

В.А. ТИХОНОВ, д-р физ.-мат. наук, В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, О.В. КАРТАШОВ

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОВГОСТРОКОВОЇ СКЛАДОВОЇ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ НА ПРИКЛАДІ АНАЛІЗУ СЕРЕДНЬОМІСЯЧНИХ ТЕМПЕРАТУР

Вступ

Оцінювання статистичних характеристик складових випадкових процесів, що спостерігаються в різних галузях людської діяльності протягом досить тривалих проміжків часу, є актуальним завданням. Актуальною є проблема виділення довготривалих корельованих складових акустичного сигналу БПЛА, що формують спектральний пік в низькочастотній області спектра [1 – 3]. Виділення спектру сигналу БПЛА в області низьких частот з використанням відповідних математичних моделей дозволяє ефективно виділяти БПЛА на фоні шумів та перешкод, що формуються іншими джерелами звуку [4 – 6].

Використання моделі авторегресії дозволяє також оцінювати параметри та розпізнавати сигнали [7, 8] на фоні перешкод, розпізнавати людину за голосом [9]. Актуальна, зокрема, проблема оцінки довготривалої зміни клімату Землі під дією природних та антропогенних факторів, яка цікавить не лише кліматологів, а й економістів, політиків, а також фахівців інших галузей [10].

З'ясувалося, що на температуру атмосфери впливає багато чинників: склад атмосфери; промислові викиди у повітря; активність Сонця; періодичні похолодання на Землі, що призводять до льодовикових періодів; зіткнення Землі з астероїдами та метеоритами; викиди у повітря великих вулканів; зміни у нерівномірному нагріванні земної поверхні та ін.

Особливий інтерес викликає вплив людини у вигляді викидів промислових підприємств на склад атмосфери Землі, отже, і температуру Землі. На думку ряду експертів, подолання кліматичних аномалій коштуватиме трильйони доларів на рік протягом 30 років. Тому актуальним є облік впливу людини на температуру атмосфери Землі та запобігання льодовиковим періодам [10, 11]. Для цього необхідно зокрема удосконалення методів аналізу змін температури, що фіксуються метеостанціями в різних точках Землі.

Метою дослідження був аналіз методу та моделі для оцінювання статистичних характеристик довгострокової складової випадкового процесу на прикладі аналізу середньомісячних температур. Отримані результати можуть використовуватися для аналізу середньострокових та довгострокових змін атмосферних явищ, уточнення результатів, отриманих традиційними методами математичної статистики, а також в інших сферах діяльності, наприклад для розпізнавання різних типів БПЛА.

Постановка задачі

У статті розглядається можливість знаходження параметрів слабких довгострокових змін випадкового процесу за наявності потужних короткострокових сезонних періодичних збурень. Для аналізу довгострокової зміни температури використовувалися дані середньомісячних значень температури атмосфери (3108 відліків) (рис. 1), отримані Пулковською обсерваторією за 259 років – з 1752 по 2010 р.

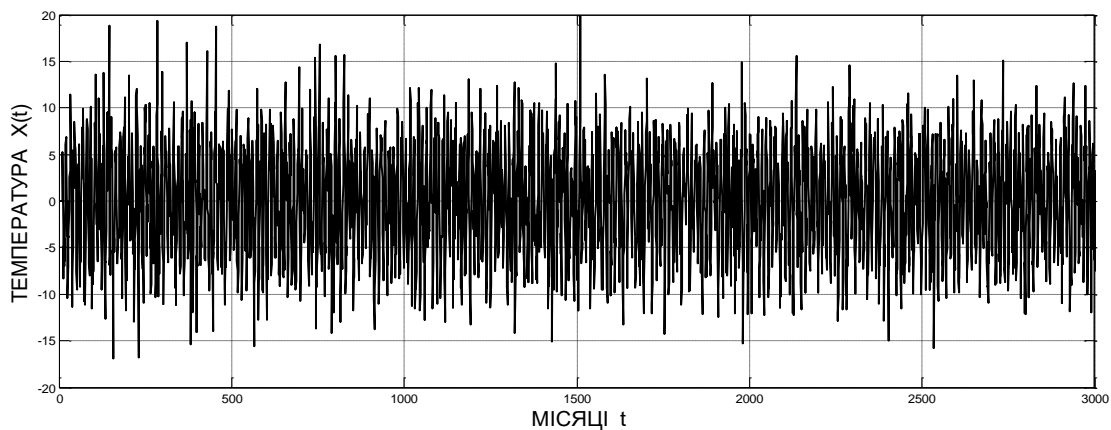


Рис. 1. Дані середньомісячних значень температури, зафіксованих у метеообсерваторії міста Пулкове (Санкт-Петербург)

На рис. 2 представлені дані середньомісячних температур, зафіксованих метеообсерваторією міста Сент-Луїс, шт. Міссурі [11] з 1845 по 1978 р. Подані на рис. 1, 2 дані містять слабкий тренд, пов'язаний із довготривалою зміною температури, сезонні коливання з періодом 12 місяців та стаціонарний процес змін середньомісячних температур.

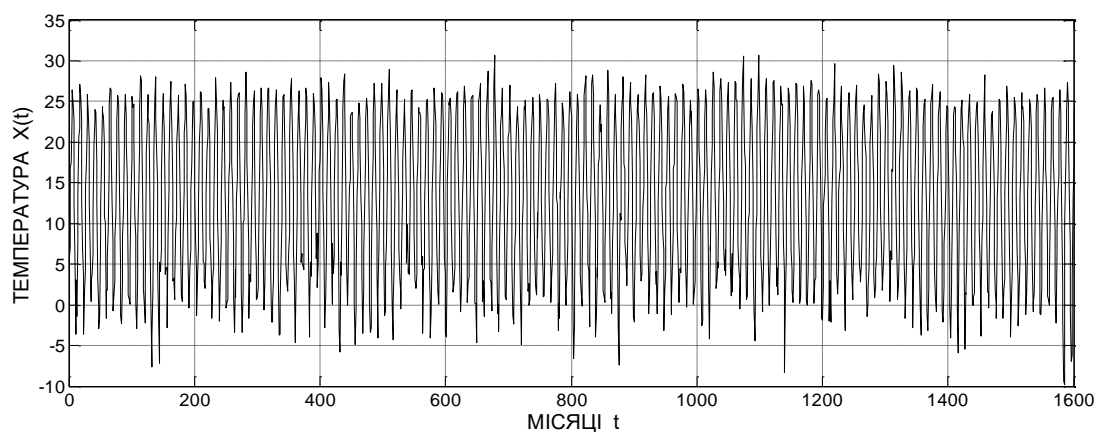


Рис. 2. Дані середньомісячних значень температури, зафіксованих у метеообсерваторії міста Сент-Луїс, штат Міссурі

Модель АРПКС сезонної складової та тренду температур

В основу математичної моделі для оцінювання статистичних характеристик довгострокової складової випадкового процесу покладемо модель авторегресії та проінтегрованого ковзного середнього (АРПКС) [12]. Нехай процес $x[t]$ містить тренд, сезонну складову та стаціонарний процес, який описуватимемо в загальному випадку моделлю авторегресії ковзного середнього (АРСС). Це класична модель декомпозиції нестационарного процесу [13].

Мультиплікативний процес $\omega[t]$ без сезонної складової і тренду можна записати у вигляді [12]

$$\omega[t] = \nabla^d \nabla_s x[t] = (1-z)^d (1-z_s) x[t] = \nabla^d \omega_1[t] \quad (1)$$

Розглянемо оператори, що входять до (1). Для виключення сезонної складової застосовується оператор різниці $\nabla_s = 1 - z^{-s}$, де z^{-s} – оператор зсуву, дія якого визначається виразом

$z^{-s}x[t] = x[t-s]$. Тоді процес без сезонної складової, з трендом та стаціонарної складовими, записується у вигляді

$$\omega_1[t] = \nabla_s x[t] = (1 - z_s)x[t].$$

Щоб виключити тренд з часового ряду $\omega_1[t]$, необхідно впливати на нього оператором $\nabla^d = (1 - z)^d$, тобто [5]

$$\omega[t] = (1 - z)^d \omega_1[t]. \quad (2)$$

Для лінійного тренду зазвичай вважають $d = 1$, а для квадратичного тренду необхідно використовувати $d = 2$ і так далі. Для лінійного тренду з (2) отримуємо, при $d = 1$

$$\omega[t] = \nabla \omega_1[t] = \omega_1[t] - \omega_1[t-1]. \quad (3)$$

Для квадратичного тренду отримуємо вираз (2), при $d = 2$. Тоді, з користуванням (3), маємо вираз для процесів без сезонної складової та квадратичного тренду

$$\omega[t] = \nabla^2 \omega_1[t] = \nabla(\omega_1[t] - \omega_1[t-1]) = (\omega_1[t] - 2\omega_1[t-1] + \omega_1[t-2]).$$

Зауважимо, що оператори, що усувають сезонні коливання, діють не тільки на сезонність процесу, а й на інші складові нестационарного процесу [14, 15]. Як показали експерименти, видалення сезонної складової сильно впливає на тренд і слабо впливає на стаціонарну складову процесу АРПКС. Операція видалення тренду слабо впливає на властивості сезонної складової і на стаціонарну складову процесу.

На рис. 3, 4 показано вибірки даних середньомісячних температур після видалення сезонної складової. Порівняння із графіками на рис. 1, 2 показує, що видалення сезонної складової в часових рядах середньомісячних температур не призводить до виявлення слабого тренду. За графіками на рис. 3, 4 складно визначити наявність довготривалих змін температури та виявити форму їхнього тренду.

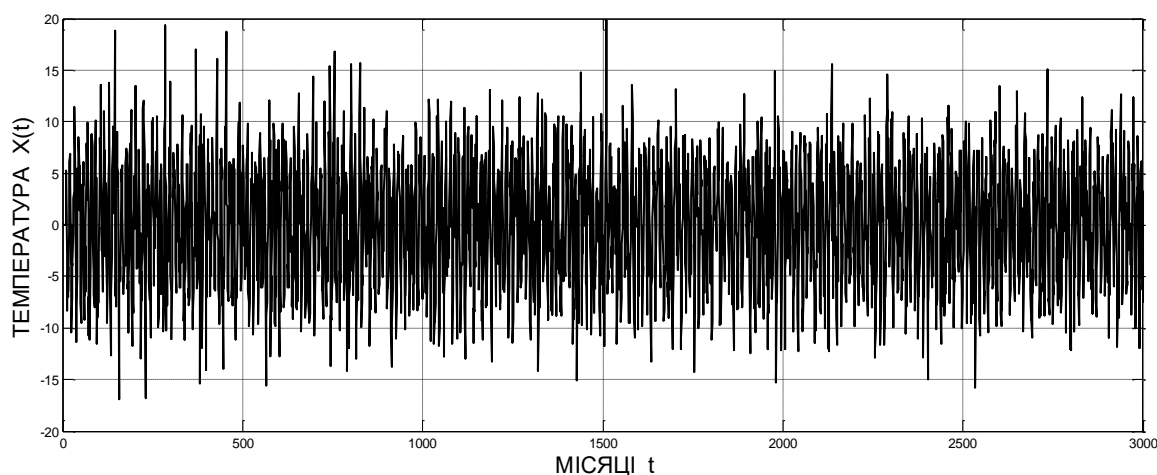


Рис. 3. Часовий ряд даних середньомісячних температур, зафіксованих у метеообсерваторії міста Пулкове, після видалення сезонної складової

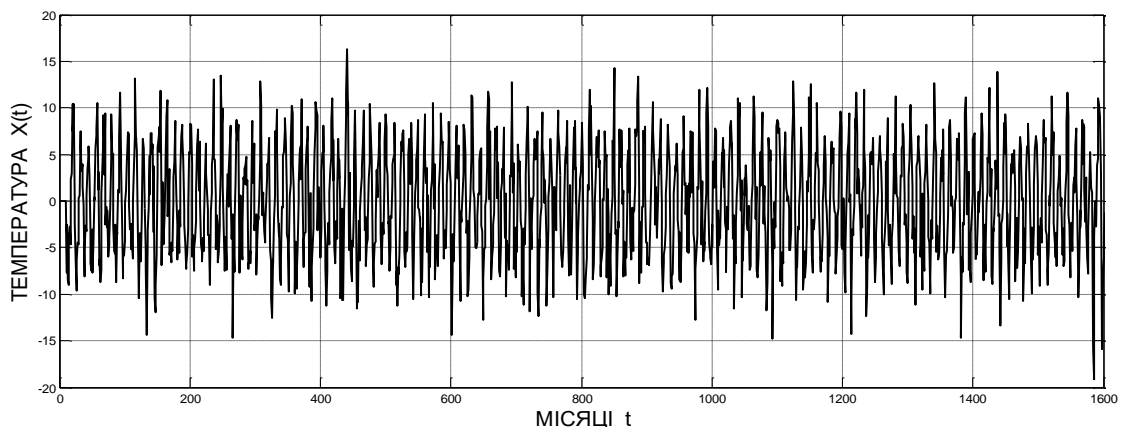


Рис. 4. Часовий ряд даних середньомісячних температур, зафіксованих у метеообсерваторії міста Сент-Луїс, після видалення сезонної складової

Виділення тренду температур

За даними миттєвих значень середньомісячних температур показаних на рис. 1, 2, важко визначити, чи є тренд температур. Видалення сезонної складової з використанням моделі АРПКС не дозволяє виділити довготривалий тренд температур.

Для оцінки тренду, знайдемо спочатку часовий ряд ковзним усередненням по кожному з відрізків, що складається з 12 місяців:

$$\omega_1[t'] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x[i + t' - 1], \quad n=12, \quad (4)$$

де $t' = 1, \dots, m$, а m – кількість років спостережень середньомісячних температур. На рис. 5 представлено дані середньорічних змін температури, показані на рис. 1.

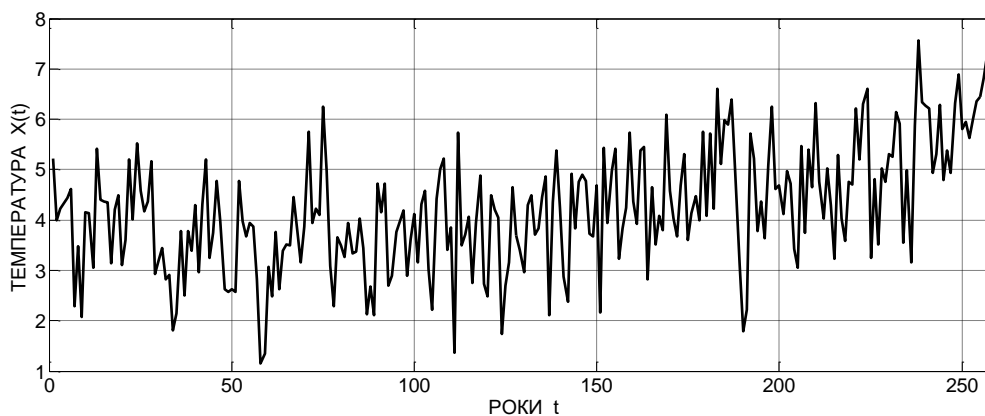


Рис. 5. Зміни середньорічних температур у м. Пулкове

На рис. 6 представлено дані середньорічних змін температури, показаних на рис. 2, знайдені за допомогою (4). Як показує аналіз даних, представлений на графіках (рис. 5, 6), спостерігається тренд середньорічних температур.

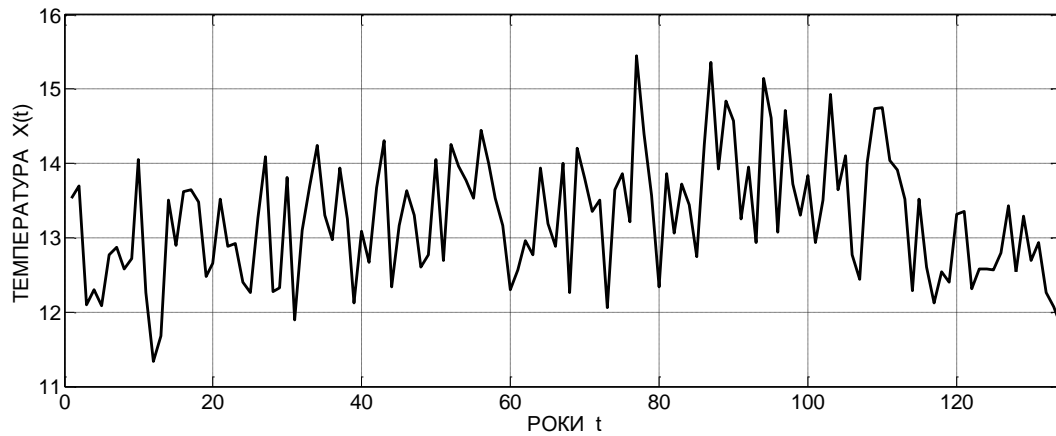


Рис. 6. Зміни середньорічних температур у місті Сент-Луїс

Чисельна оцінка тренду температур

Щоб отримати тренд довготривалої зміни температур протягом всього періоду спостереження, згладимо середньорічні значення, показані рис. 5, 6 за допомогою низькочастотного фільтра. Для зручності представлення даних продовжимо кожне значення тренду на 12 відліків. Тоді отримаємо часові ряди первісної довжини.

Аналіз тренду рис. 7 показує, що з 1752 до 1803 р. температура падала з 4,045 °С до 3,446 °С. Спад температури становив 0,599 °С. З 1804 р. спостерігалось зростання температури з 3,446 °С до 5,961 °С у 2010 р. Приріст температури за цей період становив 2,515 °С.

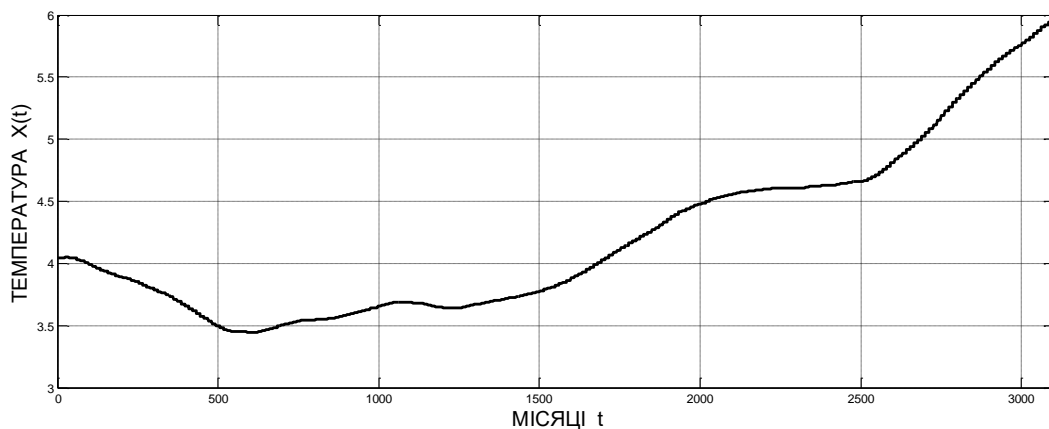


Рис. 7. Тренд температур у м. Пулкове, отриманий ковзним середнім від зміни середньорічних температур

Аналіз тренду на рис. 8 показує, що з 1845 до 1935 р. температура зросла з 12,82 °С до 13,76 °С. Зростання температури склало 0,947 °С. Але з 1936 спостерігалось падіння температури з 13,76 °С до 12,79 °С в 1978 р. Падіння температури за цей термін становило 0,974 °С. Таким чином зростання температури у цій місцевості спостерігався лише з 1845 р. до 1935 р., а потім, до кінця спостережень у 1978 р., температура падала. Це вказує на те, що останнім часом температура повітря не для всіх місць Землі має тенденцію до зростання.

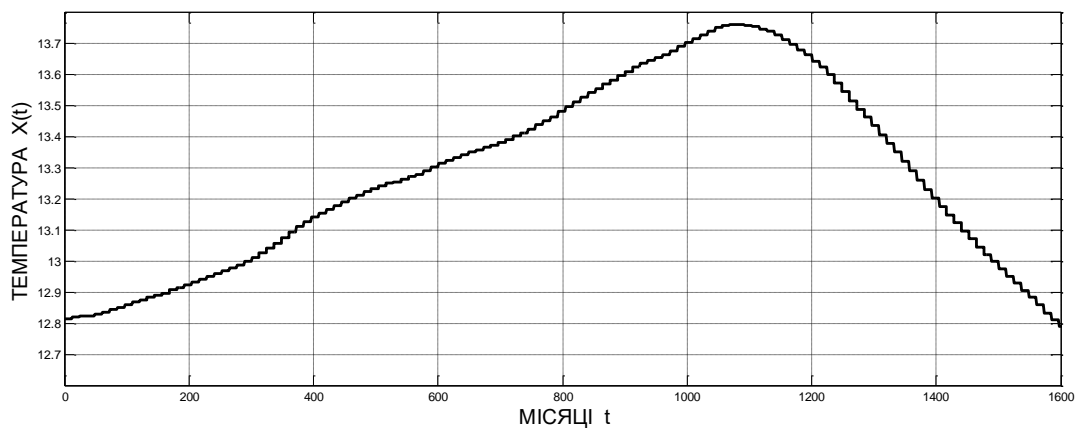


Рис. 8. Тренд температур у м. Сент-Луїс, отриманий ковзним середнім від зміни середньорічних температур

За даними фахівців, протягом останніх 140 років середньорічна температура Землі підвищилася приблизно на 1°C. У заяві вчених також зазначається, що глобальні середні температури у 2019 р. були на 1,1 °C вищими порівняно з доіндустріальним періодом (1850 – 1900 рр.).

Висновки

Для використовуваних у процесі аналізу даних температури неможливо з використанням моделі АРПКС визначити форму і величину тренду досліджуваного параметра. Для оцінки тренду попередньо було отримано середньорічні значення температур. З отриманих середньорічних значень температури ковзним усередненням отримано тренд процесу.

Як показали результати прикладних досліджень, в деякі інтервали часу тренд температур, що спостерігаються, не зростає, а й знижується. За даними метеообсерваторії у м. Пулкове з 1804 до 2010 р. спостерігалось загальне зростання. Приріст температури за цей термін становив 2,515 °C. За даними вимірювання температури в місті Сент-Луїс, з 1936 по 1978 р., спостерігалось падіння температури. Падіння температури за цей період становило 0,974 °C.

Запропонована модель може бути використана для дослідження процесів у різних галузях людської діяльності: аналізу траєкторій руху літальних апаратів, що спостерігаються, зокрема безпілотних літальних апаратів, метеорологічних процесів, що відображають стан атмосфери.

Список літератури:

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. Москва : Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.
3. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Zubkov O.V. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 9. P. 771-781.
4. Oleynikov V. N , Zubkov O. V., Kartashov V. M., Koryttsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic emission // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 9. P. 759-770.
5. Тихонов В.А., Карташов В.М., Олейников В.М., Леонидов В.И., Тимошенко Л.П., Селезнев И.С., Рыбников Н.В.. Обнаружение-распознавание беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Вип. №81, 2020; С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.38-46>.
6. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посібник. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
7. Омельченко В.А., Безрук В.М., Коваленко Н.П. Распознавание заданных радиосигналов при наличии неизвестных сигналов на авторегрессионной основе // Радиотехника. 2001. № 123. С. 195–199.

8. Дробахин О.О. Автоматизация процесса распознавания сигналов дефектоскопа на основе модели линейного предсказания // Дефектоскопия. 1985. № 10. С. 64–67.
9. Рамишвили Г.С. Автоматическое распознавание говорящего по голосу. Москва : Радио и связь, 1981. 224 с.
10. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва : Наука, 1985. 200 с.
11. Карташов В.М., Тихонов В.А., Олейников В.Н. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы. Харьков : ХНУРЭ, 2014. 312 с.
12. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1990. 584 с.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов : пер. с. англ. Москва : Мир, 1974. Вып.1. 406 с.
14. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting. Springer, 2002. P. 434.
15. Кармалита В.А. Цифровая обработка случайных колебаний. Москва : Машиностроение, 1986. 80 с.

Надійшла до редколегії 04.06.2022

Відомості про авторів:

Тихонов Вячеслав Анатолійович – д-р фіз-мат. наук, професор, професор кафедри інформаційно-мережної інженерії; Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: vyacheslav.tykhonov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-4787>

Карташов Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: volodymyr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Карташов Олександр Володимирович – здобувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; e-mail: msservicekh1@gmail.com