центрах комірок, а на гранях цих комірок – потоки маси, імпульсу, енергії, необхідні для розрахунку цих значень.

Базову сітку отримано розбиттям розрахункового домену на шари заданої кількості площин. Оскільки нема апроксимації граней розрахункових комірок плинину, що стикаються з поверхнею дрібних тіл, то для їхнього розташування розрахунковою сіткою використано процедури локального подрібнення сітки поблизу цих поверхонь. Також використано спеціальні процедури розташування розрахунковою сіткою тонких стінок, що їх омиває плин, та тонких шарів різномірних матеріалів у твердих тілах без подрібнення комірок сітки до меншої товщини стінки.

Для підвищення точності моделі в околі малих геометричних тіл (електроізоляційні плівки, канали між електродами) використано локальні розрахункові сітки з властивостями, описаними вище.

На рис. 2 відображено в площині  $x_0y$  розрізи скінченно-елементної сітки 3D розробленої моделі вимірювального перетворювача.

Для ефективнішого розрахунку тиску та швидкості плинину дискретизацію за часом виконано методом розщеплення операторів типу SIMPLE [6].

Регулярність створеної сітки 3D моделі перевірено збільшенням її частоти до досягнення сіткової збіжності розв’язку математичної задачі, результати перевірки наведено в табл. 1.

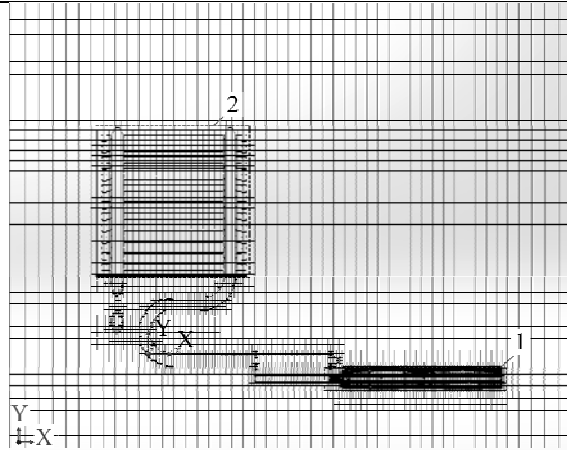


Рис. 2. Розрізи скінченно-елементної сітки 3D моделі вимірювального перетворювача в площині  $xOy$ :  
 1 – область локальної сітки № 1; 2 – область локальної сітки № 2.

Таблиця 1

Перевірка регулярності сітки 3D моделі

Номер з/п	Кількість комірок сітки, шт.			Контрольні параметри (рис. 1)		
	у плинні	твердого тіла	часткових	$t_{k1}, ^\circ\text{C}$	$t_{k2}, ^\circ\text{C}$	$t_{k3}, ^\circ\text{C}$
1	278 634	234 374	390 603	-10,07	-11,13	9,03
2	395 607	338 328	614 841	-9,18	-10,18	9,05
3	724 609	577 035	1 019 000	-9,02	-10,05	8,07
4	910 245	1 116 160	1 510 604	-9,04	-10,05	8,01

**Результати.** Первинний вимірювальний перетворювач є незручно обтічним тілом, за яким формується велика область відриву зі зворотно-циркуляційним потоком (рис. 3).

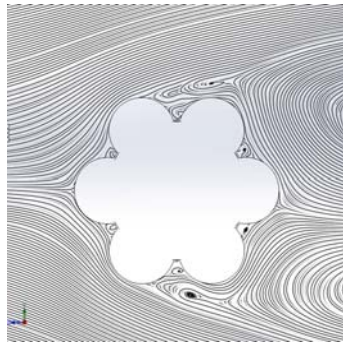


Рис. 3. Малі циркуляційні зони у впадинах первинного вимірювального перетворювача.

Порівняно з круговим циліндром того ж діаметра та довжини за ідентичних гідродинамічних та теплових умов область відриву за ПВП має несиметричні вихори зі спіральними вузлами, які помітно спотворюють лінії основного плинину. У впадинах між електродами виникають суттєві циркуляційні зони (див. рис. 2). Електроди ПВП формують

поздовжню гребенеподібну спіральну поверхню, тому відрив потоку за ним зміщується по дугоподібній траєкторії. Для середини ПВП ( $l = 40$  мм) нижня точка відриву визначена криволінійною координатою  $l_{\text{відр}} = 7,49$  мм, за якою тиск не відновлюється і не змінюється (рис. 4).

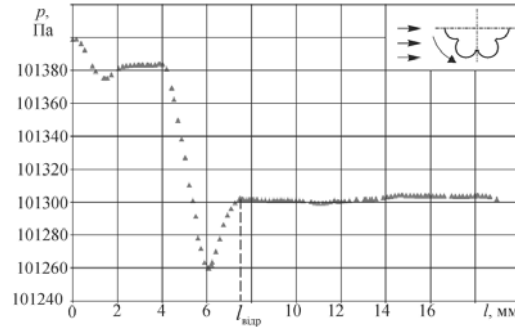


Рис. 4. Графік розподілу збиткового тиску в нижньому півколі поверхні ПВП.

У плинні процес перенесення тепла зумовлений двома механізмами: конвективним перенесенням і теплопровідністю. У разі безвідривного обтікання роль конвективного перенесення переважає, а теплопровідність веде лише до перенесення тепла у напрямі, поперечному до напрямку плинну. Проте у зривних течіях ефекти теплопровідності досить суттєві, особливо в зоні меж основного потоку [7]. Результати, відображені на рис. 5, свідчать про суттєвий вплив відриву потоку на розподіл температур на поверхні ПВП

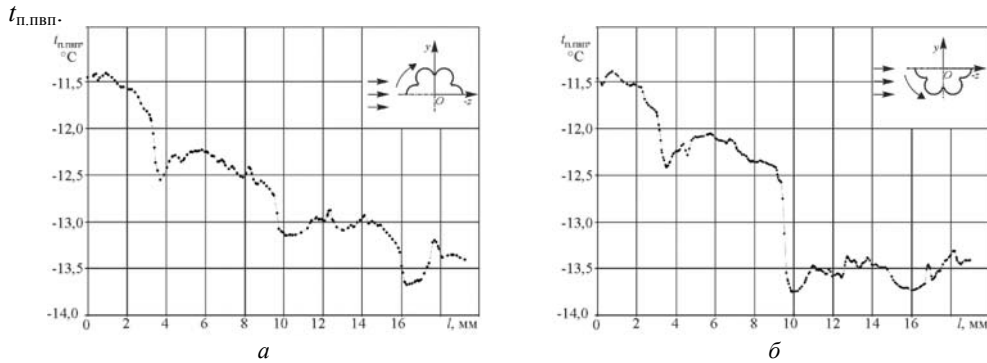


Рис. 5. Розподіл температури по поверхні первинного вимірювального перетворювача (площина  $uOz$  перетинає первинний вимірювальний перетворювач по центру):  
 а – плин омиває верхнє півколо; б – плин омиває нижнє півколо.

За точками відриву у впадинах формуються зворотні течії малої швидкості (до 1 м/с) і відбувається суттєве охолодження повітря (до  $-12,5^{\circ}\text{C}$ ), тому ефекти конвекції знижуються. У кормовій частині плин, що перебуває на лінії зворотно-циркуляційної течії, зазнає циклічного нагрівання основним потоком у зоні його межі зі зворотною течією завдяки поперечному перенесенню тепла, зумовленому теплопровідністю з подальшим конвективним теплообміном з тепловим примежовим шаром. Тому температура корми первинного вимірювального перетворювача знижується до  $-13,7^{\circ}\text{C}$ .

Завдяки відведенню тепла з теплового боку термоелектричного модуля тепловими



трубками вдалося усунути його вплив на зону вимірювання ПВП у найтяжчому режимі роботи вимірювального перетворювача – коли потік напрямлений уздовж його поздовжньої осі.

На рис. 6 показано залежність температури ПВП від робочого струму термоелектричного модуля типу CP-1,4-127-06L. Розрахунок виконували для значень струму TEM від 2,5 до 5,5 А з кроком 0,5 А у режимі охолодження. За заданого теплового навантаження TEM та найскладніших метеоумов найліпшу ефективність охолодження досягнуто в разі струму живлення 4–5 А, що є близьким до рекомендованих значень  $(0,75-0,8) I_{\max}$  [8, 9].

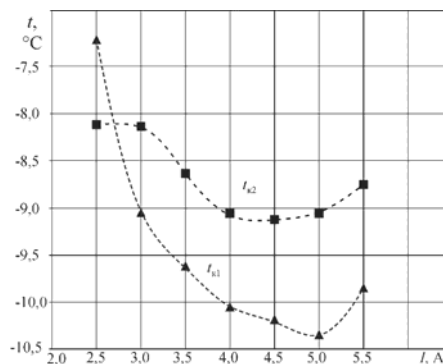


Рис. 6. Залежність температури у контрольних точках  $t_{k1}$  та  $t_{k2}$  від струму TEM (CP-1,4-127-06L).

Розглянутий термоелектричний модуль має достатню потужність для охолодження первинного вимірювального перетворювача в режимах роботи, близьких до оптимального.

Для верифікації розробленої комп'ютерної моделі вимірювального перетворювача розраховано коефіцієнт конвективного теплообміну (поверхневий параметр) первинного вимірювального перетворювача в застосунку FlowSimulation та за методикою, наведеною у праці [1]. Різниця в отриманих результатах становила  $\approx 9\%$ .

Отже, запропоновану комп'ютерну модель рекомендовано використовувати в разі проектування вимірювальних перетворювачів прогнозувальних систем технічного діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Козловський О. А. Обґрунтування вибору параметру діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж / О. А. Козловський, А. Ю. Орлович, А. В. Некрасов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний наук.-виробн. журн. – 2015. – Вип. 3. – С. 149–157.
2. Kozlovskiy O. A measuring transducer in the system of technical diagnosis of overhead lines icing in electrical distribution networks / Oleksandr Kozlovskiy, Dmytro Trushakov, Serhiy Rendzinyak // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 5. – N 1. – P. 17–22.
3. Козловський О. А. Автоматизована система технічної діагностики проводів повітряних ліній електропередачі 6–10 кВ / О. А. Козловський, О. І. Сіріков // Техніка в

- сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 383–390.
4. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др.] – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1008 с.
  5. SolidWorks Flow Simulation 2013. Technical Reference. – 2013. – 193 p.
  6. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow / Suhas V. Patankar. – Washington DC Hemisphere : CRC Press 1980. – 197 p.
  7. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / [под ред. А. К. Любимова]. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 2006. – 227 с.
  8. Термоэлектрические модули для промышленного применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kryothermtec.com/ru/thermoelectric-coolers-for-industrial-applications.html>.
  9. Васильев Е. Н. Анализ эффективности применения термоэлектрических модулей в системах охлаждения радиоэлементов / Е. Н. Васильев, В. А. Деревянко // Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. академика М. Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 4 (50). – С. 9–13.

Стаття: надійшла до редакції 10.02.2017,

доопрацьована 20.02.2017,

прийнята до друку 22.02.2017.

## SIMULATION OF MEASURING TRANSDUCERS USED FOR DIAGNOSIS OF ICING ON OVERHEAD ELECTRIC POWER DISTRIBUTION LINES

**O. Kozlovskyi<sup>1</sup>, D. Trushakov<sup>1</sup>, S. Rendzinyak<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Central Ukrainian National Technical University  
ave. University, 8, 25006 Kropyvnytskyi, Ukraine  
[kozlovskyioa@gmail.com](mailto:kozlovskyioa@gmail.com), [dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:dmitriy-kntu@yandex.ru)

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University  
S. Bandera 12, 79000 Lviv, Ukraine  
[emd@polynet.lviv.ua](mailto:emd@polynet.lviv.ua)

There is a number of disadvantages in existing systems of diagnosing ice formation on overhead electric power distribution lines, under the conditions of climate change. A 3D model of a measuring transducer was designed in the SolidWorks software environment that used for improved predictive diagnostic system. In the Flow Simulation software module, the temperature distribution over the surface of the measuring transducer was determined as the result of the solution of hydrodynamic and thermal tasks. It was confirmed that heat emitted by the thermoelectric module has no influence on a zone controlled by the sensor.

*Key words:* measuring transducer, icing, modeling of heat transfer processes, finite element method, SolidWorks, Flow Simulation.