

Дмитрієнко Катерина Анатоліївна

Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ

ORCID 0000-0001-7984-7279

ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ КУРАМОТО ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. У статті розглядається вдосконалення моделі Курамото для аналізу поширення інформації в соціальних мережах шляхом інтеграції нових параметрів та модифікацій. У статті розроблено кілька покращених версій моделі Курамото.

По-перше, інтеграція принципів каскадної моделі дозволила врахувати ймовірність передачі інформації між користувачами. Це забезпечує точніше відображення реальних процесів та дозволяє прогнозувати вірусний характер контенту й пікові моменти його поширення. Застосування такого підходу є ефективним для оптимізації маркетингових кампаній.

По-друге, адаптація моделі Курамото за допомогою епідемічної моделі забезпечила можливість моделювання динаміки інформаційного поширення з урахуванням переходу користувачів між різними станами. Це дало змогу моделювати повторні хвилі популярності і затухання інформації та планувати довгострокові інформаційні кампанії.

Третє вдосконалення базується на моделі поширення чуток, яка враховує соціальні зв'язки та рівень довіри користувачів. Такий підхід дозволяє точніше прогнозувати інформаційні потоки, що є корисним для прогнозування вірусного контенту та боротьби з дезінформацією.

Четверте вдосконалення полягає у врахуванні впливу ключових вузлів мережі через інтеграцію моделі впливових користувачів. Це дозволяє моделювати вплив лідерів думок, підвищуючи точність прогнозування поширення інформації.

Проведені порівняльні дослідження між базовою та вдосконаленими моделями демонструють значну перевагу останніх у досягненні синхронізації між вузлами мережі, що особливо важливо для швидкого поширення інформації у великих мережах. Графіки, представлені у статті, наочно ілюструють ефективність модифікацій.

Подальші дослідження пропонують розширення моделі Курамото з урахуванням соціальних та емоційних факторів, динамічних змін зв'язків і верифікацію результатів на реальних даних..

Таким чином, стаття пропонує новий погляд на моделювання соціальних процесів, доводячи універсальність та ефективність моделі Курамото для аналізу поширення інформації у складних мережах.

Ключові слова: модель Курамото, синхронізація, поширення інформації, каскадна модель, епідемічна модель, модель поширення чуток, модель впливових користувачів.

Kateryna Dmytriienko

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv

ORCID 0000-0001-7984-7279

ENHANCING THE KURAMOTO MODEL FOR MODELING INFORMATION DISSEMINATION IN SOCIAL NETWORKS

Abstract: The article explores enhancements to the Kuramoto model for analyzing information dissemination in social networks by integrating additional parameters and modifications. Originally designed for studying synchronization in physical and biological systems, the Kuramoto model has proven its effectiveness in social sciences, particularly for modeling collective user behavior in social networks.

The paper introduces several improved versions of the Kuramoto model. First, integrating principles from the cascade model enables the consideration of the probability of information transfer between users, significantly increasing the accuracy of representing real processes. This enhancement allows for forecasting peak moments of content dissemination and its viral potential, which is particularly beneficial for optimizing marketing campaigns.

Second, adapting the Kuramoto model using the epidemic model facilitates modeling the dynamics of information spread, accounting for users transitioning between states: susceptible, infected, and recovered. This allows for the modeling of recurring waves of information popularity, analyzing its decline, and planning long-term information campaigns.

The third improvement is based on the application of the rumor spreading model, which accounts for changes in user behavior influenced by social connections and trust levels. This modification provides more accurate modeling of information flows in social networks, aiding in forecasting viral content and combating misinformation.

The fourth enhancement involves accounting for the impact of key network nodes through the integration of the influential user model. This approach enables modeling the effect of opinion leaders on system synchronization, improving the prediction of content dissemination and the efficiency of information campaigns in social networks.

Comparative studies between the baseline and enhanced models demonstrate the significant advantage of the latter in achieving synchronization among network nodes, which is particularly critical for the rapid dissemination of information in large networks. Graphs presented in the article visually illustrate the effectiveness of these modifications.

Future research proposes expanding the Kuramoto model by incorporating factors such as emotions, social status, and dynamic changes in connections. An important task is verifying the results on large datasets from social networks and optimizing computational algorithms for the model's application in large-scale networks. These developments open prospects for creating effective tools for forecasting viral content, managing information flows, and combating misinformation.

Thus, the article offers a new perspective on modeling social processes, demonstrating the universality and effectiveness of the Kuramoto model for analyzing information dissemination in complex networks.

Keywords: Kuramoto model, synchronization, information dissemination, cascade model, epidemic model, rumor spreading model, influential user model.

1. Вступ.

Модель Курамото, спочатку розроблена для опису синхронізації в фізичних системах, знайшла широке застосування в різних науках. У соціальних науках її використовують для аналізу колективної поведінки та поширення інформації в соціальних мережах, що дозволяє моделювати динамічну взаємодію між користувачами. У біології вона допомагає досліджувати синхронізацію нейронів і циркадні ритми. В економіці модель застосовується для аналізу колективної динаміки ринків. В інженерії та мережевих науках вона використовується для дослідження електромереж і складних систем, що вимагають синхронізації. Її популярність зумовлена математичною строгою основою та здатністю описувати складні процеси взаємодії між індивідами.

Існує два основних варіанти моделі Курамото:

Повна модель Курамото, дозволяє враховувати різноманітність індивідуальних характеристик, неоднорідність зв'язків між людьми та зміну цих зв'язків з часом. Це робить її більш реалістичною, але також значно ускладнює математичний апарат і вимагає більших обчислювальних ресурсів.

Спрощена модель Курамото пропонує спрощений погляд на реальність, припускаючи, що всі індивіди в системі однакові за своїми властивостями та взаємодіють за простими правилами. Це дозволяє отримати загальне уявлення про процеси синхронізації та поширення інформації, але не враховує багатьох нюансів реального світу. Наприклад, вона не враховує, що люди можуть мати різні рівні довіри до інформації або що їхні соціальні зв'язки можуть змінюватися з часом.[1-3]

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Незважаючи на ці відмінності, обидва варіанти моделі Курамото мають свої переваги та недоліки. До переваг можна віднести математичну строгість що забезпечує точність розрахунків та аналізу, яка дозволяє краще зрозуміти динаміку системи. Універсальність моделі робить її придатною для застосування не лише в соціальних мережах, але й у різних типах мереж, як-от

біологічні чи інженерні. [4] Вона дозволяє виявляти патерни, такі як утворення кластерів або фазові переходи, що є цінним для дослідження колективної поведінки. Модель також може бути використана для прогнозування майбутніх змін у системі.

До недоліків можна віднести спрощення реальних процесів, що може призвести до невідповідності між моделлю та реальними соціальними взаємодіями. Крім того, для правильної роботи моделі потрібне точне калібрування параметрів, що може бути досить складним завданням. Модель також не враховує всі соціальні фактори, такі як емоції, довіра та соціальний статус, що може обмежити її застосування у складних соціальних системах. Основною проблемою є необхідність адаптації моделі Курамото до специфіки сучасних соціальних мереж, де взаємодії між користувачами значно складніші через різноманіття топологій, динамічність зв'язків та вплив ключових вузлів. Існуючі підходи не повністю враховують ці особливості, що обмежує їхню ефективність у моделюванні поширення інформації. Це створює потребу у вдосконаленні моделі шляхом інтеграції нових параметрів і врахування структурних особливостей реальних мереж для підвищення її точності та практичної застосовності.

Перспективними напрямками розвитку моделі Курамото є розширення її можливостей шляхом введення додаткових параметрів, комбінування з іншими математичними моделями та верифікація її результатів на реальних даних. Це дозволить створювати більш точні та детальні моделі поширення інформації в соціальних мережах.

У статті [5] досліджено адаптацію моделі Курамото для роботи з різними типами графів, такими як Erdos Renyl graphs, Small-world networks, Scale-free graphs та Regular lattices. Основна увага приділяється визначенню критичних значень коефіцієнта зв'язку K , за яких система переходить до синхронізованого стану.

Базова формула моделі Курамото, адаптована для графів, описується так:

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

де θ_i — фаза кожного агента, ω_i — його природна частота, A_{ij} — елемент матриці суміжності, який визначає наявність зв'язку між вузлами i і j ($A_{ij}=1$, якщо вузли з'єднані, і $A_{ij}=0$ інакше), K — коефіцієнт зв'язку, N — кількість вузлів у графі, $\sin(\theta_j - \theta_i)$ — синус різниці фаз користувачів i та j , що відображає характер впливу користувача j на фазу користувача i .

Дослідження в статті показало, що значення K , необхідне для синхронізації, суттєво залежить від структури мережі. Erdos Renyl graphs, які є випадковими графами, потребують відносно високих значень K через слабку кластеризацію. Small-world networks, завдяки високій кластеризації та коротким середнім шляхам між вузлами, досягають синхронізації при нижчих значеннях K . Scale-free graphs, у яких розподіл зв'язків між вузлами описується степеневим законом, демонструють помірні значення K для досягнення синхронізації, але при цьому залежать від вузлів-хабів, які відіграють ключову роль у поширенні синхронізації. Regular lattices, через свою структурованість та однакову кількість сусідів для кожного вузла, характеризуються швидкою синхронізацією при низьких значеннях K .

Проведені експерименти підтвердили, що мережі з високою кластеризацією та центральними хабами, як у Small-world networks та Scale-free graphs, є більш схильними до синхронізації навіть при низьких значеннях K . [5] Ці результати важливі для подальшого дослідження, оскільки за основу було взято Scale-free graphs. Використання такої структури дозволяє моделювати поширення інформації в соціальних мережах, де впливові користувачі (хаби) сприяють швидкій передачі інформації та синхронізації системи.

3. Метою і задачами дослідження є вдосконалення моделі Курамото для аналізу процесів поширення інформації в соціальних мережах через інтеграцію додаткових параметрів та адаптацію до реальних структур мереж. Це дозволяє підвищити точність моделювання синхронізації у соціальних системах, прогнозувати динаміку інформаційних потоків та розробляти практичні рекомендації для оптимізації маркетингових стратегій, управління інформацією та боротьби з дезінформацією.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізовано існуючі моделі поширення інформації в соціальних мережах, визначено їх переваги та недоліки;
- адаптовано модель Курамото для аналізу процесів поширення інформації через інтеграцію принципів каскадної, епідемічної моделей, моделі поширення чуток та моделі впливових користувачів
- розроблено програми для візуалізації і демонстрації роботи базових та модифікованих моделей;
- проведено порівняльний аналіз ефективності базової та модифікованої моделей.

4. Результати дослідження.

У контексті моделі Курамото, Scale-free graphs (масштабно-інваріантні графи) дозволяють детальніше дослідити, як хаби синхронізуються з іншими вузлами мережі та як вони впливають на поширення інформації. Саме ці властивості масштабно-інваріантних графів роблять їх ідеальним середовищем для чисельних експериментів, спрямованих на покращення моделі Курамото для аналізу інформаційних процесів у соціальних мережах.

Подальша робота з модифікацією моделі Курамото спрямована на оптимізацію її роботи у таких мережах шляхом врахування додаткових факторів, що впливають на поширення інформації. Це забезпечить більш точний аналіз процесів синхронізації та адаптацію моделі до різних практичних застосувань. Покращені моделі будуть представлені за допомогою графіків, які наглядно ілюструватимуть переваги модифікацій. Усі моделі для коректного порівняння використовуватимуть однакові початкові дані, що забезпечить об'єктивність і надійність результатів аналізу.

Для покращення моделі Курамото було взято такі моделі розповсюдження інформації, як каскадна, епідемічна, поширення чуток та впливових користувачів.

4.1. Покращення моделі Курамото за допомогою каскадної моделі (Independent Cascade Model)

Моделювання Курамото є ефективним інструментом для аналізу синхронізації в різних системах, включно із соціальними мережами. Однак її класична версія не враховує ймовірності передачі інформації між користувачами, що є критичним аспектом для моделювання процесів поширення даних у реальних умовах. Для підвищення адаптивності моделі Курамото до специфіки соціальних мереж пропонується інтеграція елементів каскадної моделі.

Каскадна модель широко використовується для моделювання процесів поширення інформації. У її основі лежить припущення, що кожен користувач, який отримав інформацію, має певну ймовірність передати її своїм сусідам. [6] Однак цей підхід зазвичай не враховує динамічну синхронізацію між користувачами, яка є ключовою для прогнозування масових явищ, таких як вірусні тренди чи флешмоби.

Для вирішення цієї проблеми пропонується модифікувати модель Курамото, інтегруючи до неї компонент, що враховує ймовірнісну передачу інформації між користувачами. Такий підхід дозволяє не лише врахувати ймовірність поширення, а й моделювати синхронізацію реакцій користувачів на отриману інформацію. У результаті, модель Курамото зберігає динамічну взаємодію в мережі, водночас стаючи більш точною у відображенні реальних процесів поширення інформації в соціальних мережах.

Нова формула:

$$\theta_i = \omega_i + \frac{K}{d_i} \sum_{j \in N(i)} a_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (2)$$

де θ_i — фаза користувача i (його готовність поділитись інформацією), ω_i — індивідуальна схильність користувача i ділитись контентом, K — коефіцієнт зв'язку (вплив сусідів), d_i — кількість зв'язків користувача i , a_{ij} — елемент матриці ваги, що визначає силу зв'язку між користувачами i та j , $N(i)$ — множина сусідів вузла i .

Переваги:

1. Одночасна реакція користувачів: Модель дозволяє більш точно моделювати одночасну активність користувачів.

2. Прогнозування пікових моментів: Додаючи елементи каскадної моделі до Курамото, можна прогнозувати моменти, коли контент стає вірусним, та оцінювати швидкість поширення.

3. Динамічна взаємодія: Врахування синхронізації між користувачами дозволяє отримати більш точні прогнози щодо поведінки в соціальних мережах.

Одним із прикладів використання покращеної моделі є маркетингова кампанія може використовувати цю модель для оптимізації часу запуску, прогножуючи максимальну активність користувачів.

Одним із варіантів порівняння основної моделі та її покращеного варіанту є наочний аналіз графіків, що відображають динаміку моделей та параметр синхронізації r . На наступних графіках подано результати обчислень для обох моделей із використанням однакових початкових параметрів, таких як кількість вузлів, природні частоти та топологія мережі. Це забезпечує коректність порівняння, оскільки дозволяє спостерігати вплив саме внесених модифікацій на динаміку поширення інформації та рівень синхронізації. Цей параметр слугує ключовим показником узгодженості реакцій користувачів у мережі, дозволяючи оцінити, наскільки ефективно інформація поширюється та як швидко система досягає синхронізованого стану. [7-8]

Вирахування параметри синхронізації здійснюється за такою формулою:

$$r = \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j} \right| \quad (3)$$

Опис елементів формули:

r — параметр порядку синхронізації, який використовується для оцінки узгодженості реакцій користувачів мережі.

- $r=0$: реакції користувачів хаотичні та неузгоджені.
- $r=1$: реакції користувачів повністю синхронізовані (усі реагують однаково).

N — загальна кількість користувачів (вузлів) у мережі.

θ_j — фаза j -го користувача, яка відображає стан його реакції на інформацію (наприклад, час або інтенсивність реагування).

$e^{i\theta_j}$ — комплексне число, що представляє фазу реакції j -го користувача на одиничному колі.

• Вектор у комплексній площині показує, як реагує користувач: $\cos(\theta_j)$ визначає узгодженість реакції, а $\sin(\theta_j)$ враховує динамічність реакції.

$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j}$ — середнє значення реакцій усіх користувачів, представлене у вигляді комплексного вектора. Довжина цього вектора визначає рівень узгодженості реакцій у мережі.

$|\cdot|$ — модуль середнього значення комплексного числа, що вказує на рівень загальної синхронізації в мережі.

З представлених графіків (Рис. 1) видно, що базова модель Курамото (сірі лінії) демонструє поступове збільшення фаз вузлів мережі з часом. Однак розкид між фазами залишається значним, що свідчить про слабку синхронізацію. Покращена модель Курамото (чорні лінії) показує більш згуртовану динаміку фаз завдяки врахуванню додаткових факторів, таких як вплив ключових вузлів графа. Фази вузлів мережі швидше зближуються, що вказує на зростання рівня синхронізації. Це дозволяє зробити висновок, що покращена модель забезпечує вищий рівень координації між вузлами мережі у порівнянні з базовою моделлю.

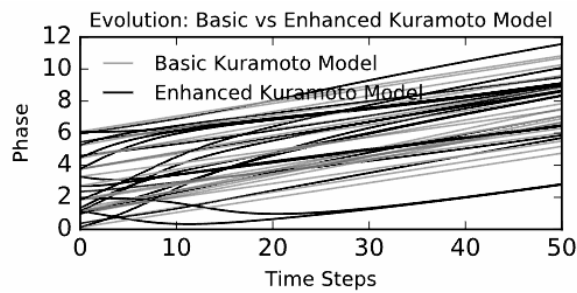


Рис 1. Графік порівняння базової та покращеної моделей Курамото із застосуванням каскадної моделі

А на графіку синхронізації (Рис. 2) видно що базова модель (сіра лінія) має параметр r , що характеризує рівень синхронізації, залишається стабільним або дещо знижується, відображаючи обмежену здатність системи до самоорганізації. А покращена модель (чорна лінія) показує значно вищий рівень r протягом усього часу моделювання. Це підтверджує ефективність врахування топологічних особливостей графів і динамічних зв'язків між вузлами.

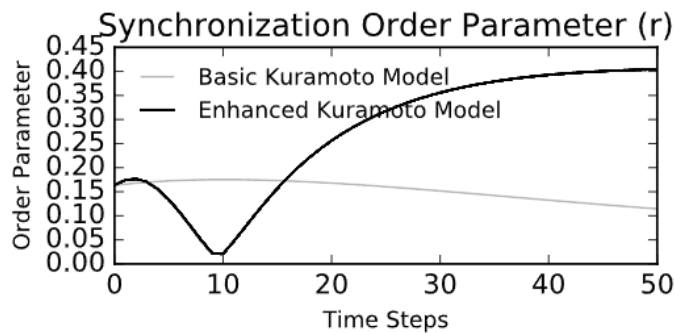


Рис 2. Графік порівняння параметру синхронізації базової та покращеної моделей Курамото із застосуванням каскадної моделі

Отже, покращена модель демонструє стабільну та більш високу синхронізацію, що робить її придатнішою для моделювання поширення інформації в складних мережах.

4.2. Покращення моделі Курамото із застосуванням епідемічної моделі (SIR Model)

Модель Курамото може бути вдосконалена шляхом включення принципів епідемічної моделі SIR (Susceptible-Infected-Recovered). Це дозволяє врахувати поширення впливу в системах, де процес поширення схожий на розповсюдження інфекцій. У традиційній моделі SIR користувачі можуть бути в одному з трьох станів: вразливі (S), інфіковані (I), або відновлені (R).[9]-[10] Додавши ці принципи до моделі Курамото, ми отримуємо більш точне уявлення про динаміку поширення інформації.

Нова формула:

$$\theta_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) + \gamma(I_i - R_i), \quad (4)$$

де θ_i — фаза користувача i (відображає рівень його активності щодо поширення інформації), ω_i — природна частота користувача i , K — коефіцієнт зв'язку, що визначає взаємний вплив між користувачами, A_{ij} — елемент матриці ваги, що визначає силу зв'язку між користувачами i і j , N — множина сусідів користувача i , γ — коефіцієнт впливу соціальних мереж, I_i — інфіковані користувачі (користувачі, які активно поширюють інформацію), R_i — відновлені користувачі (користувачі, які втратили інтерес або перестали поширювати інформацію).

Переваги:

1. Моделювання повторних хвиль: Врахування динаміки переходу між станами (від інфікованих до відновлених) дозволяє краще моделювати ситуації, коли інформація повторно набуває популярності.

2. Прогнозування повторних кампаній: Цей підхід дозволяє передбачити час, коли користувачі знову активізуються для поширення інформації.

3. Оптимізація стратегії поширення: Підвищення точності прогнозів, що дозволяє краще планувати маркетингові стратегії та інформаційні кампанії.

Прикладом використання є аналіз хвиль вірусного маркетингу, таких як рекламні кампанії на кіберпонеділок або чорну п'ятницю, коли інформація часто повторно поширюється з високою швидкістю і знову привертає увагу до продуктів або послуг.

На графіку (Рис. 3) подано результати порівняння базової та покращеної моделей Курамото в контексті поширення фаз. Базова модель Курамото (сірі лінії) показує стабільне зростання фаз вузлів мережі із часом, що відображає їхню індивідуальну еволюцію без суттєвого врахування додаткових факторів. А покращена модель Курамото (чорні лінії) демонструє більш інтенсивну зміну фаз завдяки додатковим параметрам, зокрема впливу інтенсивності станів I та R , що є характерним для модифікованих підходів. Це свідчить про підвищений рівень взаємодії між вузлами в моделі та кращу реакцію системи на зміну умов..

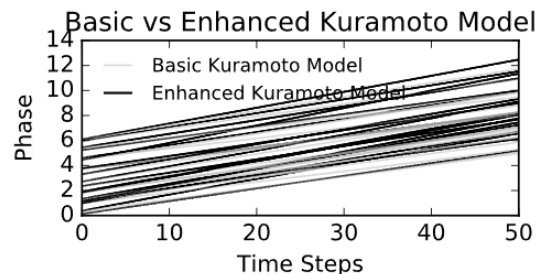


Рис 3. Графік порівняння базової та покращеної моделей Курамото із застосуванням епідемічної моделі

Аналіз динаміки фаз дозволяє зробити висновок, що покращена модель враховує більше взаємодій і зовнішніх впливів, завдяки чому фази вузлів мережі швидше узгоджуються. Це є свідченням того, що модель краще адаптована для опису процесів, які передбачають активну взаємодію вузлів.

На рис. 4 представлено порівняння моделей за параметром синхронізації. У базовій моделі (сіра лінія) рівень синхронізації зменшується з часом, що вказує на слабе узгодження фаз вузлів. Натомість покращена модель (чорна лінія) демонструє значно стабільніший та вищий рівень синхронізації, причому з часом він навіть дещо зростає. Це свідчить про здатність покращеної моделі ефективно враховувати динамічні властивості системи, зокрема, вплив структури мережі та активності її окремих компонентів.

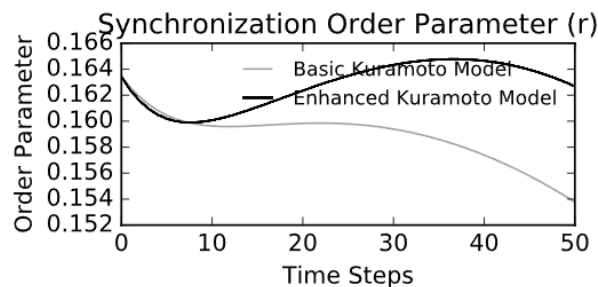


Рис 4. Графік порівняння параметру синхронізації базової та покращеної моделей Курамото із застосуванням епідемічної моделі

Таким чином, можна зробити кілька важливих висновків. По-перше, покращена модель Курамото демонструє значно вищу ефективність у досягненні синхронізації між вузлами мережі. Це важливо для аналізу соціальних процесів, таких як поширення інформації, коли потрібне швидке й узгоджене реагування на нові дані. По-друге, врахування додаткових параметрів дозволяє краще описувати взаємодію в складних мережах, зокрема в умовах реальних соціальних систем. І, по-третє, такі результати показують потенціал покращеної моделі для використання в практичних задачах, зокрема, в прогнозуванні вірусного контенту або управлінні інформаційними потоками в мережах.

4.3. Покращення моделі Курамото за допомогою моделі поширення чуток (Rumor Spreading Model)

Класичні моделі поширення чуток припускають, що користувач або поширює інформацію, або ні, без урахування інтенсивності та частоти їх взаємодії. [10] Однак, модель Курамото може бути адаптована для врахування змін в активності користувачів протягом часу, що дозволяє моделювати більш складні динамічні процеси. Включення фазової синхронізації в модифіковану модель дозволяє моделювати динамічні зміни в активації користувачів і рівні довіри до чуток, що є ключовими факторами для прогнозування і затухання інформаційних потоків.

Модифікована формула має вигляд:

$$\theta_i = \omega_i + K \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) + \beta_i (\theta_i - \theta_0), \quad (5)$$

де θ_i — фаза користувача (готовність користувача поширювати чутки), ω_i — індивідуальна схильність користувача до поширення інформації, K — коефіцієнт зв'язку, що визначає вплив сусідів, A_{ij} — елемент матриці ваги (вага зв'язку між користувачами i і j), N — множина сусідів користувача i , β_i — коефіцієнт опору, що описує схильність користувача не поширювати чутки, θ_0 — початкова фаза, що відповідає рівню довіри користувача до чуток.

Переваги модифікації:

1. Точніше моделювання поширення чуток: Враховує фактори, які впливають на зміну поведінки користувачів в залежності від їхніх зв'язків і активності.
2. Зниження дезінформації: Допомогає прогнозувати, коли і як чутки можуть затухати, що є важливим для боротьби з фейковими новинами та контролем інформаційних потоків на платформах.

Приклад використання: Модифікація може бути корисною для аналізу та прогнозування поширення політичних чуток або дезінформації на платформах типу Twitter.

На рис. 5 представлено порівняння динаміки фаз вузлів у базовій та покращеній моделях Курамото. Базова модель Курамото (сіра лінія) демонструє рівномірну еволюцію фаз вузлів, де взаємодія між користувачами поступово призводить до синхронізації. Ця модель характеризується повільним впливом зв'язків між сусідніми вузлами. Натомість покращена модель Курамото (чорна лінія) демонструє активніші зміни фаз і більш виражений розкид у часі. Це є наслідком врахування динамічної поведінки користувачів і їхньої схильності синхронізуватися під впливом поширення чуток.

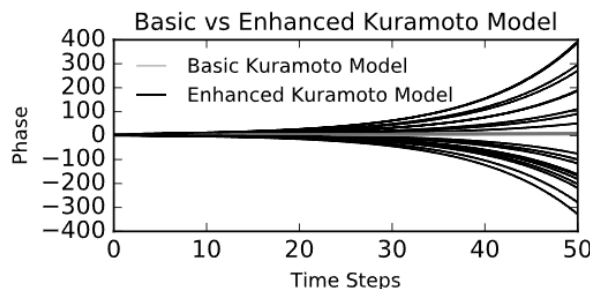


Рис 5. Графік порівняння базової та покращеної моделей Курамото за допомогою моделі поширення чуток

З наведених результатів можна зробити висновок, що покращена модель враховує складнішу взаємодію між вузлами мережі, що забезпечує більш динамічний розподіл фаз і, відповідно, швидшу реакцію системи на нові сигнали.

На графіку (Рис. 6) видно, як базова модель Курамото (сіра лінія) показує майже постійне значення параметра синхронізації, що відображає стабільність, але низький рівень координації між користувачами. А натомість покращена модель Курамото (чорна лінія) демонструє, що параметр синхронізації має значні коливання, які свідчать про зміну рівня синхронізації через активне поширення чуток. Це означає, що користувачі періодично досягають високого рівня взаємодії

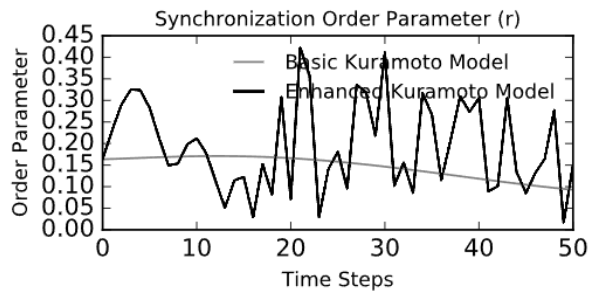


Рис 6. Графік порівняння параметру синхронізації базової та покращеної моделей за допомогою моделі поширення чуток

Отже, можна зробити висновок, що покращена модель забезпечує адаптивнішу поведінку вузлів, краще моделюючи вплив поширення чуток у соціальних мережах. Це дає змогу прогнозувати пікові моменти активності користувачів, що є важливим для аналізу реальних соціальних процесів, таких як поширення новин або вірусного контенту. Застосування покращеної моделі може бути корисним для підвищення ефективності маркетингових стратегій або управління інформаційними потоками.

4.4. Покращення Моделі Курамото із застосуванням моделі впливових користувачів (Influential Spreaders Model)

Модель Курамото, яка традиційно використовується для моделювання синхронізації в динамічних системах, може бути вдосконалена шляхом інтеграції ідей з моделі впливових користувачів. Ця інтеграція додає до базової моделі Курамото можливість враховувати центральність користувачів у мережі, визначаючи, хто саме має найвищий потенціал для поширення інформації.[11] Завдяки цьому покращена модель здатна одночасно враховувати динамічну поведінку користувачів та їхній соціальний вплив.

$$\theta_i = \omega_i + K \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) + \delta * C_i, \quad (6)$$

де θ_i — фаза користувача i , що описує його стан готовності поширювати інформацію, ω_i — природна частота користувача i , що відповідає його індивідуальній активності, K — коефіцієнт взаємодії між користувачами, A_{ij} — елемент матриці зв'язків, що описує наявність зв'язку між користувачами i та j , C_i — центральність користувача i , яка визначає його роль у мережі як впливового вузла, δ — параметр, що контролює, наскільки сильно центральність впливає на синхронізацію.

Переваги модифікації:

1. Інтеграція впливу лідерів думок: Покращена модель враховує вплив ключових користувачів з високою центральністю, що дозволяє точніше моделювати процеси поширення інформації в мережі.

2. Підвищення точності: Завдяки врахуванню фазової синхронізації та центральності, модель здатна краще прогнозувати пікову активність користувачів.

3. Адаптивність до змін: Динамічний підхід дозволяє враховувати зміни в активності користувачів у реальному часі.

Приклад використання: Ця адаптована модель може бути застосована для прогнозування ефективності поширення контенту під час інформаційних кампаній у соціальних мережах, таких як Twitter чи Instagram. Наприклад, вона дозволяє визначити оптимальні точки запуску кампанії для досягнення максимальної аудиторії за мінімальний час.

На рис. 7 бачимо:

- Базова модель Курамото (сірі лінії): Показує рівномірне та поступове зростання фаз вузлів. Така динаміка відображає традиційний підхід, у якому не враховується вплив окремих ключових користувачів, що мають велику центральність у мережі.
- Покращена модель Курамото (чорні лінії): Зміна фаз відбувається значно швидше, а вузли демонструють більш чітке групування. Це є наслідком врахування впливу користувачів із високою центральністю, які активно сприяють поширенню інформації у системі.

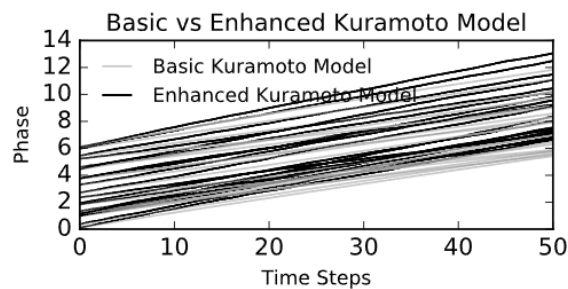


Рис 7. Графік порівняння базової та покращеної моделей Курамото із застосуванням моделі впливових користувачів

З отриманих даних можна зробити висновок, що покращена модель ефективніше враховує роль впливових вузлів, забезпечуючи швидший і більш організований розвиток фаз у системі

На рис. 8 подано порівняння моделей за параметром синхронізації:

- Базова модель Курамото (сіра лінія): Синхронізація відбувається повільно, з незначним і стабільним підвищенням параметра r у часі. Це свідчить про слабку взаємодію між вузлами та обмеженість у моделюванні впливу ключових користувачів.
- Покращена модель Курамото (чорна лінія): Параметр синхронізації зростає значно швидше, досягаючи високого рівня за відносно короткий проміжок часу. Це свідчить про те, що вплив ключових вузлів значно покращує координацію та взаємодію в мережі.

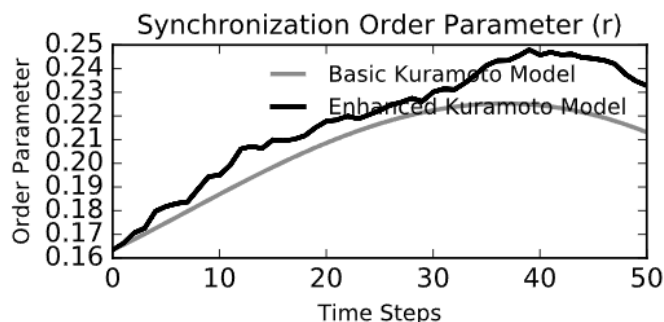


Рис 8. Графік порівняння параметру синхронізації базової та покращеної моделей із застосуванням моделі впливових користувачів

Висновок: Покращена модель демонструє значну перевагу у моделюванні процесів синхронізації в соціальних мережах. Вона ефективніше враховує вплив ключових користувачів, що дозволяє швидше досягати високого рівня координації та активніше поширювати

інформацію. Такий підхід є важливим для аналізу поширення контенту, прогнозування вірусної активності та розробки маркетингових стратегій у соціальних мережах.

5. Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті було розроблено покращені моделі Курамото з урахуванням параметрів, запозичених із каскадної моделі, епідемічної моделі, моделі поширення чуток та моделі впливових користувачів. Основою для модифікацій стала адаптація моделі Курамото до графових структур, зокрема масштабно-інваріантних графів, що забезпечило можливість врахування реальної структури соціальних мереж. Для наочного підтвердження покращень було представлено порівняльні графіки базової та модифікованої моделей, а також графіки синхронізації, які демонструють переваги нових підходів.

Результати дослідження показали, що інтеграція каскадної моделі до моделі Курамото дозволяє враховувати ймовірність передачі інформації між користувачами, що підвищує точність відображення реальних процесів поширення інформації. Завдяки цьому вдосконаленню можна прогнозувати пікові моменти поширення контенту, визначати швидкість його поширення та враховувати динамічну взаємодію користувачів у мережі. Практичне застосування такої моделі охоплює маркетингові стратегії, орієнтовані на максимальну ефективність у соціальних мережах.

Додавання до моделі Курамото принципів епідемічної моделі SIR забезпечило врахування станів користувачів (вразливих, інфікованих, відновлених), що дозволяє моделювати не лише процеси поширення інформації, але й повторні хвилі її популярності. Цей підхід дозволяє краще планувати інформаційні кампанії, передбачати моменти активізації користувачів і аналізувати стратегії впливу у мережах під час пікових періодів, таких як акційні розпродажі.

Включення до моделі Курамото принципів поширення чуток дозволило врахувати динамічні зміни у готовності користувачів поширювати інформацію, їхній рівень довіри до джерел та активність протягом часу. Це вдосконалення забезпечує точніше прогнозування поширення інформації та виявлення моментів, коли інформаційні потоки згасають. Таку модель можна використовувати для боротьби з дезінформацією, аналізу політичних чуток або управління кризовими ситуаціями в інформаційному просторі.

Інтеграція ідей моделі впливових користувачів до моделі Курамото надала можливість враховувати роль ключових вузлів у мережі — лідерів думок. Ця адаптація дозволила покращити точність прогнозування пікової активності користувачів, моделювати поширення інформації через найвпливовіші вузли та планувати інформаційні кампанії з урахуванням їхнього соціального впливу. Модифікація є корисною для аналізу стратегій, спрямованих на максимальне охоплення аудиторії в короткі строки.

Також було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє тестувати модифіковані моделі Курамото, а також порівнювати їх із базовими варіантами за допомогою графічної візуалізації результатів. Реалізовані алгоритми інтегрують принципи каскадної моделі, епідемічної SIR-моделі, моделі поширення чуток та впливових користувачів. Програми підтримують введення параметрів реальних графових структур, таких як масштабно-інваріантні мережі, що забезпечує адаптацію моделі до специфічних соціальних мереж. Завдяки цьому було досягнуто точності у прогнозуванні інформаційних потоків та їх динаміки.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє проводити моделювання та аналіз різних сценаріїв поширення інформації, включаючи симуляцію пікових моментів, розрахунок рівня синхронізації користувачів та визначення ролі ключових вузлів. Це відкриває широкі можливості для оптимізації стратегій маркетингу, управління кризовими ситуаціями та протидії дезінформації.

Подальші перспективи досліджень включають розширення моделі Курамото за рахунок інтеграції додаткових параметрів, які враховують соціальні чинники, такі як довіра, емоції або соціальний статус користувачів. Особливу увагу слід приділити верифікації отриманих результатів на великих наборах реальних даних із соціальних мереж, що дозволить адаптувати

модель до різноманітних практичних сценаріїв. Крім того, перспективним є поєднання моделі Курамото з іншими підходами, такими як економічні, біологічні чи психологічні моделі, для аналізу складних систем.

Також доцільно оптимізувати обчислювальну ефективність моделі, що сприятиме її застосуванню у великих мережах. Це дозволить створювати інструменти для прогнозування поширення інформації в реальному часі, а також розробляти практичні рекомендації для маркетингових кампаній, управління інформаційними потоками і боротьби з дезінформацією. Усе це сприятиме подальшому розвитку моделі Курамото як універсального інструменту для аналізу соціальних процесів.

Список використаних джерел

1. Fujiwara N., Kurths J., Díaz-Guilera A. Synchronization in networks of mobile oscillators. *Physical review E*. 2011. Vol. 83, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.83.025101>.
2. Acebron J., Bonilla L., Perez Vicente C., Ritort F. and Spigler R. The Kuramoto model: a simple paradigm for synchronization phenomena *Reviews of modern physics*. 2005. Vol. 77, no. 1. P. 137–185. URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.77.137>
3. Дмитрієнко, К. Адаптація моделі Курамото для аналізу розповсюдження інформації в соціальних мережах. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка 2023, 1*, 309-314.. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.309314>
4. Strogatz, S. Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering. *CRC Press LLC*, 2024
5. Chiba H., Medvedev G. S., Mizuhara M. S. Bifurcations in the Kuramoto model on graphs. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*. 2018. Vol. 28, no. 7. P. 073109. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5039609>.
6. Yang, Y., Lu, Z., Li, V. O. K., & Xu, K. Noncooperative information diffusion in online social networks under the independent cascade model. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2017, 2017. Vol. 4, no. 3. P. 150–162. <https://doi.org/10.1109/tcss.2017.2719056>
7. Rodrigues, F. A., Peron, T. K. D., Ji, P., & Kurths, J. The Kuramoto model in complex networks. *Physics Reports*, 2017, Vol 610, P. 1–98. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.10.008>.
8. Phillips E. T. The synchronizing role of multiplexing noise: Exploring Kuramoto oscillators and breathing chimeras. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*. 2023. Vol. 33, no. 7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0135528>.
9. Ulichev O. S. Дослідження моделей розповсюдження інформації та інформаційних впливів в соціальних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2018. Т. 4, № 50. С. 147–151. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147>.
10. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. series A, containing papers of a mathematical and physical character*. 1927. Vol. 115, no. 772. P. 700–721. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.
11. Zhu L. Synchronization dynamics in the Sakaguchi-Kuramoto oscillator network with frequency mismatch rules. *Journal of applied mathematics and physics*. 2020. Vol. 08, no. 02. P. 259–269. URL: <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.82021>.

References

1. Fujiwara N., Kurths J., Díaz-Guilera A. Synchronization in networks of mobile oscillators. *Physical review E*. 2011. Vol. 83, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.83.025101>.
2. Acebron J., Bonilla L., Perez Vicente C., Ritort F. and Spigler R. The Kuramoto model: a simple paradigm for synchronization phenomena *Reviews of modern physics*. 2005. Vol. 77, no. 1. P. 137–185. URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.77.137>
3. Dmytriienko, K. Adaptation of the kuramoto model for the analysis of the distribution of information in social networks. *Cybersecurity: Education, Science, Technology. Electronic*

Professional Scientific Journal, 2023, 1, 309-314. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.309314>

4. Strogatz, S. Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering. *CRC Press LLC*, 2024

5. Chiba H., Medvedev G. S., Mizuhara M. S. Bifurcations in the Kuramoto model on graphs. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*. 2018. Vol. 28, no. 7. P. 073109. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5039609>.

6. Yang, Y., Lu, Z., Li, V. O. K., & Xu, K. Noncooperative information diffusion in online social networks under the independent cascade model. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2017, 2017. Vol. 4, no. 3. P. 150–162. <https://doi.org/10.1109/tcss.2017.2719056>

7. Rodrigues, F. A., Peron, T. K. D., Ji, P., & Kurths, J. The Kuramoto model in complex networks. *Physics Reports*, 2017, Vol 610, P. 1–98. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2015.10.008>.

8. Phillips E. T. The synchronizing role of multiplexing noise: Exploring Kuramoto oscillators and breathing chimeras. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*. 2023. Vol. 33, no. 7. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0135528>.

9. Ulichev O. S. Research on information dissemination models and information impacts in social networks. *Control, Navigation, and Communication Systems: Collection of Scientific Works* 2018. T. 4, № 50. C. 147–151. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147>.

10. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the royal society of london. series A, containing papers of a mathematical and physical character*. 1927. Vol. 115, no. 772. P. 700–721. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>.

11. Zhu L. Synchronization dynamics in the Sakaguchi-Kuramoto oscillator network with frequency mismatch rules. *Journal of applied mathematics and physics*. 2020. Vol. 08, no. 02. P. 259–269. URL: <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.82021>.