

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDC 519.65

Serhii Lupenko^{1,2}, Dr. Sc. (Tech), Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-0721> *e-mail*: lupenko.san@gmail.com

Oleksandr Volianyk¹, doctoral student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-7580> *e-mail*: wonderage2018@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²American University Kyiv, Kyiv, Ukraine

IMPROVED ONTOLOGICAL MODEL OF THE KNOWLEDGE BASE OF THE EXPERT SYSTEM FOR DECISION SUPPORT IN THE FIELD OF DIGITAL PROCESSING AND COMPUTER SIMULATION OF CYCLIC SIGNALS

Abstract. *The work is devoted to the improvement of the conceptual and formal-logical model of the ontology of the subject area "Modeling and Processing of Cyclic Signals". Namely, the work developed a formal-logical model of the sub-ontology of tasks, a formal-logical model of the sub-ontology of problem-solving methods in the field of modeling and processing of cyclic signals, a formal-logical model of the sub-ontology of hardware and software tools, and a formal-logical model of the sub-ontology of the results of applying mathematical models, methods and means of processing and computer simulation of cyclic signals. The improved ontology model and its implemented prototype are the main knowledge base of the onto-oriented expert decision-making support system when solving the tasks of justified selection of mathematical models and methods for evaluating characteristics, spectral analysis and computer simulation of cyclic signals within the framework of the theory of cyclic functional relations. Examples of ontology fragments developed in the Protégé environment are given. The non-contradiction of the developed ontology was confirmed by means of Protégé's automated formal and logical reasoning. The expediency of API-based integration of the developed computer ontology with a large linguistic model, namely, with ChatGPT, is substantiated.*

Keywords: *modeling of ontologies, mathematical modeling, signal processing, cyclic signals, computer ontology, expert system.*

С.А. Лупенко^{1,2}, О.В. Воляник¹

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²American University Kyiv, м. Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕНА ОНТОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ БАЗИ ЗНАТЬ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ГАЛУЗІ ЦИФРОВОГО ОПРАЦЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИМУЛЯЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ

***Анотація.** Робота присвячена удосконаленню концептуальної та формально-логічної моделі онтології предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів». А саме, в роботі розроблено формально-логічну модель підонтології завдань, формально-логічну модель підонтології методів розв'язання завдань в галузі моделювання та опрацювання циклічних сигналів, формально-логічну модель підонтології програмно-апаратних засобів та формально-логічну модель підонтології результатів застосування математичних моделей, методів та засобів опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів. Удосконалена модель онтології та реалізований її прототип є основою бази знань онтоорієнтованої експертної системи підтримки прийняття рішень при вирішенні завдань обґрунтованого вибору математичних моделей та методів оцінювання характеристик, спектрального аналізу та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів в рамках теорії циклічних функціональних відношень. Наведено приклади фрагментів онтології, розробленої в середовищі Protégé. Засобами автоматизованого формально-логічного розмірковування Protégé підтверджено несуперечність розробленої онтології. Обґрунтовано доцільність інтеграції на основі API розробленої комп'ютерної онтології із великою лінгвістичною моделлю, а саме, із ChatGPT.*

***Ключові слова:** моделювання онтології, математичне моделювання, опрацювання сигналів, циклічні сигнали, комп'ютерна онтологія, експертна система.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.92-98>

Вступ

Останні два десятиліття принесли значний прогрес у теорії та практиці побудови адекватних математичних моделей та ефективних моделебазованих ритмоадаптивних методів опрацювання циклічних сигналів на основі використання математичного апарату детермінованих та стохастичних циклічних функціональних відношень та їх перетворень [1-4]. Отримані результати суттєво доповнюють, поглиблюють та розширюють відомі напрацювання в рамках теорій періодично корельованих випадкових процесів [5-8], теорії періодично розподілених випадкових процесів [9], лінійних періодичних випадкових процесів та періодичних білих шумів [10], періодичних та періодично корельованих марковських процесів [11]. Однак, не дивлячись на суттєвий прогрес в галузі математичного моделювання та цифрових методів опрацювання сигналів циклічної просторово-часової структури, обґрунтування та вибір математичної моделі та відповідних моделебазованих методів опрацювання досліджуваних сигналів є непростою задачею, що потребує у дослідника глибоких математичних знань та практичного багаторічного досвіду роботи в цій галузі науки та інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У цьому контексті, в роботах [12, 13] досліджуються питання розробки експертної онтоорієнтованої системи обґрунтованого вибору оптимальної (квазіоптимальної) моделі, методів та програмно-апаратних засобів цифрового опрацювання циклічних сигналів. Така система суттєво полегшить розробникам процес побудови моделєбазованої інформаційної технології опрацювання циклічних сигналів. Користувачами експертної системи (ЕС) можуть бути дослідники, інженери та інші фахівці, які мають потребу вирішувати завдання у галузі моделювання та опрацювання циклічних сигналів, але не обов'язково є експертами в цій області. Основним завданням ЕС є рекомендація оптимальних об'єктів для вирішення конкретних завдань користувача, таких як клас математичних моделей, конкретна модель та методи опрацювання і комп'ютерної імітації циклічних сигналів.

Як відомо, у розробці експертних систем головну роль відіграє створення її бази знань. Оскільки інженерія знань стрімко розвивається, особливо в галузі онтологічного моделювання [14-21], у роботах [12, 13] обґрунтовано використання комп'ютерної онтології як ядра бази знань експертної системи. Таке рішення, на основі онтоорієнтованих дерев рішень, дозволило специфікувати та автоматизувати логічні процеси, які лежать у теорії та практиці моделювання та опрацювання циклічних сигналів. Крім того, онтологічний підхід повністю узгоджений із стратегією аксіоматико-дедуктивного організування теорії, що забезпечує її структурованість та формалізованість, полегшуючи виявлення нових напрямів у цій галузі. Однак варто зауважити, що отриманих у роботах [12, 13] результатів недостатньо для побудови повноцінної бази знань експертної системи, оскільки розроблена концептуальна та формально-логічна моделі онтології не містять достатнього рівня деталізації опису знань в предметній області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів», зокрема, не містять формально-логічних моделей підонтологій типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, методів та програмних засобів їх розв'язання, а також моделей онтології результатів застосування цих методів та засобів.

Мета роботи

Основною метою даної статті є удосконалення онтологічної моделі бази знань експертної системи підтримки прийняття рішень в галузі цифрового опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів, а саме, необхідно розробити концептуальні та формально-логічні моделі підонтологій типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, методів та програмних засобів їх розв'язання, а також моделей онтології результатів застосування цих методів та засобів.

Об'єктом дослідження є процес побудови формально-логічних моделей вказаних підонтологій предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів».

Виклад основного матеріалу дослідження

Згідно із роботами [12, 13], семантичний простір предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів» у рамках теорії циклічних функціональних відношень є упорядкованою множиною п'яти змістовних підпросторів: підпростір математичних моделей сигналів, підпростір типових завдань моделювання та опрацювання циклічних сигналів, підпростір методів опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, підпростір програмно-апаратних засобів та підпростір результатів застосування цих знань у різних галузях. Згідно з аксіоматико-дедуктивною стратегією теорії циклічних функціональних відношень, логіко-семантичне ядро цього простору має містити термінологічно-понятійний апарат та систему тверджень, розподілену на аксіоматичну та вивідну групи. В залежності від рівня абстракції виокремлено метадисциплінарне ядро, абстрактне ядро та часткові змістовні області семантичного простору предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів». Виділення п'яти змістовних підобластей предметної області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів" вказує на необхідність розробки п'яти підонтологій для цієї предметної області, а саме, розробки підонтології O_1 математичних моделей циклічних сигналів, підонтології O_2 типових завдань опрацювання та моделювання цих сигналів, підонтології O_3 методів опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, підонтології O_4 програмно-апаратних засобів опрацювання цих сигналів та підонтології O_5 результатів застосування цих знань у різних галузях. Ці підонтології специфікують відповідні аспекти предметної області та упорядковують її семантичний простір.

У роботах [12, 13] побудовано формально-логічну модель комп'ютерної онтології математичних моделей сигналів циклічної просторово-часової структури, а саме, онтології O_1 . У цій роботі побудуємо формально-логічну модель лише для підонтології O_2 типових завдань опрацювання та моделювання цих сигналів, оскільки підонтології O_3 , O_4 та O_5 мають аналогічні структури. Друга онтологія O_2 – це онтологія типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів. На формальному рівні вона задається такою реляційною системою:

$$O_2 = \{A_2 = B_2 \cup C_2, R_2 = \{AKO, IS - A\}, F_2 = \{f_2(\cdot)\}\}, \quad (1)$$

де A_2 – скінченна множина термінів (понять), яка задає лексичний запас онтології O_2 ;

B_2 – скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів;

C_2 – скінченна множина термінів, які розкривають зміст типових завдань (терміни-концепти, що означають (інтерпретують) типові завдання);

F_2 – одноелементна множина, яка містить функцію інтерпретації $f_2(\cdot)$ типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, областю визначення якої є множина C_2 , а областю значень є множина B_2 . Функція інтерпретації $f_2(\cdot)$ задає означення відповідних типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів із B_2 , формуючи глосарій онтології O_2 ;

R_2 – одноелементна множина, яка містить лише відношення родо-видового підпорядкування **АКО**, яке пов’язує між собою множину (клас) та підмножину (підклас) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, задаючи їх таксономію (ієрархію).

Згідно із концептуальною моделлю предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів» скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів B_2 структурно та змістовно є залежною від множини B_1 класів математичних моделей циклічних сигналів, а саме, кожному класу математичних моделей $Mod_i \in B_1$ ставиться у відповідність множина $B_{2,i}$, яка є підмножиною множини B_2 ($B_{2,i} \subset B_2$), і яка, як свої елементи, включає всі типові задачі опрацювання та комп’ютерної імітації циклічних сигналів в рамках класу Mod_i математичних моделей.

Отже, всю множину типових завдань B_2 можна подати таким чином:

$$B_2 = \cup_i B_{2,i}, B_{2,i} \cap B_{2,j} = \emptyset, \text{ при } i \neq j, B_{2,i} \neq \emptyset, B_{2,j} \neq \emptyset. \quad (2)$$

Тобто, всю множину типових завдань B_2 можна розбити на взаємно неперетинні підмножини, кожна із яких, як свої елементи, містить лише ті типові завдання, які мають місце в рамках відповідного класу математичних моделей досліджуваних циклічних сигналів, а саме, існує таке розбиття $D_{B_2} = \{B_{2,i}, i = \overline{1, I}\}$. З іншої сторони, всю множину типових завдань B_2 можна розбити на взаємно неперетинні підмножини, кожна із яких, як свої елементи, містить лише ті завдання, які стосуються одного класу однотипних завдань (класу однотипних завдань).

Однотипні завдання перебувають між собою у родо-видовому взаємозв’язку, який задається відношенням **АКО**, яке пов’язує між собою множину (клас) та підмножину (підклас) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, задаючи їх таксономію (ієрархію). Ця таксономія є ізоморфною таксономії **Tax_of_Cf** між класами циклічних функціональних відношень.

Множину B_2 , яка містить назви типових завдань, будемо позначати так:

$$B_2 = \text{Set_Task} = \{Task_{\bar{I}\bar{J}}, \bar{I} \in N^n, \bar{J} \in N^n\}, \quad (3)$$

де $Task_{\bar{I}\bar{J}}$ – позначення \bar{J} -го типового завдання опрацювання та комп’ютерної імітації циклічних сигналів у рамках \bar{I} -го класу математичних моделей циклічних сигналів.

Скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів B_2 для абстрактної циклічної функції складається із таких назв типових завдань:

$$B_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Завдання попереднього опрацювання,} \\ \text{Завдання оцінювання атрибутів циклічності,} \\ \text{Завдання оцінювання атрибутів ритму,} \\ \text{Завдання кластеризації,} \\ \text{Завдання класифікації,} \\ \text{Завдання прогнозування,} \\ \text{Завдання регресії,} \\ \text{Завдання комп’ютерної імітації.} \end{array} \right\}$$

Розроблені формально-логічні моделі підонтологій для області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів" трансформовано в машинно-інтерпретовану форму за допомогою мови опису онтологій OWL DL та середовища Protégé. Як відомо, OWL (Web Ontology Language) є загально визнаним стандартом опису онтологій та у поєднанні із Protégé забезпечує графічний інтерфейс та можливість логічного виведення, полегшуючи розробку та верифікацію онтологій. Було здійснено верифікацію розробленої онтології, а саме, здійснено формальну перевірку її логічної несуперечності та змістовної повноти. Логічна несуперечність онтології підтверджується відсутністю логічних помилок у процесі перевірки засобами Protégé (із використанням вмонтованих у Protégé процедур автоматизованого формально-логічного розмірковування). Повнота онтології наразі не є досягнутою, оскільки ще не всі класи математичних моделей та методів опрацювання циклічних сигналів відображені в онтології.

Висновки

У роботі удосконалено комп'ютерну онтологію предметної області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів", а саме, розроблено формально-логічну модель її конкретних підонтологій. На основі цієї моделі побудовано прототип комп'ютерної онтології в середовищі Protégé, що стало основою для створення експертної системи підтримки прийняття рішень в галузі цифрового опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів.

REFERENCES

1. Lupenko, S. (2022). The Mathematical Model of Cyclic Signals in Dynamic Systems as a Cyclically Correlated Random Process. *Mathematics*, 10, 3406. <https://doi.org/10.3390/math10183406>
2. Lupenko, S.; Butsiy, R. (2024). Isomorphic Multidimensional Structures of the Cyclic Random Process in Problems of Modeling Cyclic Signals with Regular and Irregular Rhythms. *Fractal Fract.*, 8, 203. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8040203>
3. Lupenko, S. (2024). Rhythm-adaptive statistical estimation methods of probabilistic characteristics of cyclic random processes. *Digital Signal Processing*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.10456>
4. Lupenko, S. (2023). The rhythm-adaptive Fourier series decompositions of cyclic numerical functions and one-dimensional probabilistic characteristics of cyclic random processes. *Digital Signal Processing*, 104104, ISSN 1051-2004, <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104104>
5. Gardner, W. A., Napolitano, A., & Paura, L. (2006). Cyclostationarity: Half a century of research. *Signal Processing*, 86, 639–697.
6. Hurd, H. L. (2007). *Periodically Correlated Random Sequences: Spectral Theory and Practice*. The University of North Carolina at Chapel Hill Hampton University.
7. Napolitano, A. (2019). *Cyclostationary Processes and Time Series. Theory, Applications, and Generalizations*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04240-4>
8. Dragan, Ya., Yevtukh, P., Sikora, L., & Yavorsky, B. (2000). Periodically correlated random processes as adequate models of signals of multiple rhythms of natural phenomena and technological processes. *Computer technologies of printing*, 4, 269–290. (In Ukrainian). [Драган, Я., Євтух, П., Сікора, Л., Яворський, Б. (2000). Періодично корельовані випадкові процеси як адекватні моделі сигналів кратної ритміки природних явищ і технологічних процесів. *Комп'ютерні технології друкарства*, 4, 269–290].

9. Dorogovtsev, A.Y. (1990). Stationary and periodic solutions of stochastic difference and differential equations in Banach space. In *New Trends in Probability and Statistics* (Vol. 1, pp. 375–390). VSP: Utrecht, The Netherland.
10. Marchenko, B.G. (1999). Linear periodic processes. *Pr. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Electrical engineering*, 165–182. (In Ukrainian). [Марченко, Б.Г. (1999). Лінійні періодичні процеси. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка*, 165–182].
11. Nematollahi, A.R. (2000). Discrete time periodically correlated Markov processes. *Probability and Mathematical Statistics*, 20 (1), 127–140.
12. Lupenko, S., Stadnyk, N., & Nnamene, Ch. (2019). An approach to constructing a taxonomic tree of models cyclic signals in the tasks of developing an onto-oriented system for decisions supporting of models choice. In *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*" June 5-7, 2019 in Ceske Budejovice, Czech Republic (pp. 89-92). ISBN 978-1-7281-0449-2
13. Lupenko, S.A., Lytvynenko, Ia.V., Zozulya, A.M., Nnamene K. Chizoba, & Volyanyk, O.V. (2021). Models, methods and means of ontology development of cyclic signal processing. *Journal of Hidrocarbon Power Engineering*, 8 (1), 8-17.
14. Smith, B. (2003). *Ontology: philosophical and computational*. Oxford, USA: Blackwell Publishers.
15. Gomez-Perez, A., Fernandez-Lopez, M., & Corcho, O. (2004). *Ontological engineering*. London: Springer-Verlag.
16. Guarino, N. (1998). Formal ontology and information systems. In *Proc. 1st Int. Conf. on formal ontologies in information systems*, Italy (pp. 3-15).
17. Gruber, T. (1991). The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases. In *Proc. 2nd Int. Conf.*
18. Rasmussen, J., Pejtersen, A., & Goodstein, L. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New York, USA: Wiley-Interscience.
19. Gene ontology. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://www.geneontology.org>
20. SNOMED International. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://www.snomed.org/>
21. FMAOntology. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://si.washington.edu/projects/fma>

Стаття надійшла до редакції 02.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 16.09.2024

The article was received 02.05.2024 and was accepted after revision 16.09.2024

Лупенко Сергій Анатолійович

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-0721> **e-mail:** lupenko.san@gmail.com

Волянник Олександр Вадимович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-7580> **e-mail:** wonderage2018@gmail.com