



**Дмитрієнко Катерина Анатоліївна**  
аспірант кафедри інформаційної та кібернетичної  
безпеки імені професора Володимира Бурячка  
Київський університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна  
ORCID 0000-0001-7984-7279  
[k.dmytriienko.asp@kubg.edu.ua](mailto:k.dmytriienko.asp@kubg.edu.ua)

## АДАПТАЦІЯ МОДЕЛІ КУРАМОТО ДЛЯ АНАЛІЗУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

**Анотація.** У статті запропоновано підхід до модифікації моделі Курамото, який дозволяє застосувати її для аналізу розповсюдження інформації в соціальних мережах, що, в свою чергу, надає можливість вивчати такі явища, як формування консенсусу, коли групи користувачів сходяться на спільній думці, поширення інновацій та утворення громадської думки з певного приводу. Представлено спрощений і класичний підходи до моделювання взаємодій між користувачами, де осцилятори символізують окремих учасників, а їхні частоти — поточний стан прийняття інформації. Частота може відображати початкову думку користувача, коли чим ближчі частоти двох користувачів, тим ближчі їхні початкові погляди, та схильність до зміни думки, коли чим більша амплітуда коливань, тим більш користувач схильний змінювати свою думку під впливом інших. Основними параметрами моделі при цьому є сила зв'язку (наскільки сильно один користувач впливає на іншого), частота природних коливань (початкова думка користувача), шум (випадкові фактори, які можуть впливати на думку користувача). Висвітлено переваги кожного варіанту моделі для різних сценаріїв мережевої взаємодії. Класична модель, що використовується для опису синхронізації в динамічних системах, застосовується для дослідження взаємодії між користувачами соціальних мереж. Модифікована модель враховує індивідуальні властивості користувачів, їхні темпи поширення інформації та характер взаємодії з іншими учасниками мережі. Для точнішого моделювання соціальних процесів модель Курамото може бути розширена за рахунок врахування гетерогенності користувачів, оскільки різні користувачі можуть мати різну схильність до впливу та різну кількість зв'язків, введення динамічних зв'язків, оскільки структура соціальної мережі може змінюватися з часом, та врахування неоднорідності інформації в контексті її впливу на користувачів.

**Ключові слова:** модель Курамото; розповсюдження інформації; соціальні мережі; синхронізація; гетерогенні мережі; інформаційні потоки; динамічні системи.

### ВСТУП

**Постановка проблеми.** Розповсюдження інформації в соціальних мережах є потужним інструментом, який значно впливає на різні сфери життя. Не є винятком і економіка. Поширення дезінформації, фейкових даних, маніпуляція суспільною думкою можуть здійснити негативний вплив, зокрема, на стан інвестиційно-інноваційної безпеки держави в контексті формування її негативного іміджу [8]. З розширенням впливу соціальних мереж на суспільне життя виникає необхідність у точному моделюванні та прогнозуванні поширення інформації в цих мережах. Існуючі моделі, такі як модель вірусного поширення та модель залежних поширень та інші, спрощують процеси взаємодії між користувачами та не враховують індивідуальні особливості користувачів. Це ускладнює аналіз гетерогенних мереж, де користувачі мають різні рівні впливу один на одного. Крім того, вони в ряді випадків не дозволяють здійснити оцінку



інформаційних ризиків [4]. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці моделей, які більш точно відображають складність сучасних інформаційних потоків. Важливо враховувати як індивідуальні схильності користувачів, так і неоднорідні взаємодії між ними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує кілька підходів до моделювання поширення інформації в соціальних мережах [11], які використовують, зокрема, моделі шуму та впливу, вірусного поширення та інші [1], [5], [11]. Кожна із наведених моделей має свої переваги та недоліки, але загальним недоліком більшості з них можна назвати спрощення зв'язків між користувачами. Нещодавні дослідження у галузі фізики показали, що модель Курамото може ефективно використовуватися для аналізу систем із синхронізацією. Підхід до виявлення впливових вузлів у складних соціальних мережах розглядається в [6], [7]. Методу стійкості автоматизованого розрахунку зв'язку для гетерогенної мережі присвячена робота [3]. Адаптація моделі Курамото до аналізу інформаційних потоків в соціальних мережах дозволяє враховувати складні взаємодії між користувачами, зокрема різну силу їхнього впливу один на одного.

Цей підхід дає змогу поєднати переваги як класичних моделей, так і нових концепцій, сприяючи більш точному моделюванню розповсюдження інформації.

**Метою статті** є адаптація моделі Курамото для аналізу поширення інформації в соціальних мережах, що дозволить моделювати динаміку поведінки користувачів під впливом інформаційних потоків.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Модель Курамото, розроблена японським фізиком Йосікі Курамото, є однією з найвпливовіших моделей в нелінійній динаміці. Вона служить потужним інструментом для дослідження явища синхронізації, яке спостерігається в широкому спектрі природних і штучних систем, та дозволяє зрозуміти, як взаємодіючі осцилятори, що мають різні частоти, можуть під впливом взаємодії переходити до синхронного стану. Модель описується системою диференціальних рівнянь, що описують еволюцію фаз взаємодіючих осциляторів, а кожен осцилятор характеризується своєю власною природною частотою та фазою. Взаємодія між осциляторами моделюється як синусоїдальна залежність швидкості зміни фази одного осцилятора від фаз інших осциляторів. Ця модель є універсальною, має відносно простий математичний апарат та дозволяє враховувати неоднорідності.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Модель Курамото описує взаємодію осциляторів через синхронізацію фаз. Для гетерогенних мереж, де кожна пара осциляторів може взаємодіяти з різною інтенсивністю, використовується оригінальна формула:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i). \quad (1)$$

Ця формула описує, як фаза осцилятора  $\theta_i$  змінюється в часі залежно від його природної частоти  $\omega_i$  і взаємодії з іншими осциляторами, що характеризується коефіцієнтами  $K_{ij}$  [2], [9].

Спрощена версія моделі Курамото, яка підходить для однорідних мереж (де всі осцилятори взаємодіють однаково), виглядає так:

$$\theta_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i). \quad (2)$$

У цій формулі передбачається, що всі осцилятори взаємодіють з однаковою силою через нормалізацію коефіцієнта  $K$  на кількість осциляторів  $N$  [2].

Модель Курамото, створена для опису синхронізації осциляторів у фізичних системах, набула популярності не лише у фізиці, а й у соціальних науках [10].

Зокрема, її можна адаптувати для аналізу розповсюдження інформації у соціальних мережах, де користувачі поведуться як осцилятори, а їх думки або стан прийняття інформації можуть бути представлені фазами цих осциляторів.

Модель Курамото можна адаптувати для аналізу розповсюдження інформації в інтернет-середовищі. У цьому контексті осцилятори можуть представляти індивідуальних користувачів або вузли в соціальних мережах, а фаза  $\theta_i$  — їх думки або стан прийняття певної інформації.

Класична модель Курамото:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad (3)$$

де:

- $\theta_i$  — фаза  $i$ -го осцилятора. У випадку аналізу соціальних мереж, це може бути інтерпретовано як стан прийняття інформації або думки користувача;
- $\frac{d\theta_i}{dt}$  — швидкість зміни фази. Це вказує на те, як швидко осцилятор (користувач) змінює свій стан або позицію щодо інформації;
- $\omega_i$  — природна частота осцилятора. Вона представляє внутрішню схильність кожного осцилятора (користувача) прийняти певну інформацію незалежно від інших;
- $K_{ij}$  — коефіцієнт зв'язку між осциляторами  $i$  та  $j$ . Він визначає, наскільки сильно осцилятори впливають один на одного. У контексті соціальних мереж це можна розуміти як ступінь впливу одного користувача на іншого;
- $\sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i)$  — різниця фаз між осциляторами  $i$  та  $j$ , що моделює різницю у думках або стані прийняття інформації. Синус цієї різниці визначає силу взаємодії між осциляторами.

Ця формула більш загальна і може описувати складніші динамічні системи. Вона враховує як індивідуальні характеристики кожного користувача ( $\omega_i$ ), так і змінні сили взаємодії між користувачами ( $K_{ij}$ ). Це дозволяє моделювати гетерогенні мережі, де різні користувачі можуть мати різний рівень впливу і сприйнятливості до інформації.

Адаптована формула може виглядати так:

$$I_i = \alpha_i + \frac{\beta}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), \quad (4)$$

де:

- $\theta_i$  — стан прийняття інформації  $i$ -м користувачем (аналогі фаз у моделі Курамото);
- $\alpha_i$  — індивідуальна схильність  $i$ -го користувача до прийняття нової інформації (аналог власної частоти);
- $\beta$  — коефіцієнт взаємодії між користувачами (аналог коефіцієнта зв'язку  $K$ );
- $N$  — загальна кількість користувачів;
- $\sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i)$  — сума синусів різниць станів прийняття інформації користувачами.

Ця формула описує зміну стану прийняття інформації користувачем і під впливом інших користувачів у мережі. Чим більше користувачів у мережі приймає певну інформацію (чим ближче їх стани  $I_j$  до  $I_i$ ), тим більше шансів, що користувач  $i$  також прийме цю інформацію.

Ця формула орієнтована на моделювання розповсюдження інформації з акцентом на індивідуальні схильності користувачів ( $\alpha_i$ ) та середню взаємодію ( $\frac{\beta}{N}$ ). Вона спрощує взаємодію, роблячи її однаковою для всіх користувачів, і підходить для випадків, коли необхідно оцінити середній вплив інформації в однорідній групі користувачів.

#### Джерело даних для змінних:

- $\theta_i$ : Може бути отримано через аналіз поведінки користувача (опитування, аналіз постів у соціальних мережах).
- $\omega_i$ : Оцінюється на основі індивідуальної активності користувача в мережі.
- $K_{ij}$ : Взаємодія визначається на основі структури соціальної мережі (взаємодії між користувачами, кількість підписок, коментарів тощо).

#### Порівняння двох моделей

1. **Гетерогенність проти однорідності:** Оригінальна формула дозволяє моделювати різну силу взаємодії між користувачами, що робить її більш точною для складних мереж із різними рівнями впливу. Спрощена модель припускає, що всі користувачі взаємодіють однаково.
2. **Складність розрахунків:** Оригінальна модель складніша для аналізу, особливо в великих мережах, де кожен користувач має унікальний вплив на інших. Спрощена формула значно полегшує розрахунки, оскільки всі взаємодії нормалізовані на кількість користувачів.

#### Використання в аналізі соціальних мереж

Модель Курамото знаходить все більше застосування в аналізі складних систем, зокрема соціальних мереж. За такого застосування кожен користувач соціальної мережі може розглядатися як окремих «осцилятор», який має свою власну думку або переконання. При цьому взаємодію між користувачами (лайки, коментарі, репости) можна розглядати як зв'язки між осциляторами, які впливають на їхню «фазу» (тобто думку). Відтак коли користувачі починають поділяти схожу думку, це можна інтерпретувати як синхронізацію осциляторів. При аналізі розповсюдження інформації в соціальних мережах модель дозволяє досліджувати, як думки та ідеї поширюються в середовищі, які фактори впливають на цей процес і як швидко формується консенсус, прогнозувати розвиток певних трендів тощо. При цьому модель є спрощенням реальних соціальних процесів, оскільки не враховує особливостей соціальної взаємодії (емоції, соціальний статус, особистісні особливості користувачів платформи), нелінійності соціальних процесів та зміни структури соціальних мереж. Разом з тим, вона є потужним інструментом для аналізу розповсюдження контенту.

Як класична, так і адаптована моделі можуть бути використані для дослідження процесу поширення інформації в мережах, але вибір моделі залежить від складності системи. Спрощена формула підходить для аналізу однорідних мереж, де користувачі мають подібний вплив один на одного, а оригінальна модель краще підходить для моделювання гетерогенних мереж, де взаємодії між користувачами різняться.



## ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Модель Курамото є потужним інструментом для аналізу синхронізації, і її адаптація для соціальних мереж дозволяє більш точно описати процеси розповсюдження інформації. Використання оригінальної або спрощеної версії моделі залежить від мети дослідження та складності мережі, що аналізується. Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію моделі до врахування складніших соціальних явищ, а також поєднання моделі з іншими методами та інструментами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черній, П. Д. (2017). Моделі поширення повідомлень в онлайн соціальних мережах: властивості, структура, особливості застосування. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*, 127–134.
2. Acebrón, J. A., Bonilla, L. L., Pérez Vicente, C. J., Ritort, F., & Spigler, R. (2005). The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena. *Reviews of Modern Physics*, 77(1), 137–185. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.77.137>
3. Anakhov, P., Zhebka, V., Korshun, N., Tushych, A., & Dovzhenko, T. (2021). Stability method of connectivity automated calculation for heterogeneous telecommunication network. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3188, 282–287.
4. Grechaninov, V., Hulak, H., Sokolov, V., Skladannyi, P., & Korshun, N. (2021). Formation of dependability and cyber protection model in information systems of situational center. In: *Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things*, vol. 3149, 107–117.
5. Guille, A., Hacid, H., Favre, C., & Zighed, D. A. (2013). Information diffusion in online social networks. *ACM SIGMOD Record*, 42(2), 17–28. <https://doi.org/10.1145/2503792.2503797>
6. Ishfaq, U., Khan, H. U., & Iqbal, S. (2022). Identifying the influential nodes in complex social networks using centrality-based approach. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.09.016>
7. Kumar, P., & Sinha, A. (2021). Information diffusion modeling and analysis for socially interacting networks. *Social Network Analysis and Mining*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s13278-020-00719-7>
8. Shevchuk, D., Harasymchuk, O., Partyka, A., & Korshun, N. (2023). Designing Secured Services for Authentication, Authorization, and Accounting of Users. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3550, 217–225.
9. Medvedev, G. S., & Tang, X. (2018). The Kuramoto Model on Power Law Graphs: Synchronization and Contrast States. *Journal of Nonlinear Science*, 30(5), 2405–2427. <https://doi.org/10.1007/s00332-018-9489-3>
10. Strogatz, S. H. (2000). From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 143(1–4), 1–20. [https://doi.org/10.1016/s0167-2789\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/s0167-2789(00)00094-4)
11. A survey on information diffusion in online social networks: models and methods. (2017). *Information*, 8(4), 118. <https://doi.org/10.3390/info8040118>

**Kateryna Dmytriienko**

Graduate student of the Department of Information and Cyber Security

named after Professor Volodymyr Buryachok

Borys Grinchenko Kyiv University, Kyiv, Ukraine

ORCID 0000-0001-7984-7279

[k.dmytriienko.asp@kubg.edu.ua](mailto:k.dmytriienko.asp@kubg.edu.ua)**ADAPTATION OF THE KURAMOTO MODEL FOR THE ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF INFORMATION IN SOCIAL NETWORKS**

**Abstract.** The article proposes an approach to the modification of the Kuramoto model, which allows its application to the analysis of information dissemination in social networks. A simplified and classic approach to modeling interactions between users is presented, where oscillators symbolize individual participants, and their phases represent the current state of receiving information. The advantages of each variant of the model for different scenarios of network interaction are highlighted. The classical model used to describe synchronization in dynamic systems is applied to the study of interaction between users of social networks. The modified model takes into account the individual properties of users, their rates of information dissemination and the nature of interaction with other network participants.

**Keywords:** Kuramoto model; dissemination of information; social networks; synchronization; heterogeneous networks; information flows; dynamic systems.

**REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)**

1. Chernii, P. (2017). Models of message distribution in online social networks: properties, structure, features of application. *Bulletin of Kharkiv National University named after V.N. Karazin*, 127–134.
2. Acebrón, J. A., Bonilla, L. L., Pérez Vicente, C. J., Ritort, F., & Spigler, R. (2005). The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena. *Reviews of Modern Physics*, 77(1), 137–185. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.77.137>
3. Anakhov, P., Zhebka, V., Korshun, N., Tushych, A., & Dovzhenko, T. (2021). Stability method of connectivity automated calculation for heterogeneous telecommunication network. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3188, 282–287.
4. Grechaninov, V., Hulak, H., Sokolov, V., Skladannyi, P., & Korshun, N. (2021). Formation of dependability and cyber protection model in information systems of situational center. In: *Emerging Technology Trends on the Smart Industry and the Internet of Things*, vol. 3149, 107–117.
5. Guille, A., Hacid, H., Favre, C., & Zighed, D. A. (2013). Information diffusion in online social networks. *ACM SIGMOD Record*, 42(2), 17–28. <https://doi.org/10.1145/2503792.2503797>
6. Ishfaq, U., Khan, H. U., & Iqbal, S. (2022). Identifying the influential nodes in complex social networks using centrality-based approach. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.09.016>
7. Kumar, P., & Sinha, A. (2021). Information diffusion modeling and analysis for socially interacting networks. *Social Network Analysis and Mining*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s13278-020-00719-7>
8. Shevchuk, D., Harasymchuk, O., Partyka, A., & Korshun, N. (2023). Designing Secured Services for Authentication, Authorization, and Accounting of Users. In: *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3550, 217–225.
9. Medvedev, G. S., & Tang, X. (2018). The Kuramoto Model on Power Law Graphs: Synchronization and Contrast States. *Journal of Nonlinear Science*, 30(5), 2405–2427. <https://doi.org/10.1007/s00332-018-9489-3>
10. Strogatz, S. H. (2000). From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 143(1–4), 1–20. [https://doi.org/10.1016/s0167-2789\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/s0167-2789(00)00094-4)
11. A survey on information diffusion in online social networks: models and methods. (2017). *Information*, 8(4), 118. <https://doi.org/10.3390/info8040118>



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.