

В. С. Ванчак¹
С. І. Мельничук¹
І. З. Мануляк¹

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ З ГАРМОНІЧНИМИ СКЛАДОВИМИ

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Опрацювання дискретизованих сигналів, зокрема від первинних перетворювачів, є основою більшості низькорівневих процесів в цифрових компонентах комп'ютерних систем. До типових завдань такого опрацювання відносять: виділення інформативних складових сигналів, зменшення впливу шумів та спотворень зумовлених різними чинниками, компенсація нелінійності характеристик сенсорів та апаратних компонентів цифрових систем тощо.

В межах статті розглянуто особливості кореляційного опрацювання періодичних імпульсних сигналів з гармонічними складовими, зокрема проведено дослідження щодо ефективності їхнього детектування за наявності адитивного впливу шумів. Розглянуто аспекти формування еталонних фрагментів на основі експериментально отриманих наборів сигналів. Проведені дослідження включають розробку алгоритму виділення типових фрагментів з наборів сигналів, формування еталону на основі відомих математичних інструментів. Подано процеси, алгоритми та аналітичні вирази, що використовувались для формування еталонів, дослідження та оцінки ефективності опрацювання сигналів.

Основним критерієм для порівняння ефективності використання різних кореляційних функцій вибрано зміну оцінки відношення енергії сигналу до енергії шуму для вхідних сигналів та сигналів, отриманих після кореляційного опрацювання. Результати проведених досліджень показують вплив алгоритмів формування еталону та зміни кількості типових зразків на кореляційні функції у разі опрацювання дискретизованих періодичних імпульсних сигналів з гармонічними складовими.

Ключові слова: кореляційні функції, дискретний сигнал, періодичний імпульсний сигнал, опрацювання сигналу.

Вступ

Сучасні інформаційні джерела інтенсивно прогресують в області автономності, мініатюризації, розширення функціоналу, інтелектуалізації тощо. В такій ситуації актуальною залишається задача ефективної імплементації, адаптування та вдосконалення сучасних методів цифрового опрацювання сигналів, зокрема з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів. Однією з задач на такому рівні є поліпшення відношення корисного сигналу до шумів (SNR), зумовлених впливом на комунікаційний канал, нестабільністю характеристик перетворювачів форми інформації, флуктуаціями джерел живлення тощо [1]—[3]. Кореляція є одним зі способів оцінювання лінійних зв'язків між двома процесами [4]. Такий підхід часто застосовується для різних задач в опрацюванні сигналів, серед них усунення сторонніх артефактів з сигналу [5], пошук очікуваних складових сигналів [6], [7], зменшення впливу шумів в сигналі [1]. Кореляція є одним з методів пошуку та виділення корисної складової сигналу шляхом пошуку міри подібності вхідного сигналу до еталону [7], що дозволяє ефективніше працювати з вхідним сигналом.

Враховуючи, що кореляційний аналіз має широкий спектр застосування, є найдоцільнішим в задачах пошуку елементів в сигналі за характерними ознаками, зокрема форми, та має чіткий зв'язок та вплив на SNR сигналу [8], доцільно провести дослідження ефективності використання різних кореляційних функцій на сигнали, які мають власні характерні властивості та задачі.

Розв'язання задачі детектування складових та поліпшення SNR сигналу шляхом застосування кореляції за еталоном, потребує підбору кореляційної функції та підготовки етального сигналу, який матиме очікуваний узагальнений вигляд шуканого корисного сигналу [7]. Приклад фрагменту отриманого в ході натурального експерименту сигналу, показаного на рис. 1, дозволяє візуально виділити частину періодичних імпульсних сигналів, інша частина зазнала спотворень і практично не ідентифікується. Фактично основним завданням цифрового опрацювання таких сигналів є їхнє детектування за характерними ознаками форми, що ускладнюється гармонічними складовими.

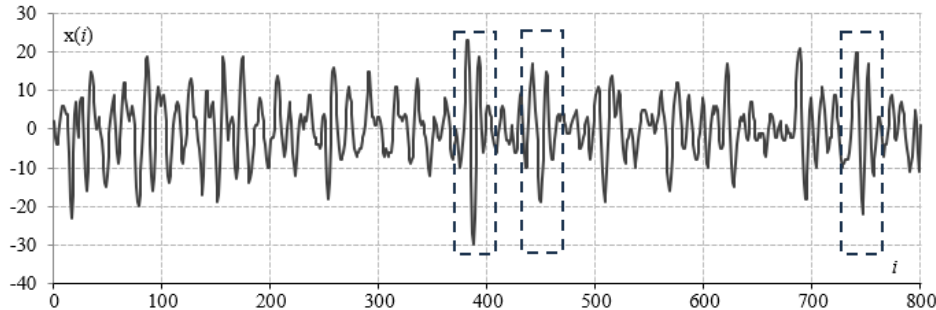


Рис. 1. Приклад вхідного досліджуваного сигналу

Метою дослідження є оцінка ефективності використання різних кореляційних функцій за кожного опрацювання періодичних імпульсних сигналів, які містять гармонічні складові, із застосуванням попередньо сформованих еталонів на основі набору типових зразків, взятих з експериментальних даних, та змінюючи метод формування етального сигналу.

Характеристики вхідного сигналу та формування етальонних зразків

В ході експериментальних досліджень сформовано множину наборів дискретизованих сигналів, отриманих з сенсора GD-10, оцінка ширини спектра яких подана на рис. 2. Очевидно, що частоти сигналу знаходяться в межах смуги практично до 20 Гц, при чому максимум енергії спостерігається в смузі від 6 до 14 Гц.

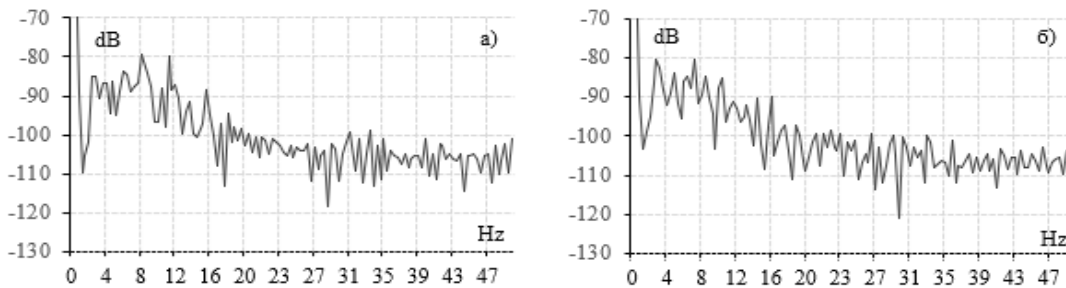


Рис. 2. Спектр сигналів: *a* — вхідний сигнал; *б* — сигнал шумів

З огляду на встановлену ширину спектра сигналу для подальшого дослідження доцільно обмежити частоту дискретизації аналого-цифрового перетворення до 100 Гц, що задовольняє умовам теореми Найквіста–Шеннона [4]. Слід зазначити, що для подальшого опрацювання використано 8-розрядне АЦП, що дозволяє отримати відліки сигналу (*smpl*) в діапазоні чисел від 0 до 255 або від -128 до +127.

Одним із варіантів детектування досліджуваних сигналів може бути використання математичного апарату кореляції або згортки, що потребує створення відповідних етальонних зразків сигналу, які будуть відповідати характерним ознакам форми. З рис. 1 можна побачити, що шукані сигнали, які потребують детектування, містять виражені три екстремальні точки. Причому перший екстремум зазвичай характеризується більшою величиною амплітуди ніж останній, що доцільно вважати за характерну ознаку форми і в подальшому використано для розробки відповідних алгоритмічних і програмних рішень для виділення типових зразків з набору експериментальних сигналів. Таким чином алгоритм реалізує пошук відповідного набору екстремумів для заданої довжини фрагменту сигналу з урахуванням відстані між екстремумами, зокрема така відстань не повинна перевищувати і не бути суттєво меншою за 30 відліків. Розмір виділення фрагмента для формування етального зразка вибирається з розмахом в 20 відліків від першого екстремуму, що дозво-

ляє отримати фрагмент розміром в 41 відлік. Виділивши та зібравши набір типових зразків формується узагальнений еталонний сигнал.

Такий підхід, зокрема вибрано для зменшення обчислювального навантаження та збереження ресурсу пам'яті. Самі типові зразки не можуть виступати як еталони, оскільки відсутнє стабільне джерело еталонного сигналу. Сигнали, отримані з природних джерел, під час натурних експериментів сформовані за різних початкових умов, зокрема відстань до джерела сигналу, середовище поширення, наявність/відсутність сторонніх джерел шуму тощо.

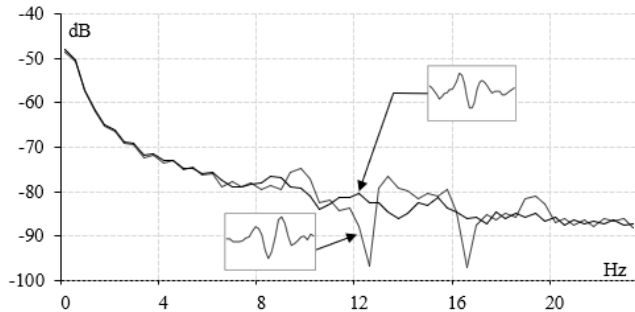


Рис. 3. Спектри фрагментів сигналу для ідентифікації

Як видно з рис. 3, окремі шукані елементи сигналу можуть мати різний частотний спектр та відрізнитись по формі, до того ж спостерігаються дзеркальні відображення. У підсумку — отримати типовий зразок, що не зазнав змін за формою та частотним спектром сигналу, практично неможливо.

У такій ситуації доцільно сформувати узагальнений еталон, який в подальшому можна уточнювати і вдосконалювати.

Для формування еталонного зразка з набору типових зразків використано такі математичні функції: середнього арифметичного, медіани, максимального та мінімального. Усі вони опрацьовують набір відібраних рівних за довжиною фрагментів, формують відповідний еталон заданої довжини, аналітичні вирази для формування еталонів такі:

$$x_{ref\ avg}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad (1)$$

$$x_{ref\ median}(j) = median(x_j); \quad (2)$$

$$x_{ref\ min}(j) = min(x_j); \quad (3)$$

$$x_{ref\ max}(j) = max(x_j), \quad (4)$$

де i — номер типового зразка, j — порядковий номер SMPL сигналу, n — розмір еталонного фрагмента, x_{ij} — відлік типового зразка, x_j — масив відліків сигналу з порядковим номером j із відібраних типових зразків.

Кожен метод передбачає почергове опрацювання відліків сигналу з відповідних позицій за усіма отриманими зразками, за кожною з вищеподаних формул обчислюється дискретний відлік для еталону, який формується. Приклади отриманих результатів формування еталонів за згаданими методами подано на рис. 4.

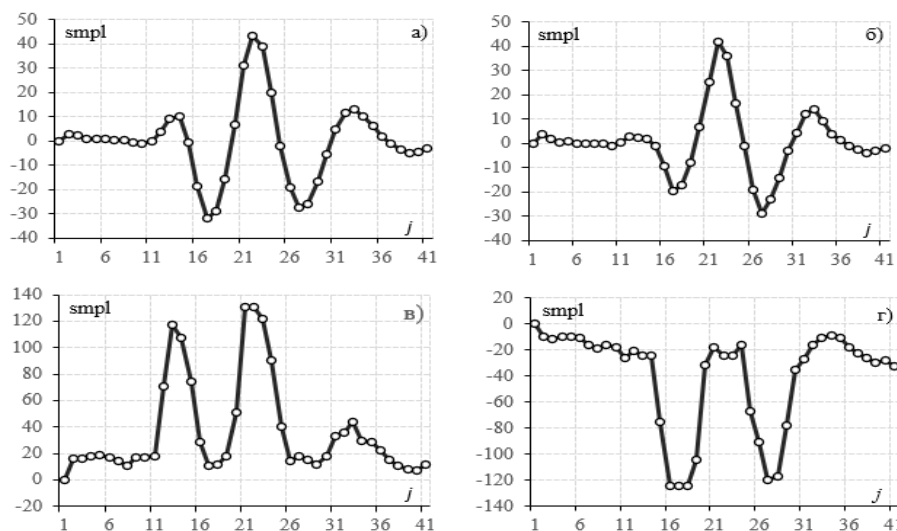


Рис. 4. Приклади еталонів сформованих за методами: а — середнього арифметичного; б — медіани; в — максимального з відповідних x_{ij} зразків сигналів; г — мінімального з відповідних x_{ij} зразків сигналів

З отриманих еталонів можна сказати що найближчими до типових взірців є сформовані математичною функцією середнього арифметичного та медіани, а функції максимального та мінімального з відповідних x_{ij} зразків сигналів дають еталон екстремумів сигналу вище та нижче осі коливань сигналу відповідно.

Підбір типових зразків здійснювався з набору збережених вхідних сигналів, зібраних в різних умовах під час натурних експериментів.

Крім підбору методу формування еталонного сигналу також змінювалась кількість відібраних типових зразків для дослідження її впливу на результат кореляції під час формування еталону. Набір типових зразків змінювався, починаючи з мінімального значення — п'яти типових зразків, і збільшувався поступово до п'ятдесяти з кроком в п'ять типових зразків.

Особливості використання різних кореляційних функцій

Кореляційне опрацювання дозволяє встановити міру подібності випадкових сигналів. Маючи частини періодичного імпульсного сигналу з повторюваним характерним виглядом, можна їх детектувати шляхом взаємкореляції з підготовленим еталонем та перевіркою проходження порогового значення коефіцієнта кореляції.

Таким чином здійснюється пошук інтервалів, де сигнал містить форму, подібну до одного із сформованих еталонів. Завдяки низькому кореляційному коефіцієнту сторонніх складових сигналу потенційно можливо зменшити вплив шумів, за умови використання ефективної кореляційної функції та підготовки еталону що дозволить вилучити чи суттєво послабити неінформативні складові сигналу. Досліджуючи вплив такого опрацювання вхідного дискретного сигналу, розглянуто кореляційні функції [9], [10] (табл. 1).

Таблиця 1

Використані кореляційні функції

| № з/п | Назва функції | Формула функції |
|-------|-----------------------|---|
| 1 | знакова | $H_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{sign } x_i \cdot \text{sign } y_{i+j};$ $\text{sign } x_i = \begin{cases} +1, & x_i \geq 0, \\ -1, & x_i < 0 \end{cases}$ |
| 2 | релейна | $B_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \text{sign } y_{i+j}$ |
| 3 | коваріаційна | $K_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_{i+j}$ |
| 4 | кореляційна | $R_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_{i+j}$ |
| 5 | нормована кореляційна | $\rho_{xy}(j) = \frac{R_{xy}(j)}{D_{xy}}$ |
| 6 | структурна | $C_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_{i+j})^2$ |
| 7 | модульна | $G_{xy}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_{i+j} $ |
| 8 | еквівалентна | $F_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \check{Z}_{ij}, \check{Z}_{ij} = \begin{cases} x_i, & x_i < x_{i+j}, \\ x_j, & x_i \geq x_{i+j} \end{cases}$ |

Провівши низку експериментів з опрацювання набору вхідних сигналів, отримано кореляційні сигнали, які згруповані за підготовленими еталонами (кількістю типових зразків та методами формування еталона) та за кореляційними застосованими функціями.

Приклад сформованих кореляційних сигналів для одного з вхідних сигналів показано на рис. 4. Подані графіки відображають одні з кращих результатів опрацювання серед розглянутих кореляційних функцій: рис. 5а — результат кореляційної функції і рис. 5б — результат релейної функції.

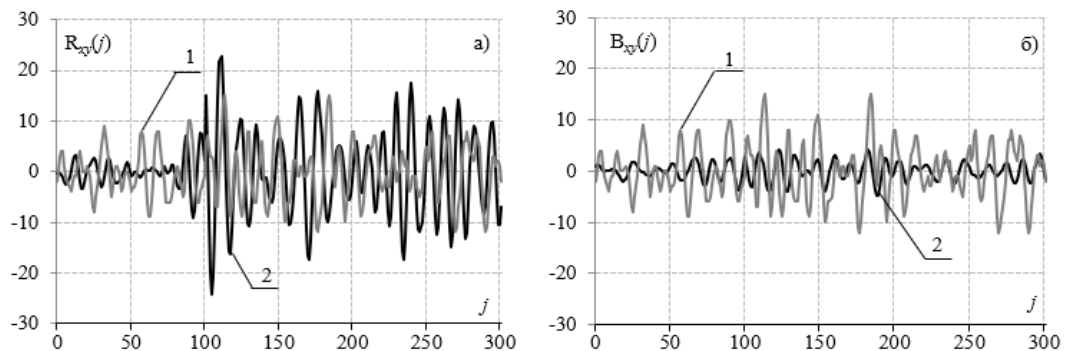


Рис. 5. Приклади результатів опрацювання кореляційними функціями: а — кореляційна; б — релейна; 1 — вхідний сигнал; 2 — кореляційний сигнал

Незважаючи на меншу амплітуду коливань ніж у вхідного сигналу, релейна функція за спостереженнями має менше шумів ніж вхідний сигнал, що потрібно підтвердити, оцінивши їхнє SNR.

Оцінка ефективності впливу кореляційних функцій та сформованих еталонів

З отриманих результатів опрацювання вхідних сигналів необхідно оцінити ефективність застосування кореляційних функцій, методів формування еталонів та інших параметрів. Для такої оцінки використано порівняння відношення SNR вхідного сигналу до та після опрацювання різними кореляційними функціями (табл. 1), оскільки в цьому сигналі цікавить виділення корисної складової поміж шумів. Відношення сигналу до шуму можна подати в цьому випадку як відношення енергії сигналу до енергії шуму, оскільки ми маємо імпульсний сигнал в рівних часових проміжках [11]. Задля цього, до кожного сигналу який пройшов кореляційне опрацювання та містить окремо фрагмент з шумами та фрагмент з інформаційною складовою, виведено з однакових часових проміжків енергію корисного сигналу та енергію шумів до та після кореляційного опрацювання за допомогою підготовленого ПЗ [4].

$$E_s = \sum_{k=1}^n (s_k)^2. \quad (5)$$

Розмір n визначає розмір фрагмента сигналу, тому важливо щоб усі фрагменти вхідних сигналів чи кореляційних функцій були рівні за розміром та мали відповідати однаковим часовим проміжкам сигналів з інформативними складовими та шуму. Отримуємо співвідношення сигналу до шуму (SNR) через показник енергії визначених фрагментів вхідного сигналу.

$$SNR = \frac{E_{s \text{ signal}}}{E_{s \text{ noise}}}. \quad (6)$$

Задля оцінки ефективності SNR кожного кореляційного сигналу, сформованого за різних параметрів, порівнювався з SNR відповідного вхідного сигналу. Отримавши їхню різницю, можна точно оцінити чи застосування конкретної кореляційної функції з вибраним еталонем, сформованим за певними параметрами, є достатньо ефективним по відношенню до вхідного сигналу та порівняти з іншими кореляційними сигналами кореляційних функцій з іншими вхідними параметрами.

Для відбору найкращих результатів спочатку виводився найкращий результат за SNR по кожній кореляційній функції за кількістю використаних типових зразків та алгоритмом формування шаблону. Вивівши найкращі результати для кожної кореляційної функції, формувався список найкращих результатів з опрацювання вибраного сигналу (подано в табл. 2).

Провівши оцінку ефективності впливу кореляційної функції та зміни параметрів формування еталону та згрупувавши результати за кореляційною функцією, кількістю використаних типових зразків та математичною функцією, використаною для формування еталону, підтверджено, що для досліджуваного сигналу достатньо ефективними за середніми загальними показниками відношення енергії сигналу до енергії шуму є такі функції: релейна, коваріаційна та кореляційна. Якщо го-

ворити про найкращий результат, то релейна функція показала найкраще відношення SNR в опрацюванні досліджуваного сигналу.

Таблиця 2

Результати порівняння ефективності кореляційних функцій для опрацювання одного з сигналів, спотворених шумами, з показником SNR = 2,19416

| № з/п | Назва функції | Алгоритм формування еталона | Кількість типових зразків | SNR |
|-------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------|
| 1 | релейна | мін. | 50 | 2,70300 |
| 2 | коваріаційна | макс. | 5 | 2,55827 |
| 3 | кореляційна | мін. | 50 | 2,47005 |
| 4 | еквівалентна | мін. | 5 | 1,82019 |
| 5 | структурна | середнього арифметичного | 25 | 1,75177 |
| 6 | модульна | середнього арифметичного | 25 | 1,40377 |
| 7 | нормована кореляційна | медіана | 50 | 1,07305 |
| 8 | знакова | мін. | 50 | 0,98610 |

За кількістю типових зразків в більшості випадків кращий результат давала більша кількість застосованих зразків, проте через наявність кращих результатів в певних випадках — менша кількість типових зразків за відсутності сталих результатів в межах окремих кореляційних функцій. За алгоритмами формування шаблону не помічено сталих переваг результатів для кореляційних функцій. Незважаючи на те, що не отримано сталих результатів та закономірностей від зміни параметрів формування еталону, все ж вони мають помітний вплив на результати SNR кореляційних сигналів, і залежно від них за результатами дослідження помічено зміни від 13 до 115 %, порівнюючи мінімальні і максимальні показники в межах окремих кореляційних функцій. Найбільший вплив ці параметри мають на еквівалентну функцію. Якщо розглядати відібрані найкращі кореляційні функції — релейна, коваріаційна, кореляційна, то вони мають поліпшення SNR від зміни параметрів в середньому на 44,5 %, 18,6 %, 29,3 % відповідно.

Висновки

У ході досліджень проаналізовано дискретний періодичний імпульсний сигнал з набору експериментальних досліджуваних сигналів. Шляхом порівняння спектрів сигналу з корисною складовою та сигналу шуму, встановлено наявність гармонічних складових, на основі чого базується припущення про доцільність застосування кореляційного опрацювання до досліджуваних сигналів з метою детектування певних повторюваних складових сигналу.

Оцінюючи ефективність застосування різних кореляційних функцій та різних еталонів, сформованих за різною кількістю типових зразків та із застосуванням різних математичних функцій, використано для порівняння відношення SNR сигналів до та після кореляційного опрацювання. Згрупувавши результати за кореляційною функцією, кількістю використаних взірців та математичною функцією, використаною для формування еталону, встановлено:

1. Найкращі результати за SNR спостерігається для релейної кореляційної функції. Також покращення SNR помічено за використання кореляційної та коваріаційної функції в низці експериментів з набором вхідних сигналів. Решта кореляційних функцій показали результати з гіршим SNR ніж у вхідного сигналу, що говорить про їхню малоприсадибність для застосування до такого виду сигналів.

2. Кількість типових зразків мала вплив на результати кореляційних сигналів, і в більшості випадків найкращі показники давала більша їхня кількість, незалежно від використаної математичної функції для формування еталону та кореляційної функції. Проте така закономірність не є сталою, і найкращі результати SNR серед кореляційних сигналів, сформованих однією кореляційною функцією, деколи були кращі за найменшою кількістю зразків чи за проміжною їхньою кількістю. Такий результат говорить про те, що більша кількість типових зразків, хоч і з більшою ймовірністю, дасть кращий результат кореляційного опрацювання, та важливішим є критичний та ретельний відбір типових зразків, з яких буде формуватись загальний еталон, і перевірка його у роботі з вибраною кореляційною функцією.

3. Метод формування еталону, хоч і часто мав вплив на результат кореляційної функції, проте, за результатами низки експериментів з набором вхідних сигналів не виявлено закономірностей поліпшення ефективності від застосування конкретного методу формування еталону загалом чи в комбінації з окремою кореляційною функцією.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Chen, J. Benesty, Y. Huang, and S. Doclo, "New insights into the noise reduction Wiener filter," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 14, no. 4, pp. 1218-1234, June. 2006. <https://doi.org/10.1109/TSA.2005.860851> .
- [2] H. C. Stronks, J. J. Briaire, and J. H. M. Frijns, "Beam forming and Single-Microphone Noise Reduction: Effects on Signal-to-Noise Ratio and Speech Recognition of Bimodal Cochlear Implant Users," *Trends in Hearing*, vol.26, January-December. 2022. <https://doi.org/10.1177/23312165221112762> .
- [3] G. Huang, J. Benesty, T. Long, and J. Chen, "A Family of Maximum SNR Filters for Noise Reduction," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 22, no. 12, pp. 2034-1234, September. 2014. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2014.2360643> .
- [4] J. G. Proakis, and D. G. Manolakis, *Digital signal processing. Principles, Algorithms, and Applications*. Third edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [5] C. Lin, C. Huang, W. Yang, A. K. Singh, C. Chuang, and Y. Wang, "Real-Time EEG Signal Enhancement Using Canonical Correlation Analysis and Gaussian Mixture Clustering," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2018, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5081258> .
- [6] M. Zhang, and G. Wei, "An Instantaneous Correlation Coefficient and Simplified Coherent Averaging Method for Single-Channel Foetal ECG Extraction," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 16: 5634, August. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10165634> .
- [7] S. Hong, J. Heo, and K. S. Park, "Signal Quality Index Based on Template Cross-Correlation in Multimodal Biosignal Chair for Smart Healthcare," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 21, no. 22: 7564, November. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21227564> .
- [8] M. Borga, *Canonical Correlation: A Tutorial*, 2001. [Electronic resource]. Available: https://www.cs.cmu.edu/~tom/10701_sp11/slides/CCA_tutorial.pdf . Accessed on: July 18, 2023.
- [9] Н. Г. Ширмовська, І. Б. Албанський, І. Р. Пітух, і О. Л. Кулинин, «Застосування кореляційного та кластерного аналізу для ідентифікації передаварійних та аварійних станів процесів буріння,» *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, № 3(29), с. 111-118, 2011.
- [10] А. І. Сегін, «Перспективи побудови кореляційних моделей в полярній системі координат,» *Штучний інтелект*, № 43, с. 105-114. 2009.
- [11] Ю. О. Кулаков, і В. Ю. Куц, «Оцінка співвідношення сигнал/шум в функціонально-орієнтованих системах аналізу циклічних сигналів,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 57, с. 65-69, 2012.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.07. 2023

Ванчак Віталій Сергійович — аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж, e-mail: vitaliyvanchak@gmail.com ;

Мельничук Степан Іванович — д-р технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж, e-mail: stenni@ukr.net ;

Мануляк Ірина Зіновіївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж, e-mail: manulyak-iryna@ukr.net .

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

V. S. Vanchak¹
S. I. Melnychuk¹
I. Z. Manuliak¹

Correlation Functions Application Effect on Periodic Pulse Signal with Harmonic Elements

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Discrete signal processing is a core function for most low-level processes in digital elements of computer systems. Typical task of such processing is allocation of informative components, reduction of the impact of noise and distortions

caused by various factors, and nonlinearity compensation of sensors and hardware components characteristics of digital computer systems, etc.

Within the limits of this article characteristic features of correlation processing of periodic pulse signals with harmonic components was reviewed, experiment regarding the effectiveness of their detection in case of presence of additive effects of noise was carried out. Aspects of reference fragments formation, based on the experimentally obtained set of signals are considered. Conducted research includes development of the algorithm for the allocation of the typical fragments from the set of signals, formation of the template, based on the known mathematical tools. The processes, algorithms, and analytical expressions used for the formation of the reference signals, research and evaluation of the effectiveness of signal processing are provided.

Main criterion for the comparison of the efficiency of usage of various correlation functions was selected the change of the assessment of signal energy to noise energy ratio for the input signals and their correlation signals. The research results show the impact of the algorithms of reference signal formation, and changing the number of pre-allocated signal fragments on correlation functions in case processing of discrete periodic pulse signals with harmonic components.

Keywords: correlation functions, discrete signal, periodic pulse signal, signal processing.

Vanchak Vitalii S. — Post-Graduate Student the Chair of Computer Systems and Networks, e-mail: vitaliyvanchak@gmail.com ;

Melnychuk Stepan I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Computer Systems and Networks, e-mail: stenni@ukr.net ;

Manuliak Iryna Z. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Systems and Networks, e-mail: manulyak-iryna@ukr.net