

УДК 536.532

П.І. Скоропад, д.т.н., С.В. Маньковський, к.т.н., Е.Й. Маньковська  
Національний університет «Львівська політехніка»**ПРОГРАМА CorrSim2014 ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КОРОЗИЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

*Побудовано модель чутливого елемента термоперетворювача, який працює в агресивному середовищі. Розроблено алгоритм розрахунку опору чутливого елемента термоперетворювача та реалізовано його у середовищі MATLAB під назвою CorrSim2014. Проведено моделювання рівномірної та пітингової корозії для різних форм поперечного перерізу чутливих елементів.*

**Ключові слова:** термоперетворювач, чутливий елемент, моделювання корозії

*Построена модель чувствительного элемента термопреобразователя, который работает в агрессивной среде. Разработан алгоритм расчета сопротивления чувствительного элемента термопреобразователя и реализован он в среде MATLAB под названием CorrSim2014. Проведено моделирование равномерной и питтинговой коррозии для разных форм поперечного сечения чувствительных элементов.*

**Ключевые слова:** термопреобразователь, чувствительный элемент, моделирование коррозии

*The model of thermoconverter sensitive element, which works in an aggressive environment, is built. The algorithm of calculation of thermoconverter sensitive element resistance is developed and realized in the MATLAB environment and named as CorrSim2014. The uniform and pitting corrosion types are modeled for different forms of sensitive elements cross-sections.*

**Keywords:** Thermal sensitive element modeling of corrosion

**Вступ**

Прецизійне вимірювання температури в агресивних середовищах є на сьогоднішній день дуже актуальним, оскільки йде інтенсивний розвиток нових напрямів, зокрема, в хімічній, фармацевтичній, харчовій індустрії... Відомо, що певні стадії технологічних процесів, які мають місце в згаданих вище галузях, для забезпечення відповідних характеристик вихідного продукту, повинні проходити при певній температурі з огляду як на підтримання оптимальних умов протікання хімічних реакцій, так і навіть з огляду на техногенну безпеку. Тому, вимоги до засобів температурного контролю в таких процесах досить жорсткі, оскільки вони, в кінцевому випадку, забезпечують і якість продукту і техногенну безпеку технологічного процесу його виготовлення. Окрім того, є немало технологічних операцій, які повинні протікати неперервно протягом значних періодів часу.

Враховуючи сказане вище та факт, що основними засобами термометрії при реалізації таких процесів переважно є термоперетворювачі опору, а як відомо агресивне середовище негативно впливає на матеріал чутливого елемента (ЧЕ) термоперетворювача, проведено аналітичний огляд сучасних засобів вимірювання температури, який показав, що існуючі засоби не задовольняють комплекс вимог, які повинні забезпечувати прилади для вимірювання температури в агресивних середовищах. Окрім того, слід взяти до уваги ще й цей факт, що при реалізації неперервних технологічних процесів немає змоги будь-коли замінити термоперетворювач. Тому такий засіб вимірювання температури, що працює в агресивному середовищі, можна верифікувати лише при плановій метрологічній перевірці, а в період між плановими метрологічними перевірками маємо ризик втрати його метрологічних характеристик з відповідними наслідками. Провівши аналітичний огляд літературних джерел [1, 2], можна стверджувати, що перспективним вирішенням цієї проблеми є застосування в якості ЧЕ термоперетворювачів металевих аморфних стопів (МАС). Як відомо, МАС мають високу корозійну стійкість і довговічність, що характерно для матеріалів з гомогенною структурою [1]. Хімічна однорідність, відсутність лінійних дефектів типу дислокацій вказують і на імовірність їх підвищеної корозійної стійкості. Металічні аморфні стопи, у складі яких є Cr, випробовувалися в стандартних розчинах і при цьому спостерігались дуже низькі, в порівнянні із звичайними нержавіючими сталями, швидкості корозії. Отже, МАС є перспективними матеріалами для застосування в електротермометрії при виготовленні ЧЕ термоперетворювачів опору, які працюють в агресивних середовищах.

Враховуючи вищесказане, повстало завдання створити модель корозії чутливого елемента, яка дозволить оцінити вплив агресивного середовища на опір ЧЕ при різних типах матеріалу ЧЕ та різних формах та розмірах його поперечного перерізу.

**1. Модель чутливого елемента термоперетворювача**

На рисунку 1 зображено модель чутливого елемента термоперетворювача. Поперечний переріз ЧЕ складається з  $N \times M$  кластерів. В даній моделі ComSim2014 стан провідника описується чотирма матрицями, порядок кожної з яких відповідає кількості кластерів  $N \times M$ :

- 1)  $Mat$  – матриця, що містить відносні поточні площі кластерів. Тобто кожен елемент матриці  $Mat$  містить число в межах від 0 до 1, що характеризує відносну площу даного кластера в даний момент часу відносно його початкової площі  $a \cdot b$ . В перший момент часу всім елементам, що відповідають поперечному перерізу ЧЕ присвоюють значення 1. А елементам, що оточують ЧЕ присвоюється значення 0, що відповідає агресивному середовищу. В процесі моделювання корозій значення елементів матриці  $Mat$  зменшується від 1 до 0. І елементи які досягли значення 0 вважаються повністю зкородованими і їх площа заповнена агресивним середовищем. В результаті зкородований кластер починає впливати на сусідні ненульові елементи.
- 2)  $K$  - матриця швидкостей корозії. Кожен елемент матриці містить інформацію про лінійну швидкість корозії для даного кластера задану в мм/год.
- 3) матриці  $SizeA$ ,  $SizeB$  містять поточні поперечні розміри кожного з кластерів.

Таким чином з допомогою вище описаних чотирьох матриць описується стан поперечного перерізу ЧЕ в будь який момент часу.

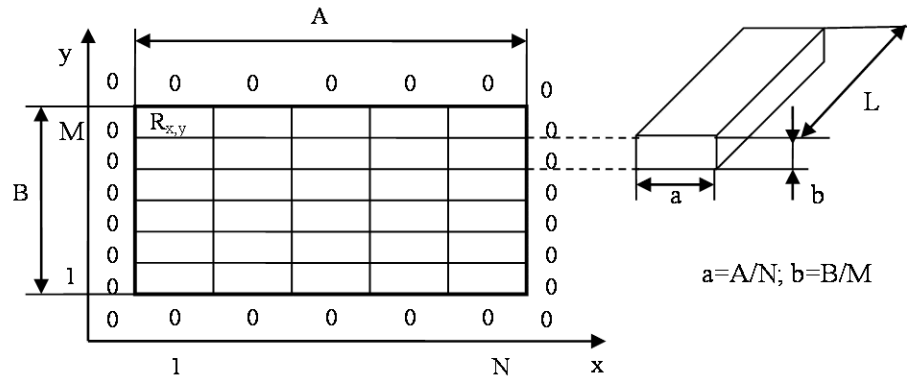


Рис.1. Модель чутливого елемента термоперетворювача.  $A, B$  – лінійні розміри ЧЕ;  $N$  – кількість кластерів вздовж сторони  $A$ ;  $M$  – кількість кластерів вздовж сторони  $B$ ;  $R_{x,y}$  – поточний опір кластера;  $L$  – довжина ЧЕ;  $a, b$  – лінійні розміри кластера.

Дана модель дозволяє окремо для кожного кластера задавати його параметри, що дає ряд наступних переваг:

- Дозволяє моделювати неоднорідну стійкість окремих кластерів до корозії, що дає змогу моделювати корозійні процеси в ЧЕ з різними домішками та неоднорідностями.
- Дає змогу моделювати антикорозійні покриття ЧЕ задавши знижені значення швидкості корозії для кластерів по периметру провідника.
- Дає можливість задавати різні форми поперечного перерізу ЧЕ термоперетворювача, наприклад круга чи прямокутна.

## 2. Алгоритм розрахунку опору чутливого елемента термоперетворювача

Суть алгоритму полягає в наступному. Для кожного ненульового елемента матриці  $Mat$  здійснюється перевірки чотирьох сусідніх (зверху, знизу, зліва, справа) кластерів на наявність нульового значення в цих елементах. Як зазначалось вище елементи з нульовим значенням вважаються агресивним середовищем і діють на сусідні ненульові елементи (кластери). Наприклад, якщо поруч з ненульовим елементом  $C1$  матриці  $Mat$  знаходиться нульовий елемент  $C2$ , розташований біля грані  $b$  (ширини кластера), то площа ненульового елемента  $C1$  зменшується на величину швидкості корозії помноженій на ширину кластера, якою він межує з елементом  $C2$  (агресивним середовищем). А поточна довжина кластера  $C1$  при цьому зменшиться на величину швидкості корозії і буде збережена у відповідному елементі матриці  $SizeA$ . Таким чином поточна площа кожного з кластерів в даний момент часу обчислюється як добуток відповідних елементів матриць  $SizeA$  та  $SizeB$ , що містять відповідні розміри кластера  $a$  та  $b$ .

Опір кластера  $R_{x,y}$  в кожен момент часу:

$$R_{x,y} = \rho * L / (a * b * Mat(x,y)), \quad (1)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу ЧЕ термоперетворювача;  $a * b$  – площа поперечного перерізу кластера в початковий момент часу.

$Mat(x,y)$  – відносна площа кластера в даний момент часу.

Опір ЧЕ термоперетворювача в кожен момент часу визначається за наступною формулою:

$$R = \sum_N \sum_M R_{x,y} \quad (2)$$

Врахувавши (1) отримуємо:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{a \cdot b \cdot \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \text{Mat}(x, y)} \quad (3)$$

Блок-схема алгоритму показана на рис.2

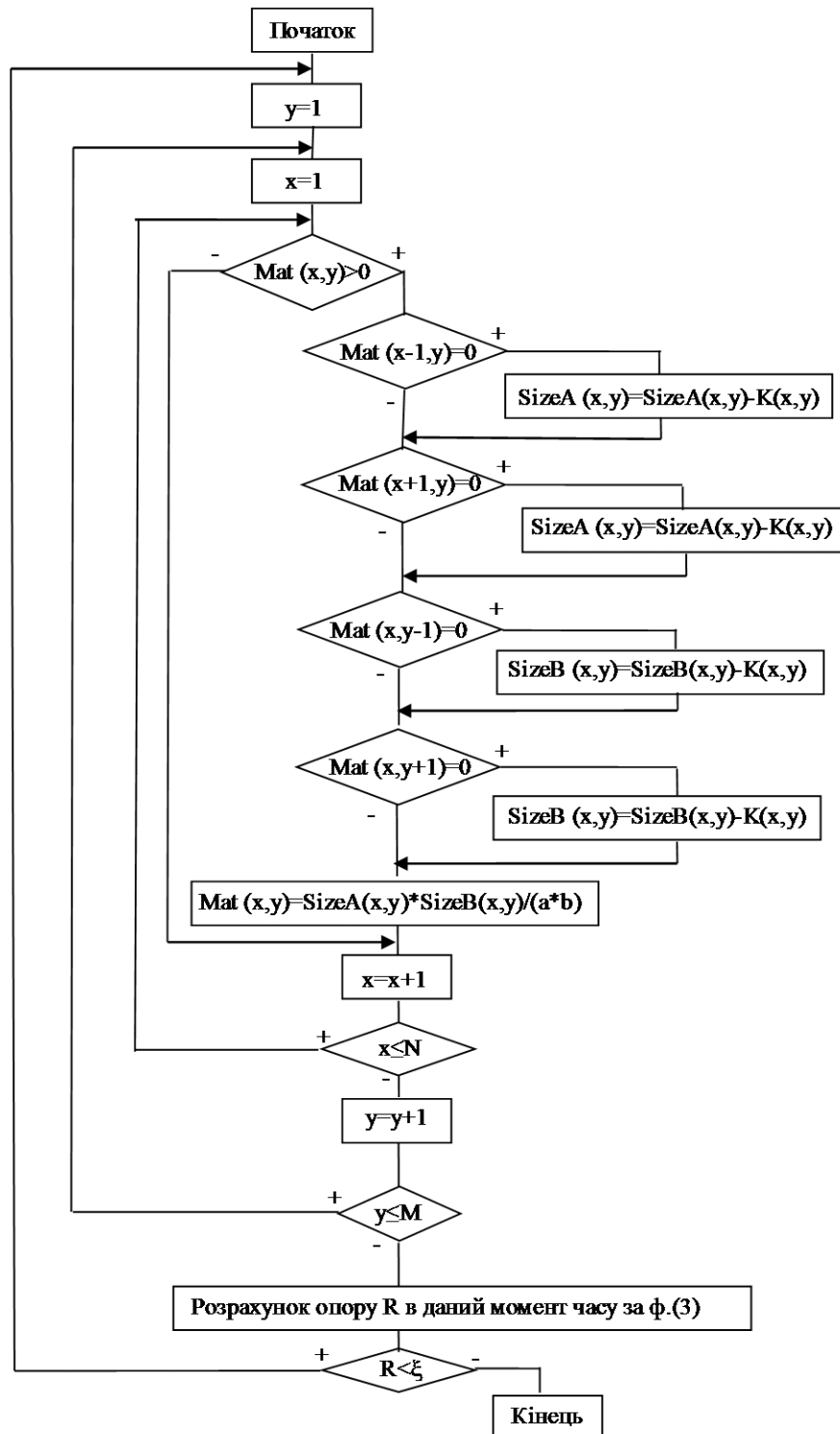


Рис. 2. Алгоритм розрахунку опору ЧЕ.  $\xi$  – межа, до якої обчислюється опір

### 3. Дослідження моделей корозії чутливого елемента термоперетворювача

З допомогою програми CorrSim2014 проведено дослідження двох основних типів корозії ЧЕ термоперетворювача – пітингової та рівномірної. Програма CorrSim2014 дозволяє візуалізувати у вигляді теплокарти динамічну зміну поперечного перерізу ЧЕ в процесі корозії. Теплокарти, які являють собою графічне представлення даних, при якому окремі значення що містяться в матриці представлено у вигляді кольорів. Крім того, CorrSim2014 дозволяє візуалізувати зміну опору ЧЕ в часі під дією корозії. На рис. 3, 4 зображено процес корозії прямокутного та круглого ЧЕ

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

термоперетворювача у випадку рівномірної та пітингової корозії відповідно. Параметри моделювання:  
 $L = 0.08 \text{ м}$ ;  $\rho = 150 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

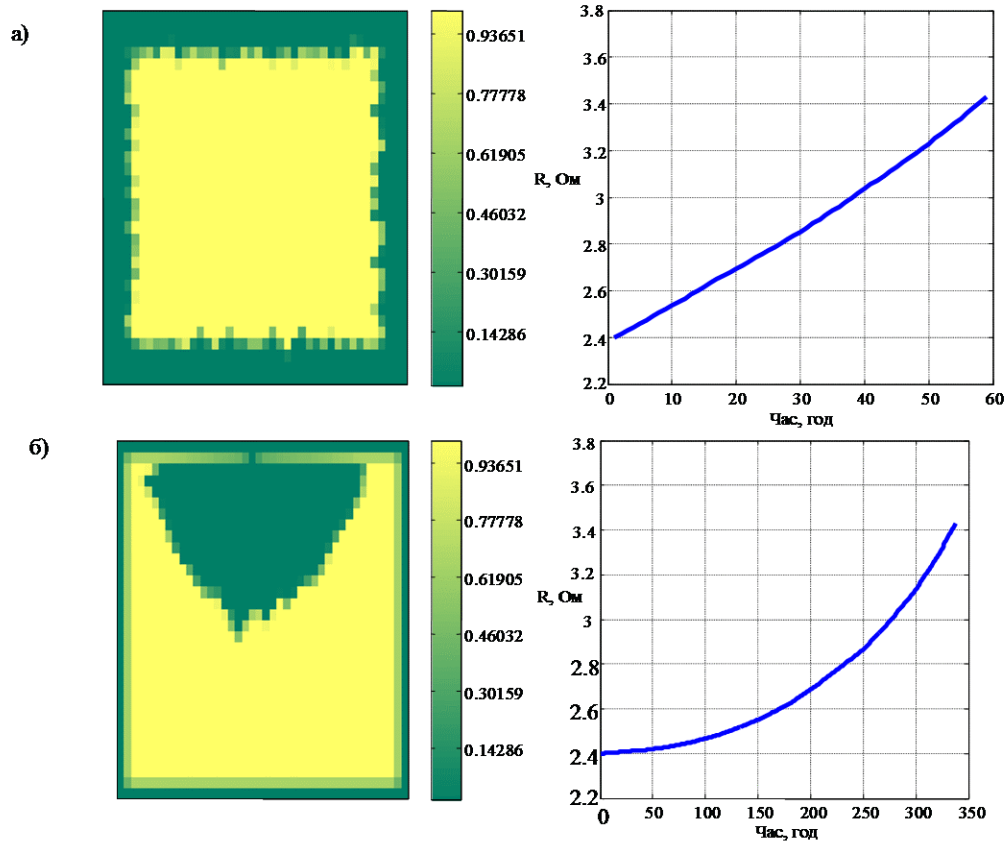


Рис.3. Моделювання корозії чутливого елемента термоперетворювача з прямокутною формою поперечного перерізу: а) рівномірна корозія; б) пітингова корозія. Параметри моделювання:  $A = 0.25 \text{ мм}$ ;  $B = 0.2 \text{ мм}$ ;  $N = 40$ ;  $M = 30$ ; швидкість корозії  $v = 33 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год}$ .

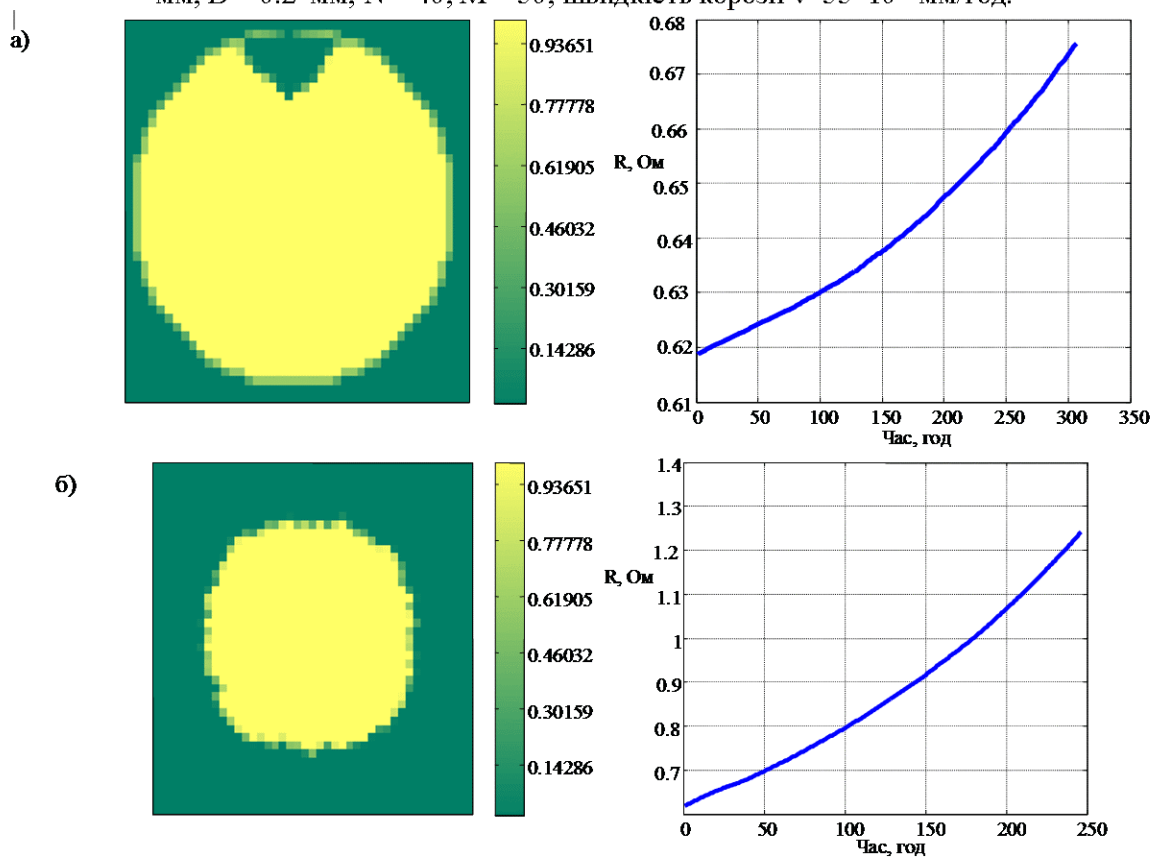


Рис.4. Моделювання корозії чутливого елемента термоперетворювача з круглою формою поперечного перерізу: а) рівномірна корозія; б) пітингова корозія. Параметри моделювання:  $A = 0.5 \text{ мм}$ ;  $B = 0.2 \text{ мм}$ ;  $N = 41$ ;  $M = N$ ; швидкість корозії  $v = 32 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год}$ .

Спрощення, прийняті в моделі:

1. Швидкість і тип корозії прийняті рівномірними в межах кластера;
2. При «з'їданні» кластера агресивним середовищем, останнє повністю заповнює його об'єм і продовжує впливати на наступні кластери;
3. Аналізується лише один поперечний переріз ЧЕ, а стан будь яких інших поперечних перерізів цього ЧЕ вважається, що змінюється так само. Наприклад, якщо повністю кородував один із кластерів, то вважається, що кородували всі кластери вздовж провідника навпроти даного кластера.

Правильність результатів, отриманих за допомогою програми CorrSim2014 підтверджується результатами, отриманими за моделлю, яка була розроблена в [3].

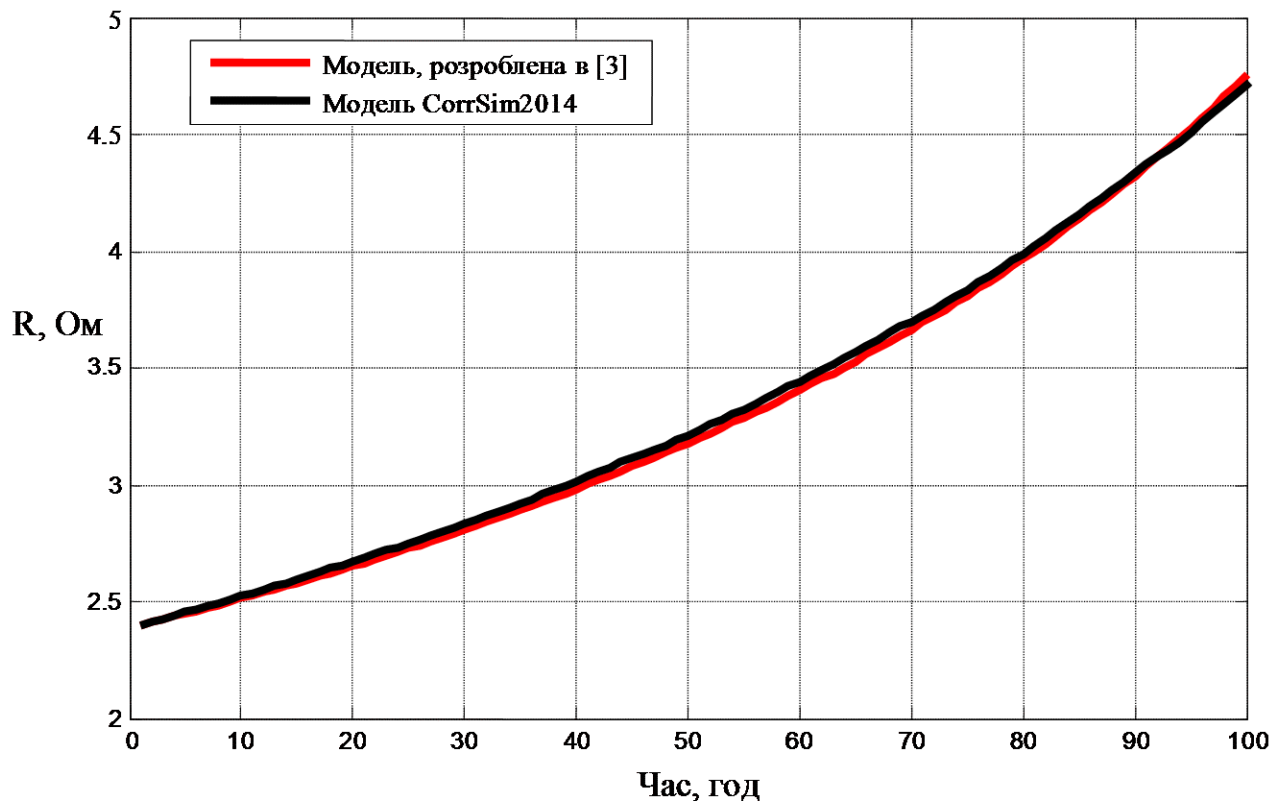


Рис. 5. Зміна значення опору ЧЕ від впливу дії корозії.  $A = 0.5\text{мм}$ ;  $B = 0.1\text{мм}$ ;  $N = 30$ ;  $M = 20$ ;  $v = 22,7 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год}$ .

### Висновки

Модель CorrSim2014 дозволяє індивідуально для кожного кластера задавати швидкість корозії. Це дає змогу моделювати антикорозійні покриття чутливого елемента термоперетворювача. Крім того є можливість моделювати різні типи корозії, наприклад пітингову. Модель дозволяє моделювати корозійні процеси в неоднорідному провіднику, наприклад, коли провідник містить домішки металів чи металевих стопів, що мають різну корозійну стійкість. Модель дозволяє візуалізувати у вигляді теплокарти динамічну зміну поперечного перерізу ЧЕ в процесі корозії та будувати часові залежності зміни опору та провідності ЧЕ під дією корозії.

Перспективою розвитку даної моделі може бути задання функції зміни швидкості корозії в часі, що дало б змогу моделювати корозійні процеси при зміні впливу агресивного середовища, наприклад, при тимчасовому припиненні використання ЧЕ в агресивному середовищі чи змінах температури оточуючого середовища.

### Інформаційні джерела

1. Металлические стекла / Под. ред. Гилмана Дж. Дж. и Лими Х. Дж., США, 1978: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. - 264 с.
2. Судзуки К. Аморфные металлы. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К.; под. ред. Масумото Ц. Пер. с япон. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
3. Emilia Mankowska. Analiza zmian rezystancji elementów czułych termoprzetworników i metod określenia rodzaju ich korozji w środowiskach agresywnych / Emilia Mankowska, Bohdan Stadnyk, Ihor Mykytyn, Pylyp Skoropad // Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej: XIX Międzynarodowe Seminarium Metrologów MSM'2014, Gdańsk – Stockholm, Nr 38.- С. 41-43.