DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-196-206
УДК 519.87:004.94:004.89

Марина Анатоліївна Синенко[1], Юлія Миколаївна Ткач[2]

[1]кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: marina.a.snnk@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-8961-533X

[2]доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор,
завідувач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: tkachym79@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-8565-0525

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ПОВЕДІНКИ АГЕНТІВ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Побудова математичних моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить складною, але перспективним завданням, оскільки математичні моделі взагалі й моделі соціальних мереж зокрема дозволяють не тільки глибше усвідомити взаємозв'язки між досліджуваними об'єктами, але й передбачати та певною мірою керувати поведінкою досліджуваного процесу. У цій роботі запропонована модель динаміки поведінки агентів соціальних мереж, яка поєднує елементи SIR-моделей та порогових моделей. Модель дає змогу охарактеризувати функції $S(t), A(t), R(t)$, які відповідно ілюструють динаміку поширення інформації в мережі та визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t.

***Ключові слова**: соціальні мережі; випадкові графи; ймовірнісний розподіл; математична модель; порогова модель; кібербезпека; інформаційна безпека.*
Рис.: 5. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Завдяки стрімкому розвитку інтернет-технологій процес поширення інформації в сучасному світі зазнав значних змін. Великі групи людей отримали відносно легкий доступ до будь-яких типів інформації і, крім того, самі можуть поширювати значні об'єми інформації через соціальні мережі. Таким чином, на сьогодні людям доводиться взаємодіяти в умовах інформаційного перевантаження. Своєчасний доступ до достовірної інформації може суттєво сприяти свідомому ухваленню тих чи інших рішень. З іншого боку, стрімке поширення помилкової чи відверто неправдивої інформації може привести до соціальної нестабільності. Через названі фактори дослідження поширення інформації в соціальних мережах, а також вивчення її впливу на конкретних індивідуумів та суспільство загалом у наш час є надзвичайно актуальним.

Постановка проблеми. Дослідження механізмів поширення інформації та комунікацій у соціальних мережах перебуває в міждисциплінарному просторі, де співпрацюють фахівці з різних сфер: аналізу даних, психолінгвістики, соціології, математичного моделювання та інші. Побудова математичних моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить складним, але перспективним завданням, оскільки математичні моделі взагалі й моделі соціальних мереж зокрема дозволяють не тільки глибше усвідомити взаємозв'язки між досліджуваними об'єктами, але й передбачати та певною мірою керувати поведінкою досліджуваного процесу. Математичний апарат, який використовується при побудові моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить різноманітним – це теорія ймовірностей, теорія диференціальних рівнянь, теорія стійкості, теорія ігор, теорія графів та інші.

Для аналізу поширення інформаційних потоків у соціальних мережах використовують моделі дифузії інновацій, моделі незалежних каскадів, порогові моделі впливу, елементи теорії ігор та інші.

Одні з перших моделей динаміки поширення інформації були запозичені з епідеміології. Це так звані моделі «просочення і зараження» та їх узагальнення (SIR, SIER, SIRS, (Kermack, McKendrick, 1927). Згідно з цією моделлю члени популяції можуть перебувати в одному з трьох станів: сприйнятливий до інфекції (susceptible, S), інфікований (infected, I), отримав імунітет чи загинув (recovered/removed, R). Узявши за базу SIR-модель, у 1965 році Делай-Кендалл запропонував модель, яка також відома як «модель поширення чуток». У цій моделі автор виділив такі групи населення: група, що починає поширення чутки чи новини, група, що сприймає чутки і продовжує їх поширення, група, що втрачає інтерес до інформації і не поширює її далі.

На сьогодні при проєктуванні соціальних мереж широко використовують дві базові моделі: модель незалежних каскадів і лінійна порогова модель.

У моделях незалежних каскадів (Newell, Simon, 1972) агенти мережі, які моделюються вершинами графа, можуть перебувати в одному з двох станів – активному або неактивному. При цьому можливий лише перехід від неактивного до активного стану, який відбувається з відомою ймовірністю. Процес продовжується доти, поки залишається можливість активізації вершин. Ймовірність переходу вершини в активний стан тим більша, чим більше є сусідніх активних вершин. Показано, що в каскадних моделях процес поширення активності залежить від структури мережі.

Відправною точкою для розвитку порогових моделей стала робота Грановера «Порогова модель колективної поведінки» (Granovetter M., 1978). У порогових моделях, які будуються по тому ж принципу, що і моделі незалежних каскадів, вершина графа стає активною, якщо сума впливів на неї сусідніх вершин перевищує деяке значення – поріг. Зауважимо, що поширення активності у таких мережах залежить не тільки від середнього порогового значення, але і їх розподілу в мережі.

Крім того, для вивчення колективної поведінки, у тому числі поведінки в соціальних мережах, активно використовують теоретико-ігровий підхід. Прикладом такого підходу є роботи Д. А. Губанов, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиріччя спостерігається значна зацікавленість наукової спільноти в дослідженні та аналізу поширення інформації в соціальних мережах.

Робота [1] присвячена проблемі комплексного застосування теоретичних моделей, які використовуються при дослідженні онлайн-поширення інформації в соціальних мережах. Указані перспективні напрями розвитку формальних моделей поширення інформації. На думку автора, одним із перспективних напрямів розвитку формальних моделей є врахування особистих властивостей акторів, наприклад, сфери професійної діяльності.

У роботі [2] за допомогою SIR-моделі поширення інформації отримана кількісна оцінка зростання активних фловерів конкретного інформаційного каналу серед населення регіону.

У роботі [3] проведений порівняльний аналіз різних підходів до моделювання розповсюдження інформації в соціальних мережах. На думку автора, існуючі моделі можна класифікувати за чотирма напрямами: структурний, ресурсний, нормативний та динамічний. Як на один із недоліків вказаних моделей автор указує, що в більшості класичних моделей не розрізнять параметрів агента, тобто всі агенти в цих моделях є ідентичними, що, на переконання автора, суттєво знижує адекватність моделей.

У роботі [4] в основу формалізації покладено ідею застосування гібридних математичних моделей, які складаються з неоднорідного рівняння дифузії (проникнення) і динамічних моделей, що описують процеси зміни чисельності контингенту середовища поширення інформації. Розглянуто різні випадки формалізації зовнішнього впливу на процес інформаційного поширення.

У роботі [5] розглядається нейроподібна модель поширення реклами в межах цільової аудиторії та отримана оцінка ефективності поширення реклами з урахуванням заданого порогу сприйнятливості рекламі для осіб цільової аудиторії.

У роботі [6] досліджено положення рівноваги у соціальних мережах. Розглядаються два підходи проєктування та аналізу соціальних мереж, а саме макро- та мікроописи. Соціальні мережі моделюються за допомогою орієнтованих графів, будується емпіричний ймовірнісний розподіл числа вхідних та вихідних дуг. Згідно з першим підходом структура відносин у соціальних мережах усереднюється і поведінка агентів вивчається в середньому. Другий підхід враховує структурні особливості впливу графа агентів та індивідуальні принципи ухвалення ними рішень. Крім того, дано порівняння цих підходів на прикладі порогової моделі з єдиним відносним порогом.

Мета роботи. Як випливає з вищезазначеного, при моделюванні соціальних мереж використовуються різні підходи, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Метою цієї роботи є побудова моделі динаміки поведінки агентів соціальної мережі, яка б поєднала елементи SIR та порогових моделей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері постає потреба у розробці моделі, яка досліджувала б поведінку агентів соціальної мережі, при цьому поєднуючи елементи SIR та порогових моделей.

Виклад основного матеріалу. Соціальні мережі є складними системами, які відображають взаємодії та зв'язки між акторами (людьми, організаціями та іншими сутностями). Традиційно дослідження таких мереж базується на теорії випадкових графів [7; 8; 10]. Наслідуючи цю традицію, будемо моделювати соціальну мережу у вигляді графа, що має N вузлів, степені яких характеризується щільністю розподілу $P(k)$. Згідно з [7], щільність розподілу $P(k)$ визначає ймовірність того, що випадково вибраний вузол інцидентний рівно k ребрам. Експериментально було встановлено, що для багатьох реальних мереж диференціальна функція розподілу степенів вузлів асимптотично пропорційна $k^{-\mu}$, $P(k)\sim k^{-\mu}$. Параметр μ є індивідуальною характеристикою мережі і у багатьох випадках $\mu \in (2;3)$ [7]. У будь-який момент часу учасники мережі можуть перебувати в одному з трьох станів: сприйнятливий (susceptible) – здатний зацікавитись інформацією, залучений (adopted) – зацікавлений інформацією, або відновлений (recovered) – той, хто утратив інтерес до інформації. У першому стані (susceptible) учасник здатний зацікавитись інформацією, але не бере участь у соціальній поведінці і, відповідно, не поширює інформацію. У другому стані (adopted) учасник займає активну соціальну позицію, приймає інформацію і поширює її далі. У стані recovered учасник соціальної мережі втрачає інтерес до інформації і не поширює її. Тобто ми розглядаємо так звану susceptible-adopted-recovered (SAR) модель. Хоча ця модель подібна до SIR-моделі, запозиченої з епідеміології, у запропонованій моделі є певні відмінності [8], а саме: якщо у SIR-моделі «зараження» може відбуватись повторно, у цій моделі припускаємо, що будь-який фрагмент інформації передається по кожному конкретному ребру графа тільки один раз.

Щоб ініціювати «зараження» мережі, припускаємо, що є частка p_0 акторів, які перебувають у «залученому» стані A і які рівномірно розподілені мережею. У будь-який момент часу інформація може передаватись від залученої особи до кожного її сусіда по мережі незалежно із ймовірністю λ. Параметр λ є характеристикою мережі.

Нехай деякий «сприйнятливий» індивід, якому в мережі відповідає вершина u, $\deg(u) = k$ уже отримав m фрагментів інформації від «залучених» сусідів по мережі і, крім того, на цей момент часу отримує ще n нових фрагментів. Після отримання $m+n$ фрагментів індивід може залишатись у сприйнятливому стані або перейти в інший стан – «залучений» або «відновлений». Будемо вважати, що він переходить у новий стан з ймовірністю $\pi(k, m+n)$, причому з ймовірністю $\beta\pi(k, m+n)$ перехід здійснюється в залучений стан і, відповідно, з ймовірністю $(1-\beta)\pi(k, m+n) -$ у відновлений. Ймовірність переходу залежить зокрема від степеня k вершини та кількості отриманих фрагментів інформації. Одночасно «залучений» індивід може втратити інтерес до інформації і перейти у відновлений стан з ймовірністю γ. Поширення інформації мережею припиняється, якщо кожен із «залучених» індивідів перейде у відновлений стан. Динаміку зміни станів елементів соціальної мережі можна проілюструвати за допомогою такої схеми (рис. 1).

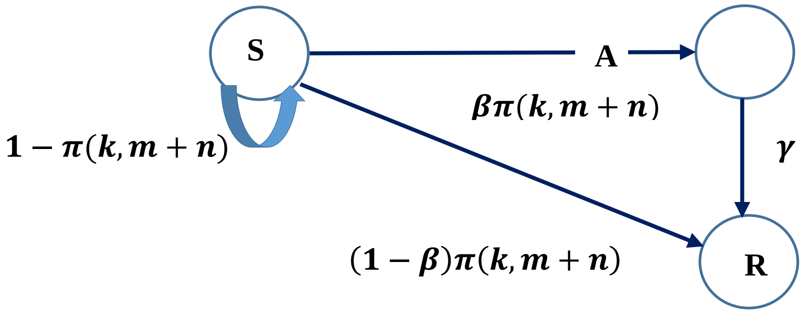

Рис. 1. Динаміка зміни станів елементів соціальної мережі

Джерело: розроблено авторами.

Динаміку поширення інформації в мережі будемо описувати за допомогою трьох функцій $S(t), A(t), R(t)$, які відповідно визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t.

Таким чином, S(t), A(t), R(t) є функціями часу і змінюються в межах від 0 до 1, тобто

$$0 \leq S(t), A(t), R(t) \leq 1; \; S(t)+A(t)+R(t)=1.$$

Будемо вважати, що в початковий момент часу $S(0)=1-p_0, A(t)=p_0, R(t)=0$. Суттєво, що параметр $p_0>0$, оскільки саме наявність залучених акторів ініціює поширення інформації в мережі. Активність мережі повністю визначається функцією $A(t)$- часткою залучених індивідів, які, власне, і поширюють інформацію. Зазначимо, що стани всіх індивідів стабілізуються при $t \to \infty$.

Як було вказано вище, частка залучених індивідів $A(t)$ може змінюватись за рахунок двох факторів – переходу в залучений стан сприйнятливих індивідів, або втрати залученими індивідами інтересу до поширюваної інформації. Таким чином,

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\beta \frac{dS(t)}{dt} - \gamma A(t)\,. \tag{1}$$

Крім того,

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma A(t) - (1-\beta) \frac{dS(t)}{dt}\,. \tag{2}$$

Позначимо $\theta(t)$ ймовірність того, що в момент часу t індивід v не транслює інформацію вздовж випадково вибраного ребра. Значення функції $\theta(t)$ залежить від стану, у якому перебуває індивід v, а оскільки актори мережі можуть переходити з одного стану в інші $\theta(t)$ є функцією часу. Для простоти будемо вважати, що ця ймовірність не залежить від вибору ребра. Нехай у початковий момент часу частка індивідів, які перебувають у залученому стані, не транслюють інформацію, тобто $\theta(0)=1$ для усіх ребер. Індивід u, який перебуває у сприйнятливому стані, згідно з прийнятими припущеннями не може транслювати інформацію, але може приймати її від своїх сусідів. У момент часу t випадково вибраний індивід у сприйнятливому стані, якому відповідає вузол u, $\deg(u)=k$, отримує m фрагментів незалишкової інформації з ймовірністю:

$$\varphi_m\big(k,\theta(t)\big) = (1-p_0)\binom{k}{m}\theta(t)^{k-m}\big(1-\theta(t)\big)^m. \tag{3}$$

Ймовірність того, що індивідуум u залишиться у сприйнятливому стані й не перейде в залучений стан унаслідок прийняття m фрагментів інформації визначається функцією $\pi(k,m)$ і дорівнює

$$\prod_{j=0}^{m}(1-\pi(k,j)).$$

Таким чином, ймовірність того, що в момент часу t індивідуум u все ще залишиться у сприйнятливому стані визначається рівністю:

$$s(k,t) = \sum_{m=0}^{k} \varphi_m\big(k,\theta(t)\big) \prod_{j=0}^{m}(1-\pi(k,j)) \tag{4}$$

Беручи до уваги, що степені різних вузлів у мережі відрізняються, отримаємо ймовірність того, що випадково вибраний індивід u перебуває у сприйнятливому стані в момент часу t (частка сприйнятливих індивідуумів у мережі):

$$S(t) = \sum_{k=0}^{\infty} P(k)s(k,t) \tag{5}$$

Далі знайдемо рівняння, яке описує поведінку функції $\theta(t)$. Зауважимо, що будь-який вузол суміжний u, на момент часу t може перебувати в одному із трьох станів, а отже, ймовірність того, що інформація не буде транслюватись по інцидентному їм ребру, можна знайти, скориставшись формулою повної ймовірності:

$$\theta(t) = \theta_S(t) + \theta_R(t) + \theta_A(t)(1-\lambda). \tag{6}$$

Доданки $\theta_S(t), \theta_A(t), \theta_R(t)$ визначають ймовірності, що суміжний з u вузол перебуває у сприйнятливому, залученому чи відновленому стані.

Нехай вузол v, $\deg(v) = k'$, суміжний з вузлом u також (як і u) знаходиться у сприйнятливому стані, а, отже, не може транслювати інформацію до u, але може сприймати її від інших сусідів (суміжних з ним вузлів). Ймовірність, що на момент часу t індивід v уже отримав m фрагментів інформації, визначається рівністю:

$$\tau_m(k', \theta(t)) = \binom{k'-1}{m} \theta(t)^{k'-1-m}(1-\theta(t))^m. \tag{7}$$

Ймовірність, що на момент часу t він все ще перебуває у сприйнятливому стані, дорівнює:

$$\Theta(k', \theta(t)) = \sum_{m=0}^{k\prime} \tau_m(k', \theta(t)) \,. \tag{8}$$

Підсумувавши за всіма можливими значеннями k', отримаємо ймовірність з'єднання вузла u з іншими вузлами, які перебувають у сприйнятливому стані і, відповідно, не транслюють інформацію до u. Таким чином, ми знайдемо ймовірність $\theta_S(t)$.

$$\theta_S(t) = (1-p_0) \cdot \frac{1}{\langle k \rangle}. \tag{9}$$

Вираз $\frac{1}{\langle k \rangle} k' P(k)$ в некорельованих мережах визначає ймовірність того, що індивід u пов'язаний з вузлами, степінь яких дорівнює k'.

Розглянемо як з часом може змінюватись ймовірність $\theta_R(t)$. Зростання $\theta_R(t)$ може відбуватись за рахунок двох факторів: по-перше, якщо індивіди, що перебувають у залученому стані, не поширюють інформацію (ймовірність такої події (1-**λ**)) і при цьому переходять у відновлений з ймовірністю γ, по-друге, за рахунок індивідів, що залишили сприйнятливий стан і з ймовірністю 1- β переходять у відновлений. Таким чином, маємо:

$$\frac{d\theta_R(t)}{dt} = \gamma(1-\lambda)\theta_A(t) - (1-\beta)\frac{d\theta_s}{dt}. \tag{10}$$

Беручи до уваги, що зміна ймовірності непоширення інформації $\theta(t)$ вздовж випадково вибраного ребра визначається тим, що залучені індивіди транслюють інформацію до зв'язаних з ними даними ребрами сприйнятливих сусідів, маємо:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\lambda\, \theta_A(t). \tag{11}$$

З рівнянь (10) і (11) маємо:

$$\frac{d\theta_R(t)}{dt} = \gamma \frac{\lambda-1}{\lambda} \frac{d\theta}{dt} - (1-\beta)\frac{d\theta_s}{dt}. \tag{12}$$

З рівняння (13), врахувавши початкову умову $\theta(0) = 1$, отримаємо вираз для θ_R:

$$\theta_R = \gamma \frac{\lambda-1}{\lambda}(\theta - 1) - (1-\beta)(\theta_S - 1 + p_0). \tag{13}$$

На базі рівнянь (6), (11), (12) і (13) можемо отримати диференціальне рівняння для $\theta(t)$. Дійсно,

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\lambda\,\theta_A(t) = -\frac{\lambda}{1-\lambda}\left(\theta(t) - \theta_S(t) - \theta_R(t)\right) =$$
$$= -\frac{\lambda+\gamma-\lambda\gamma}{1-\lambda}\theta(t) + \frac{\lambda\beta}{1-\lambda}\theta_s(t) + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda}\right) =$$
$$= -\frac{\lambda+\gamma-\lambda\gamma}{1-\lambda}\theta(t) + \frac{\lambda\beta}{1-\lambda}\frac{1-p_0}{\langle k\rangle}\sum_{k'} k'P(k')\Theta\left(k',\theta(t)\right) + \ + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda}\right). \quad (14)$$

Таким чином, рівняння (1)-(5) і (14) визначають загальну модель динаміки поширення інформації у соціальних мережах. Знайшовши розв'язок цієї моделі, можемо отримати вирази для функцій $S(t), A(t), R(t)$.

Для того щоб задати функцію $\pi(k,m)$ - ймовірність переходу зі сприйнятливого у залучений стан, пропонуємо розглянути порогову модель, а саме:

$$\pi(k,m) = \begin{cases} 1, m \geq \tau_k \\ 0, m < \tau_k, \end{cases} \quad (15)$$

де τ_k – поріг прийняття інформації актором, якому відповідає вершина степеня k.

Зазначимо, що аналогічні порогові моделі для опису поширення інформації використовувались у роботах [6; 9; 10]. Значення порогу τ_k може бути фіксованим, або набувати випадкового значення згідно із заданим розподілом ймовірностей, у загальному значення порогу визначається індивідуальністю агента. Функція (15) допускає таку інтерпретацію: якщо індивід, який знаходиться у сприйнятливому стані, отримує таку кількість фрагментів інформації, яка більша або рівна його індивідуального порогу сприйняття, то він однозначно залишає сприйнятливий стан і переходить в один з двох інших – залучений або відновлений стан. Зауважимо, що згідно з (15) приймається припущення, що всі фрагменти інформації, які надійшли до індивіда у сприйнятливому стані по мережі, сприймаються ним як рівноцінні.

Урахувавши вид функції (15), можна суттєво спростити вирази для $S(t), \Theta(k', \theta(t))$.

Дійсно,

$$s(k,t) = \sum_{m=0}^{\tau_k - 1} \varphi_m\left(k,\theta(t)\right) = \sum_{m=0}^{\tau_k - 1}(1-p_0)\binom{k}{m}\theta(t)^{k-m}\left(1-\theta(t)\right)^m$$

$$\Theta(k',\theta(t)) = \sum_{m=0}^{\tau_{k'-1}} \tau_m\left(k',\theta(t)\right) = \sum_{m=0}^{\tau_{k'}-1} \binom{k'-1}{m}\theta(t)^{k'-1-m}\left(1-\theta(t)\right)^m$$

Теоретична модель

Остаточно модель набуває вигляду:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{\infty} P(k)\sum_{m=0}^{\tau_k-1}(1-p_0)\binom{k}{m}\theta(t)^{k-m}\left(1-\theta(t)\right)^m$$

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\beta\frac{dS(t)}{dt} - \gamma A(t)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma A(t) - (1-\beta)\frac{dS(t)}{dt}$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\frac{\lambda+\gamma-\lambda\gamma}{1-\lambda}\theta(t) + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda}\right) +$$
$$+\left(\frac{\lambda\beta}{1-\lambda}\cdot\frac{(1-p_0)}{\langle k\rangle}\sum_{k'} k'P(k')\sum_{m=0}^{\tau_{k'}-1}\binom{k'-1}{m}\theta(t)^{k'-1-m}\left(1-\theta(t)\right)^m\right).$$

Крім того, виконуються початкові умови:

$$S(0) = 1 - p_0, A(t) = p_0, R(t) = 0, \theta(0) = 1.$$

У цій моделі функції $S(t), A(t), R(t)$ відповідно визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t, $0 \leq S(t), A(t), R(t) \leq 1$;

$$St + At + Rt = 1.$$

Ілюстрація поведінки розподілів $S(t), A(t), R(t)$ подана на рис. 2.

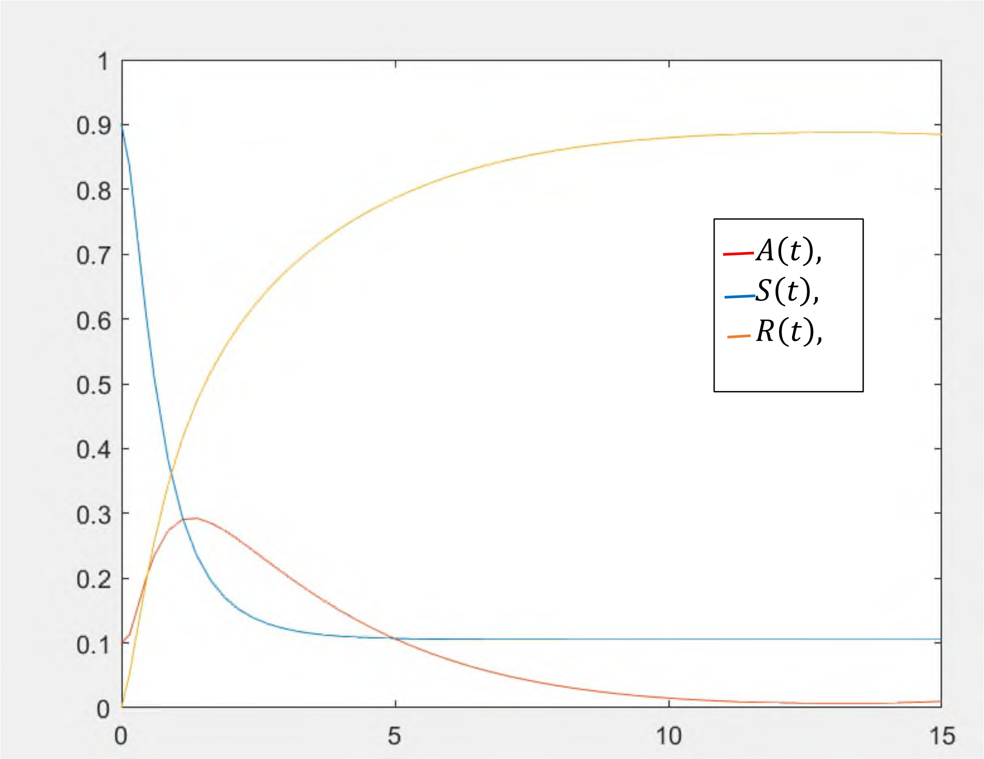

Рис. 2. Графіки $S(t), A(t), R(t)$; $\beta = 0{,}6$; $\gamma = 0{,}3$; $p_0 = 0{,}1$; $\lambda = 0{,}5$

Як видно з наведених графіків функція $S(t)$, що описує частку сприйнятливих індивідів мережі, з часом спадає. Функції $A(t)$, які визначають частку залучених індивідів мережі при вказаних значеннях параметрів спочатку з часом зростає і, досягнувши певного максимуму (0,3), спадає до нуля, у той час як $R(t)$ (частка відновлених індивідів мережі) з часом зростає. Таким чином, можна спостерігати наступну динаміку поведінки акторів мережі: на початковому етапі їх активність зростає, але з часом більшість акторів переходить у відновлений стан. Однак слід зазначити, що поведінка моделі значною мірою залежить від значення її параметрів. Проаналізуємо цю залежність. Як зазначалось раніше, щоб ініціювати «зараження» мережі, припускаємо, що є частка $p_0 > 0$ акторів, які перебувають у «залученому» стані *A*. Зі збільшенням p_0 активність мережі зростає, однак у багатьох випадках значення $p_0 > 0$ не є критичним для поширення інформації, оскільки активність мережі більшою мірою визначається середнім значенням порогу прийняття інформації та топологією мережі. Так, наприклад, при $\tau_k = 1, \forall\, k$ інформація буде поширюватись при будь-якому додатному значенні p_0 [11].

Значення параметра $\boldsymbol{\lambda}$ впливає на швидкість процесів у мережі. На рис. 3 наведені графіки функції $\theta(t)$ – ймовірність того, що в момент часу t не відбувається трансляції інформації вздовж випадково вибраного ребра. З ростом $\boldsymbol{\lambda}$ швидкість спадання $\theta(t)$ збільшується (решта параметрів фіксовані).

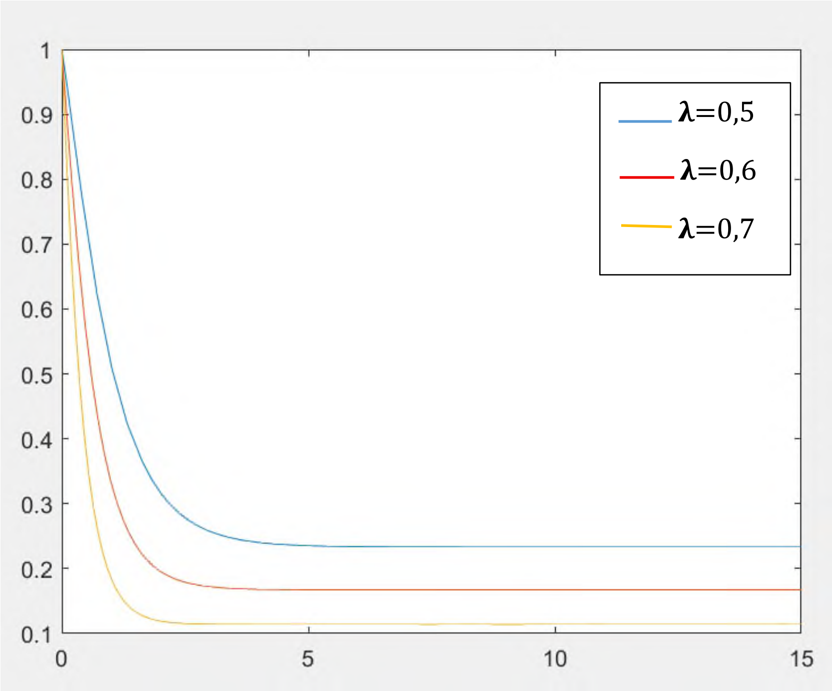

Рис. 3. Графіки функції $\theta(t)$ $(\beta = 1;\ \gamma = 0{,}3;\ p_0 = 0{,}1)$

Важливе значення для процесу поширення інформації має параметр $\beta, \beta \in [0; 1]$, який характеризує ймовірнісну міру зацікавленості інформацією, або ймовірність того, що певний актор довіряє джерелу інформації.

На рис. 4 наведені графіки функцій $A(t)$, які визначають частку залучених індивідів мережі, при різних значеннях параметра β. Як бачимо, чим більше значення параметра β, тим більша частка залучених індивідів спостерігається в мережі.

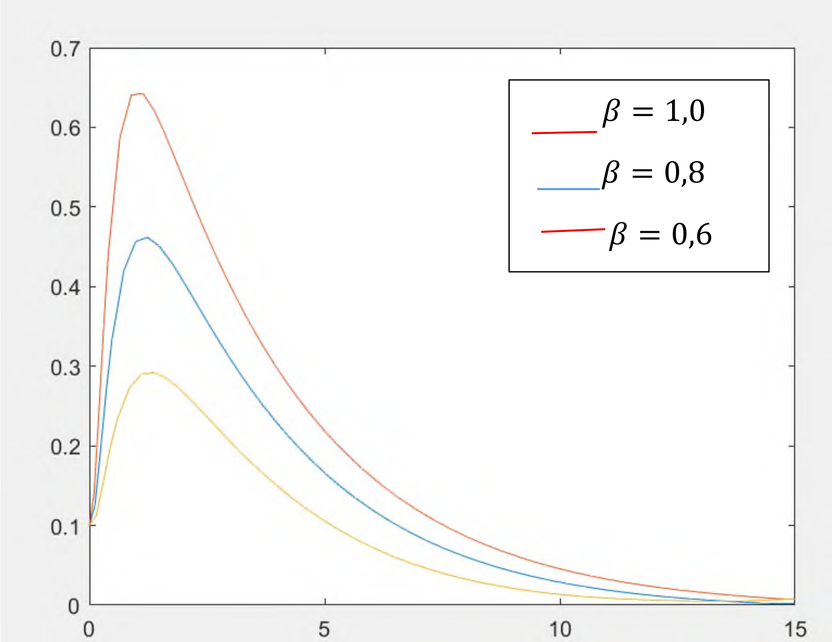

Рис. 4. Графіки $A(t)$ *при різних значеннях параметра* β $(\beta = 0{,}6;\ \beta = 0{,}8;\ \beta = 1;\ \lambda = 0{,}5;\ \gamma = 0{,}3;\ p_0 = 0{,}1)$

Природно зробити припущення, що значення параметра β може змінюватись у процесі поширення інформації. На рис. 3 наведено графіки функцій $A(t)$, де в одному випадку значення параметра β залишається постійним ($\beta = 0{,}6$), а в іншому – значення параметра β лінійно зростає від 0,6 до 0,9. Як видно з рис. 5, лінійне зростання параметра β не змінює якісну поведінку функції, але при цьому впливає на її кількісні характеристики. Це може бути корисно для розробки стратегій контролю та поширення інформації.

Відмітимо також, що в роботі [12] було проведено імітаційне моделювання поширення інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах, якісно результати збігаються з результатами, отриманими на базі моделі, що розглядається в цій роботі.

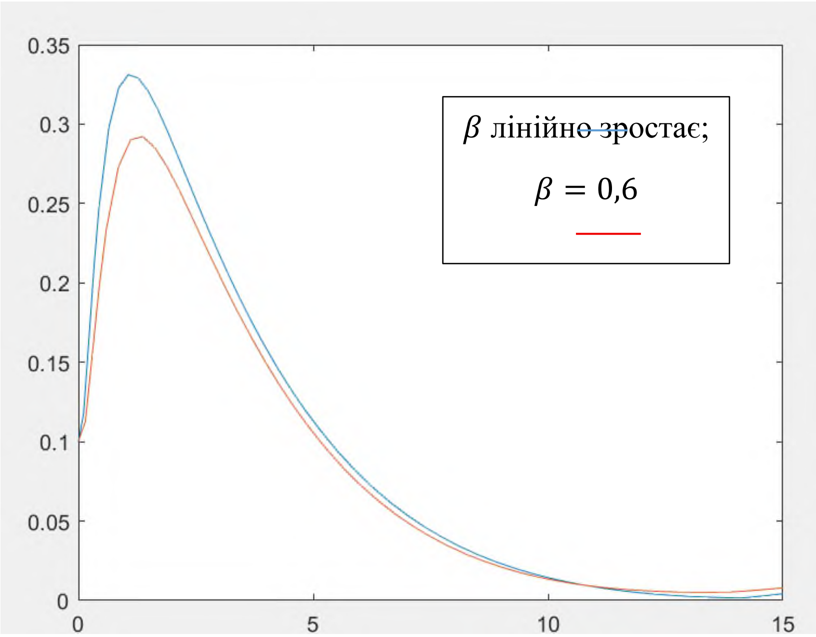

Рис. 5. Графіки $A(t)$ при $\beta = 0{,}6$ та $\beta = 0{,}6 + 0{,}02t$

Висновок. Вивчення онлайн-поширення інформації в соціальних мережах є досить складною, але, разом з тим, актуальним і захопливим завданням. На базі теорії випадкових графів у роботі була побудована та проаналізована модель, що описує динаміку поведінки агентів соціальної мережі. Модель дає змогу охарактеризувати функції $S(t), A(t), R(t)$, які відповідно визначають щільність сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів мережі. Побудована модель поєднує властивості susceptible-adopted-recovered та порогових моделей. При визначенні порогів приймається припущення, що всі фрагменти інформації, які надійшли до індивіда у сприйнятливому стані, сприймаються ним як рівноцінні. Однак у реальності, ймовірно, фрагменти інформації, отримані від різних акторів, будуть мати для індивіда різну значущість. Тому урахування особливостей як мережі, так і індивіда у сприйнятливому стані при побудові порогової моделі може стани метою подальших досліджень.

Модель може бути використана для передбачення того, як швидко інформація поширюватиметься в мережі.

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, 39,* 127-134.

2. Войтко, О., Солонніков, В., & Полякова, О. (2022). SIR-модель розповсюдження та врахування результатів негативного впливу інформаційних каналів на громадську думку населення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, *43*(1), 115–120. https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-43-1-115-120.

3. Улічев, О. С. (2018). Дослідження моделей розповсюдження інформації та інформаційних впливів в соціальних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, *4*(50), 147–151. https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147.

4. Івохін, Є. В., & Аджубей, Л. Т. (2019). Про моделювання динаміки розповсюдження інформації на основі неоднорідних дифузійних гібридних моделей. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика*, (2(35)), 112–118. https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2(35).112-118.

5. Івохін, Є. В., & Навродський, В. О. (2017). Математичні моделі процесу розповсюдження реклами в соціальній групі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (6), 122–127. https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2157 .

6. Breer, V. V., Novikov, D. A., & Rogatkin, A. D. (2016). Micro- and macromodels of social networks. I. Theory fundamentals. *Automation and Remote Control*, *77*(2), 313–320. https://doi.org/10.1134/s0005117916020077.

7. Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, *74*(1), 47–97. https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.47.

8. Wang, W., Tang, M., Zhang, H.-F., & Lai, Y.-C. (2015). Dynamics of social contagions with memory of nonredundant information. *Physical Review E*, *92*(1). https://doi.org/10.1103/physreve.92.012820.

9. Wang, W., Tang, M., Shu, P., & Wang, Z. (2016). Dynamics of social contagions with heterogeneous adoption thresholds: Crossover phenomena in phase transition. *New Journal of Physics*, *18*(1), 013029. https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013029.

10. Liu, M.-X., Wang, W., Liu, Y., Tang, M., Cai, S.-M., & Zhang, H.-F. (2017). Social contagions on time-varying community networks. *Physical Review E*, *95*(5). https://doi.org/10.1103/physreve.95.052306.

11. *The model thinker: What you need to know to make data work for you*. (2018). Basic Books.

12. Єнков, С., Джулій, В., Сєлюков, О., Орленко, В., & Атаманюк, А. (2021). Модель безпеки поширення забороненої інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, (68), 53–64. https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-06.

References

1. Chernii, P. D. (2017). Modeli poshyrennia povidomlen v onlain sotsialnykh merezhakh: vlastyvosti, struktura, osoblyvosti zastosuvannia [Models of message dissemination in online social networks: properties, structure, and application features]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, 39*, 127-134.

2. Voitko, O., Solonnikov, V., & Poliakova, O. (2022). SIR-model rozpovsiudzhennia ta vrakhuvannia rezultativ nehatyvnoho vplyvu informatsiinykh kanaliv na hromadsku dumku naselennia [SIR-model for disseminating and taking into account the results of the negative impact of information channels on public opinion]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony – Modern information technologies in the security and defence sector, 43(1), 115–120.* https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-43-1-115-120.

3. Ulichev, O. S. (2018). Doslidzhennia modelei rozpovsiudzhennia informatsii ta informatsiinykh vplyviv v sotsialnykh merezhakh [Study of models of information dissemination and information influence in social networks]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats – Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers, 4(50), 147–151.* https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147.

4. Ivokhin, Ye. V., & Adzhubei, L. T. (2019). Pro modeliuvannia dynamiky rozpovsiudzhennia informatsii na osnovi neodnoridnykh dyfuziinykh hibrydnykh modelei [On modelling the dynamics of information propagation on the basis of heterogeneous diffusion hybrid models]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriia: Matematyka i informatyka – Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Mathematics and Informatics, (2(35))*, 112–118. https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2(35).112-118.

5. Ivokhin, Ye. V., & Navrodskyi, V. O. (2017). Matematychni modeli protsesu rozpovsiudzhennia reklamy v sotsialnii hrupi [Mathematical models of the process of advertising distribution in a social group]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute, (6),* 122–127. https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2157.

6. Breer, V. V., Novikov, D. A., & Rogatkin, A. D. (2016). Micro- and macromodels of social networks. I. Theory fundamentals. *Automation and Remote Control*, *77*(2), 313–320. https://doi.org/10.1134/s0005117916020077.

7. Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, *74*(1), 47–97. https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.47.

8. Wang, W., Tang, M., Zhang, H.-F., & Lai, Y.-C. (2015). Dynamics of social contagions with memory of nonredundant information. *Physical Review E*, *92*(1). https://doi.org/10.1103/physreve.92.012820.

9. Wang, W., Tang, M., Shu, P., & Wang, Z. (2016). Dynamics of social contagions with heterogeneous adoption thresholds: Crossover phenomena in phase transition. *New Journal of Physics*, *18*(1), 013029. https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013029.

10. Liu, M.-X., Wang, W., Liu, Y., Tang, M., Cai, S.-M., & Zhang, H.-F. (2017). Social contagions on time-varying community networks. *Physical Review E*, *95*(5). https://doi.org/10.1103/physreve.95.052306.

11. *The model thinker: What you need to know to make data work for you*. (2018). Basic Books.

12. Yenkov, S., Dzhulii, V., Sieliukov, O., Orlenko, V., & Atamaniuk, A. (2021). Model bezpeky poshyrennia zaboronenoi informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh [A security model for the dissemination of prohibited information in information and telecommunications networks]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka – Collection of scientific papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, (68), 53–64. https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-06.

Отримано 10.04.2025

UDC 519.87:004.94:004.89

Marina Synenko[1], Yuliia Tkach[2]

[1]PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: marina.a.snnk@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-8961-533X
[2]Doctor of Pedagogical Sciences, PhD of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: tkachym79@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-8565-0525

MODEL OF THE BEHAVIOR DYNAMICS OF SOCIAL NETWORK AGENTS

Thanks to rapid development of Internet technologies, information dissemination in the modern world has undergone significant changes. Large groups of people have gained relatively easy access to any type of information and, in addition, can themselves disseminate significant volumes of information through social networks. Thus, today people have to interact in conditions of information overload. Timely access to reliable information can significantly contribute to the conscious adoption of certain decisions. On the other hand, rapid spread of erroneous or frankly false information can lead to social instability. Due to the above factors, the study of the spread of information in social networks, as well as the study of its impact on specific individuals and society as a whole, is currently extremely relevant.

Building mathematical models of the spread of information in social networks is a rather difficult but promising task, since mathematical models in general and models of social networks in particular allow not only to more deeply understand the relationships between the objects under study, but also to predict and to some extent control the behavior of the process under study.

This paper proposes a model of the dynamics of the behavior of social network agents, which combines elements of SIR models and threshold models. The model allows us to characterize functions S(t), A(t), R(t), which, respectively, illustrate the dynamics of information dissemination in the network and determine the proportion of susceptible, involved and recovered individuals at time t.

The constructed model combines properties of susceptible-adopted-recovered and threshold models. When determining thresholds, it is assumed that all fragments of information that have reached an individual in a susceptible state are perceived by him as equivalent. However, in reality, most likely, fragments of information received from different actors will have different significance for the individual. Therefore, taking into account the characteristics of both the network and the individual in a susceptible state when constructing a threshold model may become the goal of further research.

Key words: *social networks; random graphs; probability distribution; mathematical model; threshold model; information security.*

Fig.: 5. References: 14.

Синенко М. А., Ткач Ю. М. Модель динаміки поведінки агентів соціальних мереж. *Технічні науки та технології.* 2025. № 2(40). С. 196-206. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-196-206.