

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 681.5.015

Братусь О. В.

Здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

#### СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З АДАПТИВНИМИ БЛОКАМИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІОФЛЮКСІВ

**Актуальність.** Створення нових методів для відновлення та прогнозування сонячних даних, нових систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см є актуальними задачами, тому що це дасть можливість виконувати правильно та автоматизовано попередню обробку даних та подальше прогнозування.

**Мета.** Розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень та прогнозування часових рядів; створити інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів; створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см з використанням розроблених методів; застосувати розроблені методи для реальних даних та порівняти з традиційними методами.

**Метод.** Для досягнення поставленої мети використано такі методи: розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування; метод експоненційного згладжування; метод 13-місячного ковзного середнього; експоненційний підхід, запропонований Хетеуеєм, Уілсоном та Рейхманом.

**Результати.** Розроблено метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів та для прогнозування часових рядів. Створено інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості. Розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних даних. Виконано практичне застосування розроблених методів для реальних даних та порівняння з традиційними методами.

**Висновки.** Розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з усіма традиційними методами при відновленні пропущених значень, істинних закономірностей та прогнозуванні сонячних радіофлюксів.

**Ключові слова:** метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей часових рядів, система підтримки прийняття рішень, інтегральний критерій адекватності моделі, критерій близькості, сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см.

#### НОМЕНКЛАТУРА

БД – база даних;  
ЕЗ – експоненційне згладжування;  
ЕП – експоненційний підхід;  
індекс F10.7 – місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см;  
КДЕЗ – ковзне двобічне експоненційне згладжування;  
СКБД – система керування базою даних;  
ТКС – 13-місячне ковзне середнє;  
 $a$  – амплітуда циклу;  
 $b$  – час у місяцях від мінімуму до максимуму;  
 $c$  – асиметрія циклу;  
DW – статистика Дарбіна-Уотсона;  
 $e(k)$  – похибка моделі у  $k$ -й момент часу;

$e(k-1)$  – похибка моделі у  $(k-1)$ -й момент часу;  
 $f(i)$  – функція, що описує фази росту і падіння сонячних даних в  $i$ -й момент часу, що вимірюється у місяцях,  $i_0$  – початковий момент часу;  
MAPE – середня відсоткова абсолютна похибка;  
 $N$  – кількість значень у вибірці даних;  
 $n$  – номер циклу;  
 $R^2$  – коефіцієнт детермінації;  
RMSE – середньоквадратична похибка;  
 $S_k$  – значення експоненційного середнього в  $k$ -й момент часу;  
 $S_{k-1}$  – значення експоненційного середнього в

$(k-1)$ -й момент часу;

$S_k^*$  – значення експоненційного середнього у зворотному часі в  $k$ -й момент часу;

$S_{k+1}^*$  – значення експоненційного середнього у зворотному часі в  $(k+1)$ -й момент часу;

SFU – одиниця виміру сонячних радіофлюксів (Solar Flux Unit);

SSE – сума квадратів похибок моделі;

$U$  – коефіцієнт Тейла;

$Var[y(k)]$  – фактична дисперсія основної змінної  $y(k)$ , обчислена на основі вибірки даних;

$\hat{Var}[y(k)]$  – дисперсія основної змінної  $\hat{y}(k)$ , оціненої за моделлю;

$y(k)$  – значення ряду в  $k$ -й момент часу;

$\hat{y}(k)$  – оцінка значення ряду, що отримана за певною математичною моделлю;

$\alpha$  – коефіцієнт згладжування;

$\rho$  – коефіцієнт автокореляції для  $e(k)$  та  $e(k-1)$ , тобто при зміщенні  $S=1$ .

## ВСТУП

Існує особливий клас задач, які неможливо розв'язати за допомогою алгоритмів оптимальної фільтрації. До них відносяться, наприклад, задачі обробки даних про сонячну активність, задачі океанографічних досліджень. Ці задачі мають певні особливості, які дозволяють розглядати їх як задачі з уточнення минулих по відношенню до теперішнього часу параметрів. Такі задачі можуть вирішуватися методом згладжування. Актуальною задачею є відновлення істинних прихованих закономірностей динамічних процесів при обробці експериментальних даних, що описують сонячну активність, таких, як числа Вольфа та сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см. Складною задачею є побудова моделі за даними, що описують сонячну активність, оскільки фізичні процеси, що відбуваються на Сонці, є недостатньо вивченими та об'єм даних є обмеженим.

Дослідження стосовно створення нових методів для відновлення істинних закономірностей, відновлення пропущених значень та прогнозування даних про сонячну активність є актуальними задачами на сьогоднішній день, тому що це дасть можливість виконувати правильно попередню обробку даних та більш точно виконувати подальше прогнозування. Створення ефективних систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних також є актуальним, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Створення системи підтримки прийняття рішень для відновлення істинних закономірностей, пропущених значень та прогнозування сонячних радіофлюксів з використанням нових ефективних методів є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Мета роботи:

1) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів;

2) запропонувати інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів;

3) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів;

4) створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см, що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Застосувати усі розроблені методи у системі підтримки прийняття рішень;

5) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом експоненційного згладжування;

6) застосувати розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення істинних закономірностей сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом 13-місячного ковзного середнього;

7) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з експоненційним підходом, запропонованим Хетеуєм, Уілсоном та Рейхманом.

Таким чином, реалізація наведених вище завдань дасть можливість виконувати ефективний аналіз та прогнозування сонячних радіофлюксів.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження можливостей відновлення істинних закономірностей та прогнозування сонячних даних займали різні групи науковців. У розглянутих роботах також можна прослідкувати розвиток наукової думки стосовно цього питання.

Хетеуей та інші у роботі [1] пропонують рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу. У більш пізній статті цих авторів [2] запропоновано метод розрахунку 13-місячного ковзного середнього для обробки даних про сонячну активність. На даний момент цей метод є широко розповсюдженим. Сальвадор у роботі [3] пропонує математичну модель для циклу чисел Вольфа з використанням припливно-обертальної теорії Ієна Вілсона. У статті [4] виконується дослідження похибок методу 13-місячного ковзного середнього та визначено умови, за яких застосування цього методу при аналізі сонячної активності викривляє значні особливості цього процесу.

Проблемою прогнозування сонячних даних також займалось багато науковців. Хетеуей та інші у роботі [1] показують, що запропоноване рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу може бути застосованим для прогнозування. У роботі [2] зроблено докладний огляд багатьох існуючих методів прогнозування

сонячних даних, зокрема, всі методи прогнозування поділено на регресійні та методи, що базуються на аналізі попередніх даних. Ноблем та Вітландом у статті [5] запропоновано байєсівський підхід для прогнозування сонячних циклів з використанням рівняння Фокера-Планка. У роботі [3] показано, що запропоновану модель можна використати не тільки для опису закономірностей, але й для прогнозування чисел Вольфа.

У наведених роботах розглянуто багато методів для відновлення закономірностей та прогнозування сонячних даних. Проте також у цих роботах наведено певні критичні дослідження, що показують недоліки вже розроблених методів за певних умов. Тому задача розробки нових методів для відновлення закономірностей, пропущених даних та прогнозування сонячних даних є актуальною на сьогоднішній день. Також задача створення систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних є актуальною, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі [6] запропоновано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, що полягає у побудові цього методу на інтервалі 13, щоб працювати з даними у такому ж діапазоні, як і для 13-місячного ковзного середнього. Цей метод є розвитком та вдосконаленням квазіоптимальної процедури згладжування, наведеної у роботі [7].

Перша частина процедури ковзного двобічного тринадцятимісячного експоненційного згладжування полягає в отриманні оцінок за допомогою традиційного методу експоненційного згладжування [6]. При цьому початкове наближення обирається рівним першому значенню ряду з відповідного інтервалу на кожному ковзному тринадцятимісячному інтервалі. Ця процедура описується наступною формулою:

$$S_k = \alpha \cdot y(k) + (1 - \alpha) \cdot S_{k-1}, \quad (1)$$

де періоди часу  $k = 1, \dots, 13, k = 2, \dots, 14, \dots, k = N - 12, \dots, N$  [6].

Для визначення оптимального значення параметра згладжування розглянемо такі статистичні характеристики, що використовуються для оцінювання якості побудованої моделі у цілому:  $R^2$ ,  $SSE$ ,  $DW$ .

Характеристика  $R^2$  обчислюється за такою формулою [8]:

$$R^2 = \frac{\hat{\text{Var}}\{y(k)\}}{\text{Var}\{y(k)\}}. \quad (2)$$

Характеристика  $DW$  обчислюється таким чином [8]:

$$DW = 2 - 2 \cdot \rho. \quad (3)$$

У формулі (3) значення  $\rho$  для  $e(k)$  і  $e(k-1)$  обчислюється таким чином [8]:

$$\rho = \frac{\sum_{k=2}^N e(k) \cdot e(k-1)}{\sum_{k=1}^N [e(k)]^2}.$$

Характеристика  $SSE$  обчислюється за такою формулою [8]:

$$SSE = \sum_{k=1}^N [\hat{y}(k) - y(k)]^2. \quad (4)$$

У цій роботі запропоновано такий інтегральний критерій адекватності моделі:

$$I = |1 - R^2| + |2 - DW|. \quad (5)$$

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень  $SSE$  та інтегрального критерію  $I$ , що обчислюються, відповідно, за формулами (4) та (5).

Друга частина процедури ковзного двобічного експоненційного згладжування полягає у застосуванні до отриманих оцінок процедури згладжування у зворотному часі на кожному інтервалі  $k = N - 1, \dots, N - 12, k = N - 2, \dots, N - 13, \dots, k = 12, \dots, 1$  [6].

Кожне уточнене значення  $S_k^*$  розраховується так [6]:

$$S_k^* = \alpha \cdot S_k + (1 - \alpha) \cdot S_{k+1}^*, \quad (6)$$

де значення  $k = N - 1, \dots, N - 12, \dots, k = 12, \dots, 1$ , початкові

значення  $S_N^* = S_N, \dots, S_{13}^* = S_{13}$ .

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень  $SSE$  та інтегрального критерію  $I$ , що обчислюються за формулами (4) та (5), відповідно, але при цьому в якості вхідних значень при обчисленні цих характеристик використовуються значення  $S_k$ . При обчисленні уточненої оцінки  $S_k^*$  ваги оцінок  $S_k$  надходять на вхід алгоритму у зворотному часі.

Після цього в якості оцінки значення вибірки даних використовується отримане значення у середній точці з кожного інтервалу, тобто на інтервалі  $k = 1, \dots, 13$  взято

значення  $S_7^*$ , на інтервалі  $k = 2, \dots, 14$  взято значення  $S_8^*$  і

т. д. Оцінки для перших шести та останніх шести значень вибірки даних взято як відповідні значення експоненційного середнього у зворотному часі на першому та останньому інтервалах оцінювання відповідно, тобто  $S_1^*, \dots, S_6^*$  на інтервалі  $k = 1, \dots, 13$  та  $S_{N-5}^*, \dots, S_N^*$  на інтервалі  $k = N - 12, \dots, N$ .

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування запропоновано застосовувати для прогнозування значень часових рядів таким чином: необхідно використовувати повну описану процедуру і розрахунки проводяться за формулами (1) та (6), при цьому значення параметра згладжування використовується таке ж, як і для всіх відомих значень, в якості початкового значення використовується останнє відоме значення.

Відновлення пропущених значень часових рядів з отриманням максимально точних значень замість пропущених є важливим для виконання подальшої обробки ряду, наприклад, для прогнозування. У статті з викорис-

танням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень ряду.

#### Алгоритм №1

Якщо перед пропуском знаходиться від 1 до 7 значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться після пропущеного значення. Розглядається в якості граничного кількісного значення 7, тому що при застосуванні методу ковзного двобічного середнього на першому інтервалі обирається сьома оцінка. Після цього зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

#### Алгоритм №2

Якщо перед пропуском знаходиться більше семи значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться перед пропущеним значенням. Потім зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень, та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

Таким чином, метод ковзного двобічного експоненційного згладжування може бути ефективно застосованим для відновлення пропущених значень часових рядів.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9], що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Її архітектуру наведено на рис. 1.

Блок попереднього аналізу даних містить можливість завантаження даних з бази даних, з текстового файлу та безпосереднього введення даних. Також цей блок містить можливість запису отриманих результатів до бази даних та текстового файлу. У блоці попереднього аналізу даних реалізовані процедури відновлення пропущених даних за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5).

Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються такі статистичні характеристики:  $R^2$ ,  $SSE$ ,  $DW$  за формулами (2), (3), (4) відповідно.

Метод 13-місячного ковзного середнього традиційно використовується для аналізу варіацій сонячної активності [2]. Проте цей метод може викривляти величини тривалості сонячного циклу, максимуму та мінімуму, що показано у роботі [2], оскільки він не відфільтровує високочастотні коливання з періодом менше одного року. За цим методом 13-місячне ковзне середнє з центром у  $k$ -ому місяці розраховується таким чином [2]:

$$\hat{y}(k) = \frac{1}{24} \sum_{i=-6}^5 y(k+i) + \frac{1}{24} \sum_{i=-5}^6 y(k+i). \quad (7)$$

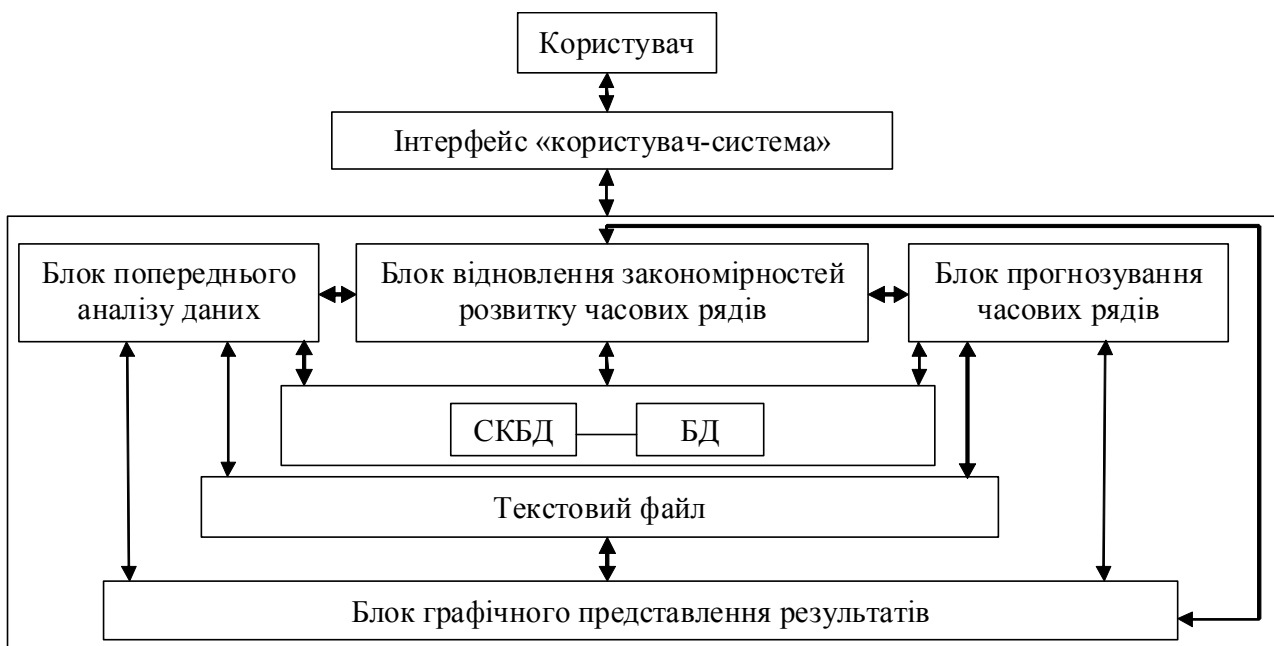


Рисунок 1 – Архітектура системи підтримки прийняття рішень

Блок відновлення закономірностей розвитку часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4)–(6) та моделі 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для перевірки ефективності побудованих моделей використовується критерій близькості. Критерій близькості полягає у мінімізації значення  $SSE$ , що обчислюється за формулою (4). У системі реалізовано процедуру вибору кращого методу відновлення закономірностей за значеннями цього критерію, результати можна записати до бази даних та до текстового файлу.

Блок прогнозування часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) з використанням останнього відомого значення ряду в якості початкового значення для прогнозування. Також цей блок містить можливість побудови моделі, запропонованої у роботі [1]:

$$f(i) = \frac{a \cdot (i - i_0)^3}{\exp((i - i_0)^2 / b^2) - c}, \quad (8)$$

$$b(a) = 27,12 + 25,15 / (a \cdot 10^3)^{1/4}, \quad (9)$$

$$a(n) = 9,2 \times 10^{-4} + 8,0 \times 10^{-5} n. \quad (10)$$

Обчислюються значення прогнозних характеристик для побудованих моделей:  $RMSE$ ,  $MAPE$  та  $U$ . Характеристика  $RMSE$  обчислюється так [10]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}. \quad (11)$$

Значення  $MAPE$  розраховується наступним чином [10]:

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|y(i) - \hat{y}(i)|}{|y(i)|} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Значення  $U$  обчислюється за наступною формулою [10]:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i)]^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [\hat{y}(i)]^2}}. \quad (13)$$

Отримані результати прогнозування можуть бути записані до БД або до текстового файлу.

Блок графічного представлення результатів містить форми для побудови графіків оцінок значень ряду, отриманих за моделями, та вхідних даних, які були завантажені з певного джерела або введені ручним способом. Цей блок дає можливість наочного представлення отриманих результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до березня 2016 року (39 значень) за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9] виконується дослідження стосовно штучного створення пропусків та відновлення пропущених значень.

Відновлення пропущених значень індексу F10.7 виконується за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5). Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються статистичні характеристики за формулами (2), (3), (4).

##### Випадок № 1

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами  $N = 7, 8, 9$  та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

##### Випадок № 2

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами  $N = 30, 31, 32$  та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

На основі цієї ж вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см відновлюються істинні значення ряду. До цих даних застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та метод 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для порівняння отриманих результатів використано критерій близькості, що полягає у пошуку мінімуму для виразу (4).

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до грудня 2015 року (36 значень) [9] виконується прогнозування значень на наступні 3 місяці. Прогнозування виконується за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та методу, що описується формулами (8)–(10).

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

У табл. 1 наведено статистичні характеристики, що показують якість побудованих моделей у цілому для випадку №1 при відновленні значень індексу F10.7, розраховані за формулами (2), (3), (4) на проміжку  $N = 1, \dots, 39$  для моделей ЕЗ, КДЕЗ. У табл. 2 наведено статистичні характеристики моделей ЕЗ, КДЕЗ для випадку №2 при відновленні значень індексу F10.7.

На рис. 2 показано виміряні значення індексу F10.7 та результати, отримані за кожною з моделей при відновленні істинних значень ряду.

У табл. 3 наведено значення критерію близькості, що розраховується за формулою (4), для КДЕЗ, ТКС. У табл. 4 наведено прогнозні характеристики, розраховані за формулами (11), (12), (13) відповідно на проміжку  $N = 37, \dots, 39$  для КДЕЗ та для ЕП, що описується формулами (8)–(10).

Таблиця 1 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
$R^2$	0,9477	0,9565
$SSE$	103,3539	100,1215
$DW$	1,3125	1,3372

Таблиця 2 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
$R^2$	0,9451	0,9975
$SSE$	274,1465	95,3291
$DW$	1,2370	1,9452

Таблиця 3 – Значення критеріїв близькості для моделей

Назва критерію	КДЕЗ	ТКС
$SSE$	2441,2	6115,3

Таблиця 4 – Значення прогнозних характеристик для моделей

Прогнозна характеристика	ЕП	КДЕЗ
$RMSE$	20,1355	18,1569
$MAPE$	8,8084	7,6241
$U$	0,0065	0,0051

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

У статті виконано відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей та прогнозування часових рядів. На кожному етапі відбувається порівняння з вже відомими методами, що застосовуються для сонячних даних.

За значеннями статистичних характеристик, наведених у табл. 1 та табл. 2, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з методом експоненційного згладжування при відновленні пропущених значень індексу F10.7. Тому можна стверджувати, що запропонований метод є ефективним для відновлення пропущених значень часових рядів за різних початкових умов.

Дж. М. Херст у роботі [11] розглянув вплив ширини вікна на зміну характеристик точності ковзного середнього і показав, що ковзне середнє може значно викривити процес, знизити короткочасні коливання, у той час, як коливання, період яких значно перевищує ширину вікна, відновлюються майже без викривлень. На рис. 2 показано, що на часовому інтервалі [10, 25] для моделі, побудованої за методом 13-місячного ковзного середнього, відбувається суттєве викривлення процесу: на часових інтервалах [10, 15] та [20, 25] коливання обнуляються, на інтервалі [15, 20] відбувається обергання коливань індексу F10.7. У той же час, ковзне двобічне експоненційне

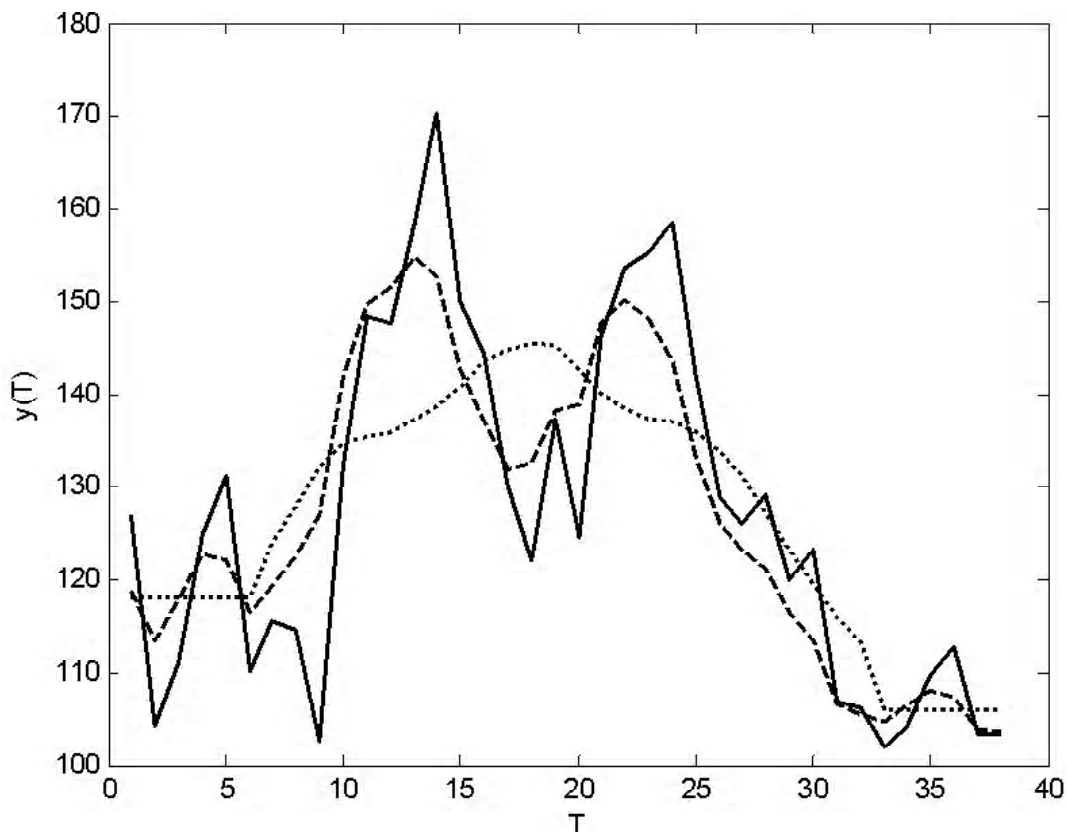


Рисунок 2 – Значення  $y(i)$  та  $\hat{y}(i)$  для вибірки значень індексу F10.7: — виміряні значення  $y(i)$ ; --- оцінки  $\hat{y}(i)$ , отримані за методом ковзного двобічного експоненційного згладжування; ... — оцінки  $\hat{y}(i)$ , отримані за методом 13-місячного ковзного середнього

згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей індексу F10.7.

Застосовуючи критерій близькості до значень, наведених у табл. 3, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього при відновленні істинних закономірностей індексу F10.7.

За значеннями прогнозних характеристик у табл. 4 можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно із традиційним експоненційним підходом при прогнозуванні.

## ВИСНОВКИ

У статті з використанням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень часового ряду за різних початкових умов. Ці алгоритми застосовано для відновлення значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом експоненційного згладжування. Отримані результати показують перевагу розробленого методу над методом експоненційного згладжування.

Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання адекватності побудованих моделей при відновленні істинних закономірностей часових рядів. Створено критерій близькості для оцінювання ефективності відновлення істинних закономірностей часових рядів. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для відновлення істинних закономірностей значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом 13-місячного ковзного середнього. Показано, що ковзне двобічне експоненційне згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей часового ряду. Застосовуючи критерій близькості до отриманих значень можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього.

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для прогнозування значень індексу F10.7 та виконано порівняння з традиційним експоненційним підходом. За значеннями прогнозних характеристик метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу при прогнозуванні.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. У цій системі підтримки прийняття рішень застосовано розроблені алгоритми відновлення пропущених значень часових рядів за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування, є можливість відновлення істинних закономірностей часових рядів за допомогою цього методу та застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів.

Таким чином, у роботі розроблено новий метод для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. Запропоновано систему підтримки прийняття рішень, в якій реалізовано створені методи

та яка дає можливість виконувати автоматизований аналіз і прогнозування сонячних даних.

Перспективами подальших досліджень є створення нових вдосконалених методів для аналізу та прогнозування сонячних даних, створення сучасних ефективних систем підтримки прийняття рішень для забезпечення ще більш швидкої та точної обробки часових рядів.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано у межах зареєстрованої наукової тематики кафедри Математичних методів системного аналізу Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема «Розробка методології системного аналізу, моделювання та оцінювання фінансових ризиків» (номер держреєстрації 0115U000356).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hathaway D. H. The shape of the sunspot cycle / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Solar Physics*. – 1994. – Vol. 151, No. 1. – P. 177-190. DOI: 10.1007/BF00654090.
- Hathaway D. H. A synthesis of solar cycle prediction techniques / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104, No. A10. – P. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
- Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr / R. J. Salvador // *Pattern recognition in physics*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 117–122. DOI:10.5194/prp-1-117-2013.
- Киян М. А. Применения алгоритмов сглаживания для предварительной обработки статистических солнечных данных / М. А. Киян, Е. В. Фабричева, В. Н. Подладчиков // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2014. – № 2. – С. 68–76.
- Noble P. L. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation / P. L. Noble, M. S. Wheatland // *Solar Physics*. – 2012. – Vol. 276, No. 1. – P. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
- Братусь О. В. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення закономірностей динамічних процесів / О. В. Братусь, В. М. Подладчиков, Т. В. Подладчикова // *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016: Одинадцята міжнародна науково-практична конференція, Жукин, 27 червня–1 липня 2016 р.: тези доповідей*. – Чернівці: ЧНТУ, 2016. – С. 28-31.
- Pankratova N. D. Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes / N. D. Pankratova, T. V. Podladchikova, D. G. Strelkov // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2009. – Vol. 45, No. 6. – P. 916-923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
- Tsay R. S. *Analysis of Financial Time Series* / R. S. Tsay. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 715 p.
- Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource] – Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
- Бідюк П. І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевнюк. – Київ : ННК «ПСА» НТУУ «КПІ», 2010. – 340 с.
- Hurst J. M. *The Profit Magic of Stock Transaction Timing* / J. M. Hurst. – Englewood Cliffs : Prentice-Hall, Inc., 1970 – 224 p.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2016.

Після доробки 10.02.2017.

Братусь Е. В.

Соискатель научной степени кандидата технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

### СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С АДАПТИВНЫМИ БЛОКАМИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ РАДИОФЛЮКСОВ

**Актуальность.** Создание новых методов для восстановления и прогнозирования солнечных данных, новых систем поддержки принятия решений для обработки солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см являются актуальными задачами, потому что это даст возможность выполнять правильно и автоматизировано предварительную обработку данных и дальнейшее прогнозирование.

**Цель.** Разработать метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений и прогнозирования временных рядов; создать интегральный критерий адекватности модели и критерий близости для применения при восстановлении истинных закономерностей развития временных рядов; создать систему поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см с использованием разработанных методов; применить разработанные методы для реальных данных и сравнить с традиционными методами.

**Метод.** Для достижения поставленной цели использованы такие методы: разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания; метод экспоненциального сглаживания; метод 13-месячного скользящего среднего; экспоненциальный подход, предложенный Хетеузем, Уилсоном и Рейхманом.

**Результаты.** Разработан метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений временных рядов и для прогнозирования временных рядов. Созданы интегральный критерий адекватности модели и критерий близости. Разработана система поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных данных. Выполнено практическое применение разработанных методов для реальных данных и сравнение с традиционными методами.

**Выводы.** Разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания показывает преимущество в сравнении со всеми традиционными методами при восстановлении пропущенных значений, истинных закономерностей и прогнозировании солнечных радиофлюксов.

**Ключевые слова:** метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания, восстановление пропущенных значений временных рядов, восстановление истинных закономерностей временных рядов, система поддержки принятия решений, интегральный критерий адекватности модели, критерий близости, солнечные радиофлюксы при длине волны 10,7 см.

Bratus O. V.

Applicant for PhD degree of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

### DECISION MAKING SUPPORT SYSTEM WITH ADAPTIVE UNITS OF RESTORING AND FORECASTING OF SOLAR RADIO FLUXES

**Context.** Creation of new methods for solar data restoring and forecasting, new decision making support systems for processing of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm are topical problems, because it will give an opportunity to perform preliminary data processing and further forecasting correctly and automated.

**Objective.** To develop moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values and forecasting of time series; to create integral criterion of model adequacy and the proximity criterion for using for restoring of the true regularities of time series evolution; to develop decision making support system for analysis and forecasting of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm with using of developed methods; to apply developed methods for real data and to compare with traditional methods.

**Method.** For achieving of formulated goal the following methods were used: developed moving two-sided exponential smoothing method; exponential smoothing method; 13-month running mean method; exponential approach, which was suggested by Hathaway, Wilson and Reichmann.

**Results.** Moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values of time series and for forecasting of time series was developed. The integral criterion of model adequacy and the proximity criterion were created. Decision making support system for analysis and forecasting of solar data was developed. Practical application of developed methods for real data and comparison with traditional methods were performed.

**Conclusions.** Developed moving two-sided exponential smoothing method is shown superiority in comparison with all traditional methods in the restoring of missed values, true regularities and forecasting of solar radio fluxes.

**Keywords:** moving two-sided exponential smoothing method, restoring of missed time series values, restoring of the true regularities of time series, decision making support system, integral criterion of model adequacy, proximity criterion, solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm.

### REFERENCES

1. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. The shape of the sunspot cycle, *Solar Physics*, 1994, Vol. 151, No. 1, pp. 177–190. DOI: 10.1007/BF00654090.
2. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. A synthesis of solar cycle prediction techniques, *Journal of Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. A10, pp. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
3. Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr, *Pattern recognition in physics*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 117–122. DOI: 10.5194/prp-1-117-2013.
4. Kiyani M. A., Fabriceva O. V., Podladchikov V. M. Primeneniya algoritmov sglazhivaniya dlja predvaritel'noj obrabotki statisticheskikh solnechnykh dannyh, *Systemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii*, No. 2, Kyiv, 2014, pp. 68–76 [in Russian].
5. Noble P. L., Wheatland M. S. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation, *Solar Physics*, 2012, Vol. 276, No. 1, pp. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
6. Bratus O. V., Podladchikov V. M., Podladchikova T. V. Metod kovznogo dvobichnogo eksponencijnogo zgladzhuvannja dlja vidnovlennja zonomirnostej dynamichnyh procesiv, *Matematychna ta imitacijne modeljuvannja system. MODS 2016: Odynadcjata mizhnarodna naukovopraktychna konferencija: tezy dopovidej*. Chernihiv, Ukraine: CNUT, 2016, pp. 28–31 [in Ukrainian].
7. Pankratova N. D., Podladchikova T. V., Strelkov D. G., Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 916–923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
8. Tsay R. S. Analysis of Financial Time Series. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010, 715 p.
9. Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource]. Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
10. Biduyk P. I., Korshevnyuk L. O. Proektuvannja komp'juternyh informacijnyh system pidtrymky pryjnattja rishen'. Kyiv, Ukraine: ESC "IASA" NTUU "KPI", 2010, 340 p. [in Ukrainian].
11. Hurst J. M. The Profit Magic of Stock Transaction Timing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1970, 224 p.