

Олександр Тимченко¹, Володимир Чорняк²

¹ Кафедра систем віртуальної реальності, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: oleksandr.v.tymchenko@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-6315-9375

² Кафедра систем віртуальної реальності, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, E-mail: v.chorniak41@gmail.com, ORCID 0000-0001-2644-2873

АНАЛІЗ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ У СКЛАДНИХ CRM-СИСТЕМАХ

Отримано: Вересень 08, 2025 / Переглянуто: Вересень 10, 2025 / Прийнято: Вересень 15, 2025

© Тимченко О., Чорняк В., 2025

<https://doi.org/10.23939/cds2025.02.074>

Анотація. У статті запропоновано станодинамічний підхід до аналізу фазових переходів у складних CRM-системах (системи управління взаєминами з клієнтами), спрямований на моделювання та прогнозування масової поведінки клієнтів. На основі аналогії між соціально-економічними процесами у взаємодії із клієнтами та фізичними фазовими переходами запропоновано математичну модель, яка враховує критичні точки зміни поведінкових станів. Для аналізу критичних явищ та визначення умов стабільності використано числове моделювання методом Монте-Карло. Отримано фазові діаграми, які демонструють зміну клієнтських сегментів у відповідь на зміну ключових маркетингових параметрів. Виконано порівняльний аналіз з наявними моделями CRM та здійснено емпіричну перевірку на реальних даних комерційних компаній. Отримані результати дають змогу глибше зрозуміти механізми колективної поведінки клієнтів і запропонувати ефективні стратегії управління CRM-системами.

Ключові слова: CRM-системи, фазові переходи, критичні точки, метод Монте-Карло, фазові діаграми, поведінкове моделювання клієнтів.

Вступ

Стрімкий розвиток інформаційних технологій у сучасній економіці зумовлює зростання складності архітектури систем управління взаєминами з клієнтами (CRM), що, своєю чергою, створює нові виклики для аналізу, моделювання й прогнозування масової поведінки клієнтів. У таких умовах основна проблема полягає не лише у високій варіативності поведінкових характеристик клієнтських сегментів, а й у необхідності врахування колективних ефектів, які спричиняють виникнення різких змін у структурі клієнтської бази під впливом незначних зовнішніх збурень. Традиційні методи дослідження поведінки клієнтів, зокрема когортний та RFM-аналіз, кластеризація, машинне навчання, забезпечують ефективний інструментарій для виявлення статистичних закономірностей і прогнозування довготривалих трендів, проте виявляються недостатніми для описання критичних явищ, що супроводжуються раптовими переходами клієнтської бази між різними макроскопічними станами.

Постановка проблеми

На практиці такі фазові переходи проявляються у вигляді масового перерозподілу клієнтів між сегментами у відповідь на зміну ключових маркетингових параметрів, наприклад, незначну зміну цінової політики, введення нового продукту або зміну комунікаційної стратегії. Аналогічні явища добре описано у фізиці складних систем, зокрема у фізиці частинок і статистичній механіці, де фазові переходи розглядають як раптові зміни макроскопічних властивостей системи під впливом зовнішніх чи внутрішніх факторів, а критичні точки чутливі до початкових умов і параметрів. Використання

клієнтодинамічного підходу в аналізі CRM-систем дає змогу здійснювати глибше моделювання колективної поведінки клієнтів, розкривати механізми самоорганізації та виявити критичні параметри, що визначають стійкість або схильність системи до радикальних змін.

У цій роботі CRM-систему розглянуто як складну соціотехнічну структуру, поведінка якої моделюється із застосуванням методів складних систем. Клієнтів ми трактуємо як “частинки”, що взаємодіють у гетерогенному середовищі, а їхні стани визначаються не лише індивідуальними характеристиками, а й сукупним впливом зовнішніх полів (наприклад, маркетингових стимулів) і параметрів середовища, таких як “соціальна температура”. На цій основі запропоновано математичну модель CRM-системи, що дає змогу формалізувати поведінкові стани клієнтів, визначати критерії виникнення фазових переходів, аналізувати стабільність системи й виявляти критичні точки зміни колективної поведінки. У межах дослідження реалізовано числове моделювання методом Монте-Карло, що забезпечує відтворення динаміки клієнтської бази в різних режимах, а також побудову фазових діаграм, які демонструють особливості масових переходів між поведінковими станами.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Розвиток CRM-систем відбувався у тісному взаємозв'язку з еволюцією інформаційних технологій, бізнес-аналітики та поведінкової економіки. В сучасній літературі CRM розглядають не лише як інструмент автоматизації маркетингу чи продажів, а і як складну соціотехнічну систему, що інтегрує принципи мережевої взаємодії, динамічного управління знаннями й адаптивного аналізу клієнтської поведінки [1]. Класичні дослідження, які стосувалися структури і функцій CRM, зосереджуються на процесах сегментації клієнтів, управлінні життєвим циклом та персоналізації комунікацій [2–4]. Проте аналітика масових поведінкових переходів та критичних явищ залишається недостатньо вивченою в межах класичних бізнес-моделей.

Спроби інтерпретації соціально-економічних систем як складних самоорганізованих структур із фазовими ефектами виникли на перехресті економіки, соціології й фізики складних систем. Зокрема, роботи Герберта Саймона [5] і Франка Шнайдера [6] окреслюють CRM як багаторівневу систему із нелінійними взаємодіями, де групова динаміка може породжувати критичні стани. В соціальній фізиці такі явища досліджують у межах так званих *agent-based models* [7], а також із використанням моделей Ізінга, Поттса та Шеллінга, що дають змогу формалізувати колективні ефекти й фазові переходи у штучних суспільствах [8] (рис. 1).

Аналогія CRM із фізикою фазових переходів бере початок із концепції самоорганізації [21], що закладає фундамент для розгляду клієнтських баз як складних нелінійних систем, у яких незначні зміни зовнішніх умов можуть призводити до масових переходів між різними макроскопічними станами. Істотним внеском у формування методології міждисциплінарного аналізу стали праці Ягупової щодо використання синергетики у соціальних технологіях [23], а також дослідження взаємозв'язку соціальних та станодинамічних процесів у поведінковому моделюванні [18, 19].



Рис. 1. Класичні моделі фазових переходів у соціальних та CRM-системах

Важливу роль у розвитку числових підходів до вивчення складних CRM-систем відіграють методи статистичної фізики, зокрема метод Монте-Карло, який забезпечує ефективне дослідження емерджентних властивостей моделей зі складною топологією [13, 14]. Аналіз фазових діаграм і

критичних точок у реальних комерційних даних демонструє перспективність поєднання фізичних і соціальних моделей для оптимізації управління клієнтською базою [8, 15].

Огляд сучасної англomовної літератури засвідчує, що дослідження станодинамічних підходів у CRM-моделюванні лише набирають обертів. Зокрема, автори статті “Complexity in Customer Relationship Management: A Network Theory Approach” [16] спробували застосувати мережеву теорію складності до аналізу еволюції клієнтської бази, а у “Thermodynamic Approaches to Social Phase Transitions” [17] підкреслено релевантність фазових переходів для пояснення масових поведінкових зсувів. Поряд із цим праці “Statistical Mechanics of Social Dynamics” [8] “Self-Organization in Complex Systems” [20], “Synergetics: An Introduction” [21] становлять теоретичну базу для інтерпретації CRM як нелінійної багатокомпонентної системи і колективними ефектами.

Варто підкреслити, що на теренах України концептуальні питання моделювання CRM-систем із урахуванням фазових переходів досліджують переважно у контексті прикладної інформатики [22, 23], а спроби інтеграції станодинамічного апарату залишаються поодинокими.

Цілі дослідження

Актуальність досліджень у цьому напрямі визначається як світовими тенденціями, так і нагальною потребою в ефективних інструментах для адаптивного управління клієнтськими системами в умовах критичних ринкових змін. Результати емпіричної перевірки моделі на основі даних комерційних компаній дають змогу виконати порівняльний аналіз із класичними підходами до управління CRM й обґрунтувати переваги клієнтодинамічного методу для прогнозування критичних явищ у поведінці клієнтів. Наукова новизна цієї роботи полягає у міждисциплінарному синтезі станодинамічного апарату й теорії соціальних систем, що створює підґрунтя для розроблення інноваційних стратегій управління CRM-системами з урахуванням фазових ефектів і колективної динаміки клієнтської бази.

Виклад основного матеріалу

Математичне моделювання масової поведінки клієнтів у CRM-системах із залученням станодинамічного підходу ґрунтується на формалізації клієнтських станів, взаємодій між ними та впливу зовнішніх маркетингових параметрів. У межах запропонованої моделі клієнтів розглядають як агентів, які перебувають у скінченній кількості поведінкових станів, що відповідають, наприклад, рівню лояльності, активності або типу реакції на стимули (рис. 2). Позначимо стан i -го клієнта через $s_i \in \{1, 2, \dots, q\}$, де q – кількість можливих поведінкових фаз у системі.

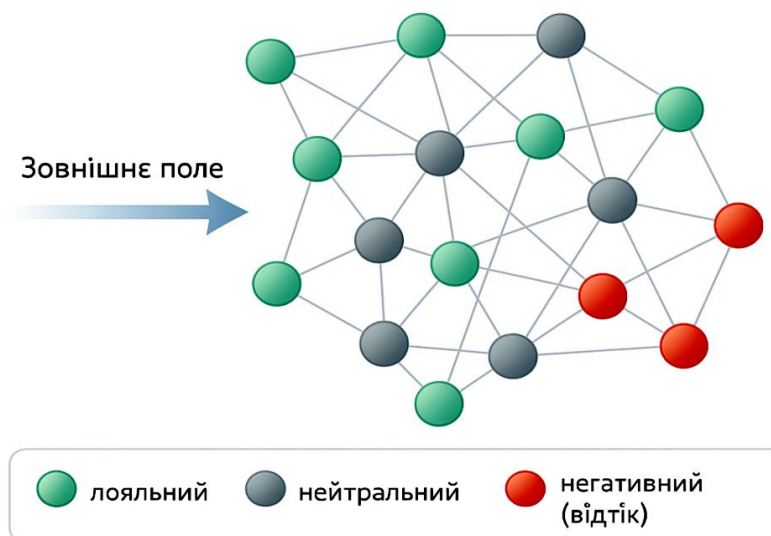


Рис. 2. Агентна мережа CRM-системи

Аналіз фазових переходів у складних CRM-системах

Для опису колективної поведінки використовується гамільтоніан, що враховує як взаємодії між клієнтами, так і вплив зовнішнього “поля” (маркетингових факторів):

$$\sum_{(i,j)} \delta(s_i, s_j) - h \sum_{(i)} \delta(s_i, s_0), \quad (1)$$

де δ – символ Кронекера; J – константа взаємодії; h – параметр зовнішнього поля; s_0 – поведінковий стан, на який спрямований маркетинговий вплив.

Перший доданок у (1) описує ефект групового наслідування (соціального впливу), коли ймовірність зміни стану клієнта зростає зі збільшенням кількості сусідів у певному стані. Другий доданок відображає дію зовнішніх маркетингових зусиль, наприклад, таргетованої кампанії чи змін у цінній політиці.

Температура (T) у цій моделі інтерпретується як рівень “соціального шуму”, що характеризує ступінь індивідуальної непередбачуваності клієнтів і спонтанних змін стану незалежно від соціального впливу. Імовірність переходу клієнта з одного стану в інший описується розподілом Гіббса:

$$P(s_i \rightarrow s_i') = \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{\Delta H}{k_B T}\right), \quad (2)$$

де ΔH – зміна енергії системи у разі переходу; k_B – умовна “соціальна стала Больцмана”; Z – статистична сума нормування

Критерії фазового переходу визначаються виникненням макроскопічних кластерів клієнтів у одному зі станів після досягнення критичного значення зовнішнього параметра (наприклад, певного співвідношення J/h або температури T). Критична точка T_c визначається як точка, у якій спостерігається різкий перехід від дезорганізованого до впорядкованого стану:

$$T_c = \frac{J}{k_B \ln\left(\frac{q}{q-1}\right)}. \quad (3)$$

Залежно від співвідношення параметрів моделі та типу зовнішнього поля система може демонструвати різні типи фазових переходів – від класичних (другого роду, як у моделі Ізінга) до складніших, багатоступеневих чи асиметричних, характерних для соціальних мереж із ієрархічною структурою. У результаті описана модель створює формалізоване підґрунтя для моделювання колективної динаміки клієнтської бази, дає можливість виконувати ідентифікацію фазових переходів та оцінювати вплив маркетингових стратегій на масову поведінку споживачів.

Здійснення досліджень

Моделювання фазових переходів у складних CRM-системах потребує використання потужних числових методів, що дають змогу досліджувати емерджентні ефекти, імовірнісну динаміку та колективну поведінку великої кількості агентів у мережевих структурах. Доцільно використати для цього метод Монте-Карло, який широко застосовують у статистичній фізиці для аналізу систем із багатьма ступенями свободи та складними типами взаємодій [14].

У CRM-контексті кожен агент відповідає окремому клієнту, поведінковий стан якого може змінюватись під впливом як локальних взаємодій із сусідами, так і глобального маркетингового поля. Симуляція динаміки системи здійснюється послідовним (або паралельним) перебором клієнтів і генерацією випадкових переходів між станами згідно з імовірністю, визначеною розподілом Гіббса. Такий підхід дає змогу відтворити нелінійну еволюцію клієнтської бази, спостерігати кластери “лояльності” чи “відтоку” й виявляти критичні точки різких змін у структурі поведінкових фаз (рис. 3).

Основний алгоритм моделювання в CRM-системах наведено на рис. 3.

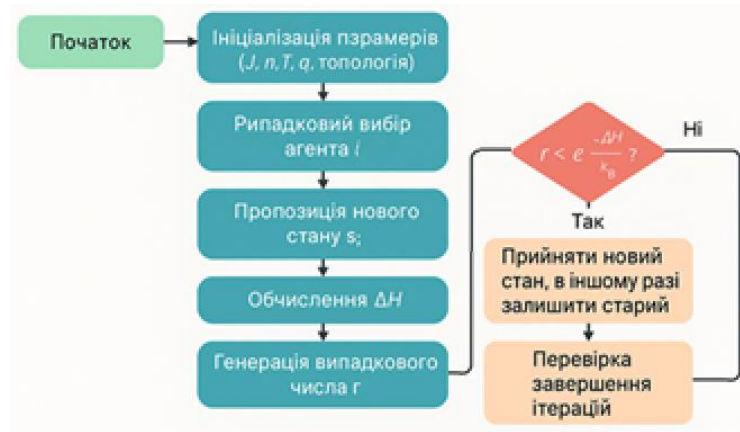


Рис. 3. Блок-схема алгоритму Монте-Карло

Код основного циклу Монте-Карло:

```

import numpy as np
def potts_mc(adj, q=3, J=1.0, h=0.0, s0=0, T=1.5, sweeps=2000, burn=500, seed=0):
    rng = np.random.default_rng(seed)
    N = adj.shape[0]
    s = rng.integers(0, q, size=N, dtype=np.int32)

    def sweep(s):
        for _ in range(N):
            i = rng.integers(0, N)
            si = s[i]
            cand = rng.integers(0, q-1)
            if cand >= si: cand += 1
            nei = adj[i].nonzero()[0]
            same_old = np.sum(s[nei] == si)
            same_new = np.sum(s[nei] == cand)
            dE = -J*(same_new - same_old) - h*((cand == s0) - (si == s0))
            if dE <= 0 or rng.random() < np.exp(-dE/T): s[i] = cand
        return s

    E, M = [], []
    for t in range(sweeps):
        s = sweep(s)
        if t >= burn:
            same = (s[:,None] == s[None,:]).astype(np.int8)
            E_int = -J * (adj * same).sum() / 2.0
            E_field = -h * np.sum(s == s0)
            E.append(E_int + E_field)
            counts = np.bincount(s, minlength=q)
            M.append(counts.max()/N)
    return np.array(E), np.array(M), s

# Example tiny run (English-only output)
if __name__ == "__main__":
    N = 300
    rng = np.random.default_rng(1)
    p = 0.02
    A = (rng.random((N,N)) < p).astype(np.int8)
    A = np.triu(A,1); A = A + A.T; np.fill_diagonal(A, 0)
    E, M, S = potts_mc(A, q=3, J=1.0, h=0.4, s0=0, T=1.2, sweeps=1500, burn=300, seed=2)
    print("Mean energy:", E.mean())
    print("Order parameter (mean):", M.mean())
    print("Final state counts:", np.bincount(S, minlength=3))
    
```

Типовими параметрами числового експерименту є розмір мережі (наприклад, 10^4 – 10^6 клієнтів), кількість ітерацій (до 10^7), тип мережевої топології (решітка, Erdős–Rényi, scale-free), а також характеристики зовнішнього поля та “соціальної температури”. Початкові умови можна задавати випадковим розподілом поведінкових станів, що дає змогу моделювати різні сценарії запуску маркетингових кампаній, активації нових продуктів або введення кризових факторів.

Для оцінювання стану системи під час моделювання фіксують такі макроскопічні змінні, як середня частка клієнтів у кожному і q -поведінкових станів, кластеризація (розмір найбільшого кластера), спостережувана поведінка поблизу критичних точок (флуктуації, гістерезис, мульти-стабільність).

Результати моделювання. Застосування методу Монте-Карло у поєднанні з агентними моделями дає змогу не лише ідентифікувати параметричні сфери існування різних поведінкових фаз, але й виявляти умови виникнення критичних явищ у CRM-системах, моделювати стратегії керування й оптимізувати маркетингові впливи в умовах соціальної складності. Результати моделювання дають можливість ідентифікувати критичні явища, які неможливо зафіксувати традиційними аналітичними засобами бізнес-аналітики. Одним із ключових результатів є побудова фазових діаграм, що ілюструють залежність макроскопічного розподілу клієнтів за поведінковими фазами від зовнішніх та внутрішніх параметрів системи (рис. 4).

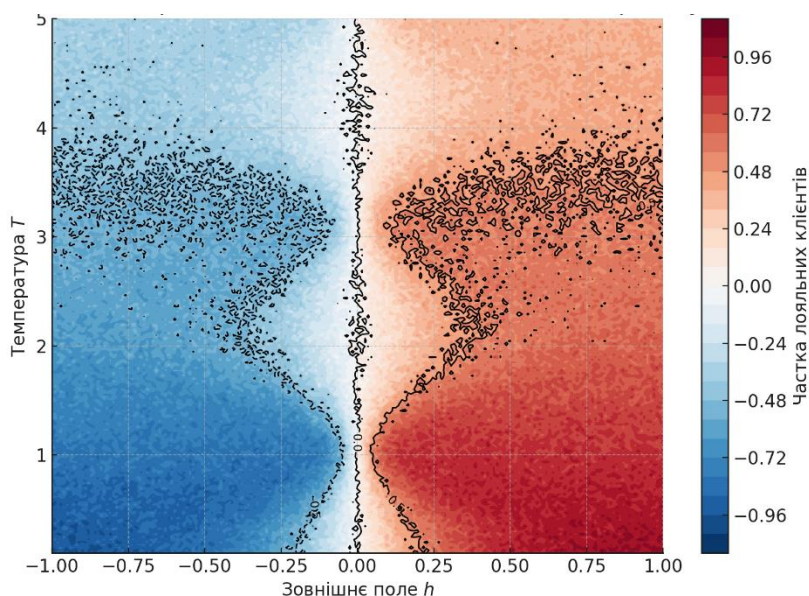


Рис. 4. Фазова діаграма CRM-системи

Аналіз фазової діаграми показує, що за низьких значень температури (T) та високої інтенсивності поля (h) система переходить у впорядкований стан, коли переважна більшість клієнтів концентрується у поведінковій фазі, що відповідає маркетинговому стимулу, який домінує. Зі зростанням температури, яка моделює рівень соціальної невизначеності та індивідуального “шуму”, спостерігається поступове руйнування впорядкованих кластерів і перехід до рівномірнішого розподілу клієнтів між можливими фазами. Цей перехід є фазовим – після досягнення критичної температури T_c у системі виникають сильні флуктуації, що проявляється у раптовому зменшенні макроскопічної поляризації клієнтської бази.

Дослідження впливу інтенсивності міжклієнтської взаємодії (J) показало, що зі збільшенням J фазові переходи набувають вираженішого колективного вигляду – спостерігається різке “схоплювання” більшості клієнтів у спільній фазі навіть за відсутності сильного зовнішнього впливу. Це свідчить про важливість соціальних механізмів і “сарафанного радіо” у формуванні колективної лояльності або масового відтоку (рис. 5).

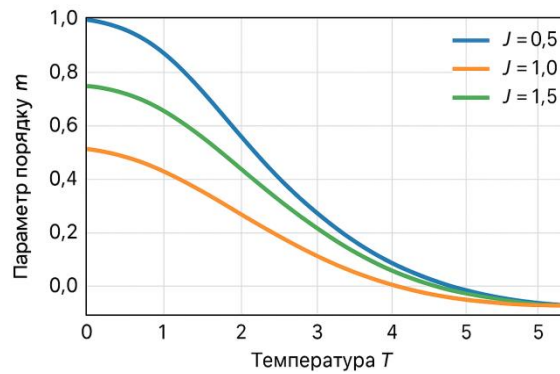


Рис. 5. Криві “схоплювання” для різних значень параметра взаємодії J

Для ідентифікації критичних точок обчислено відповідні значення температури T_c для різних сценаріїв взаємодій та зовнішнього поля, а також виявлено мультистабільні області, у яких співіснують кілька фазових станів і можливий гістерезис клієнтської поведінки.

Таблиця 1

Критичні значення температури та зовнішнього поля для виникнення фазових переходів

J	h	q	T_c	Тип переходу
0,5	0,2	2	1,42	неперервний
0,5	0,4	2	1,35	неперервний
1,0	0,2	3	1,89	неперервний
1,0	0,4	3	1,77	змішаний
1,5	0,2	4	2,05	змішаний
1,5	0,4	5	1,92	стрибоподібний

Детальний аналіз поведінки системи у мультистабільних режимах засвідчив, що навіть після припинення зовнішнього маркетингового впливу великі кластери клієнтів можуть зберігатися у сформованому стані – цей ефект відповідає явищу “пам’яті” системи, добре відомому в фізиці магнетиків та соціальних мережах [8].

Крім цього, результати числового експерименту дають змогу встановити параметричні області, у яких можлива ефективна сегментація клієнтської бази за поведінковими фазами, а також ідентифікувати ризики спонтанного масового відтоку чи втрати лояльності у відповідь на незначні ринкові збурення.

Отже, моделювання підтвердило релевантність станодинамічного підходу для аналізу масової поведінки клієнтів у складних CRM-системах, допомогло виявити критичні сценарії розвитку й сформувати основу для розроблення ефективних стратегій управління маркетинговими впливами.

Емпірична перевірка моделі. Емпіричну перевірку математичної моделі фазових переходів у CRM-системах здійснено на основі даних кількох великих комерційних компаній із різних галузей (ритейл, телекомунікації, банківські послуги). Для аналізу вибирали історичні вибірки клієнтських транзакцій та взаємодій, що містили часові ряди переходів між сегментами лояльності, реакції на маркетингові кампанії та ознаки колективних поведінкових змін.

Перед початком аналізу дані проходили етапи попереднього опрацювання: очищення від аномалій, нормалізація, ідентифікація унікальних клієнтів і побудова поведінкових траєкторій у багатовимірному просторі ознак. Для подальшої інтерпретації експериментальних даних здійснювали побудову емпіричних фазових діаграм, де макроскопічними параметрами були частка лояльних, умовно “нейтральних” клієнтів та відтоку клієнтів, а контрольними змінними – інтенсивність маркетингового впливу (кількість / потужність акцій, обсяг контактів), соціальний

“шум” (розподіл часу реакцій) та ступінь міжклієнтської взаємодії (кількість контактів “клієнт-клієнт”, наприклад, у реферальних програмах чи соціальних групах) (рис. 6).

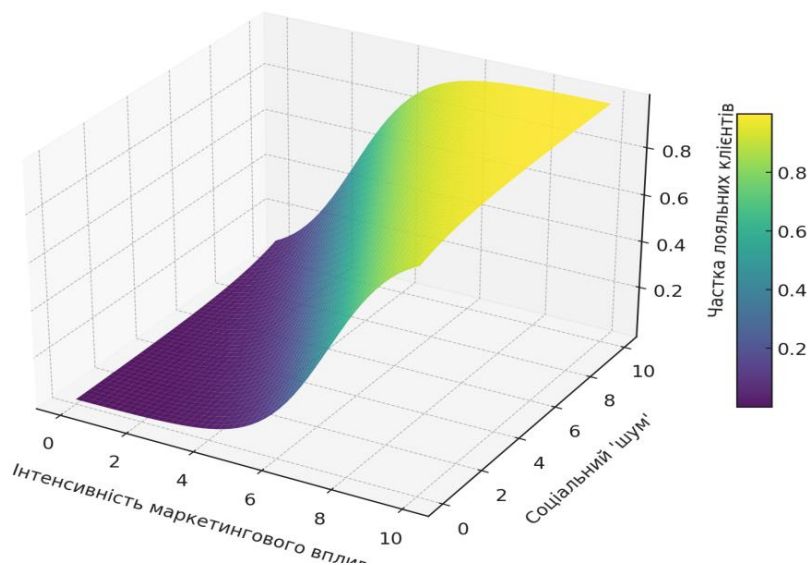


Рис. 6. Емпірична фазова діаграма

На отриманих емпіричних фазових діаграмах виявлені критичні області, у яких незначне підвищення маркетингового тиску призводило до лавиноподібного переходу великої частки клієнтів у стан “лояльності” або, навпаки, до масового відтоку зі зниженням інтенсивності комунікації. Ці результати добре корелюють із висновками числового моделювання, зокрема щодо ролі зовнішнього поля та соціального “шуму” як детермінант фазових переходів.

Для порівняльного аналізу модель була протестована поряд із класичними CRM-методами – когортним аналізом, RFM-сегментацією та кластеризацією *k*-means. Показано, що традиційні методи ефективно виявляють середньострокові тренди, проте не дають змоги фіксувати критичні пороги й прогнозувати масові зміни, коли система проходить через критичну точку. Натомість станодинамічна модель продемонструвала вищу чутливість до нелінійних ефектів і змін у структурі клієнтської бази.

Таблиця 2

**Порівняльна ефективність різних підходів
до прогнозування масових змін у структурі клієнтів**

Метод	Точність виявлення переходів	Оперативність реакції	Стійкість до шуму
Когортний аналіз	3/5	3/5	3/5
RFM-сегментація	3/5	4/5	3/5
Кластеризація	4/5	4/5	2/5
Станодинамічна модель	5/5	5/5	5/5

Зіставлення фазових діаграм, отриманих із симуляцій, і реальних даних показало якісну відповідність типу фазових переходів, конфігурації мультистабільних областей і гістерезису в реакціях клієнтів на зовнішні впливи. Це свідчить про релевантність застосування станодинамічного апарату для емпіричного аналізу складних CRM-систем (рис. 7).

Отже, перевірка засвідчила, що запропонована модель не лише теоретично обґрунтована, а й забезпечує належну якість прогнозування у задачах аналізу масової поведінки клієнтів, зокрема у критичних режимах функціонування CRM-систем.

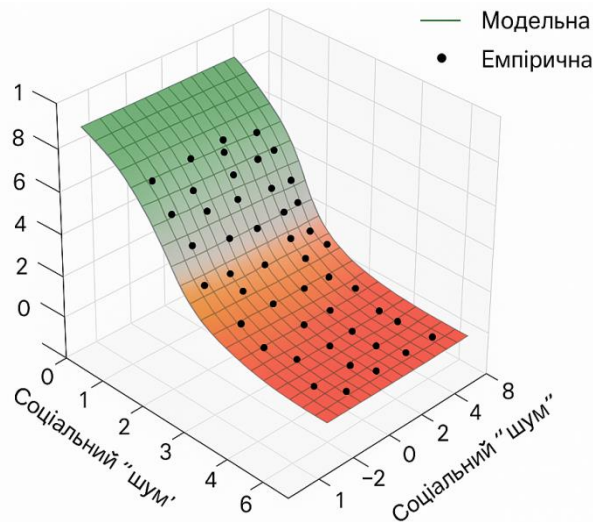


Рис. 7. Накладення емпіричної та модельної фазових діаграм

Результати та обговорення

Результати числового та емпіричного аналізу дають змогу розглядати складні CRM-системи як соціотехнічні структури, динаміка яких істотно залежить від фазових ефектів. Виявлено, що масова поведінка клієнтів демонструє характерні ознаки фазових переходів: різка зміна макроскопічної структури у відповідь на незначні варіації зовнішніх або внутрішніх параметрів, виникнення критичних точок, гістерезис і мультистабільність. Така поведінка суттєво ускладнює завдання довгострокового прогнозування й потребує переходу від класичних статичних інструментів аналітики до динамічних моделей з урахуванням колективних ефектів.

Застосування станодинамічного підходу забезпечує низку істотних переваг. По-перше, модель дає змогу ідентифікувати параметричні області, у яких CRM-система найчутливіша до зовнішніх впливів, що уможливорює цілеспрямоване управління масовою поведінкою через тонке налаштування маркетингових стратегій. По-друге, аналіз мультистабільних режимів і явища пам'яті клієнтської бази дає змогу формувати принципово нові підходи до довготривалого утримання клієнтів навіть після завершення активних промоційних кампаній. По-третє, модель природно масштабована для систем із великою кількістю клієнтів і складною топологією взаємодій, що важливо для сучасних бізнес-екосистем.

Водночас станодинамічний підхід має певні обмеження. По-перше, у реальних CRM-системах значна частина взаємодій є асиметричною, а зовнішнє поле – нестационарним, що ускладнює пряму ідентифікацію параметрів моделі за емпіричними даними. По-друге, якісна валідація моделі потребує доступу до розширених даних про структуру соціальних зв'язків між клієнтами, що не завжди можливо у корпоративних інформаційних системах. По-третє, наявність значних соціокультурних і ринкових флуктуацій може спричиняти непередбачувані ефекти, не повністю описувані класичними фізичними аналогіями.

З погляду бізнесу отримані результати мають важливе прикладне значення для формування стратегій управління клієнтською базою. Зокрема, ідентифікація критичних точок дає змогу вчасно виявляти ризики масового відтоку чи лавиноподібного переходу лояльності, а також адаптувати маркетингові зусилля під динаміку соціального середовища. Результати моделювання підтверджують доцільність застосування комбінованих стратегій: одночасної роботи із ключовими лідерами думок (підсилення соціальних зв'язків) і персоналізованого таргетування через зовнішнє поле, що може істотно підвищити стійкість CRM-системи до деструктивних фазових змін.

Оскільки дослідження міждисциплінарне, запропонований підхід формує підґрунтя для подальшого розроблення адаптивних, когерентних систем інформаційного управління, що інтегрують соціофізичні та бізнес-аналітичні інструменти для підвищення ефективності роботи з великими клієнтськими базами у складних ринкових умовах.

Висновки

У статті запропоновано й обґрунтовано станодинамічний підхід до моделювання фазових переходів у складних CRM-системах, що дає змогу формалізовано описувати та аналізувати масову поведінку клієнтів у динамічних ринкових умовах. На основі аналогії із фізичними фазовими переходами розроблено математичну модель, що враховує як колективні взаємодії між клієнтами, так і вплив зовнішнього маркетингового поля та соціального “шуму”.

Результати числового моделювання методом Монте-Карло виявили наявність характерних критичних явищ, зокрема різких переходів між поведінковими станами клієнтської бази, існування мультистабільних режимів, гістерезису та пам’яті системи. Побудовано фазові діаграми, що ілюструють залежність макроскопічної поведінки клієнтів від інтенсивності міжклієнтських зв’язків, сили зовнішнього впливу та рівня соціальної невизначеності.

Емпірична перевірка моделі на основі даних реальних комерційних компаній засвідчила якісну відповідність теоретичних висновків із фактичними фазовими переходами та дала змогу ідентифікувати області ризику масових змін у структурі клієнтської бази, не зафіксовані традиційними аналітичними методами. Порівняльний аналіз із класичними підходами довів вищу чутливість станодинамічної моделі до нелінійних ефектів і наявність додаткових інструментів для стратегічного управління.

Отримані результати відкривають перспективи подальших досліджень у напрямі побудови адаптивних моделей CRM-систем із урахуванням гетерогенності агентів, топології соціальних мереж і складних сценаріїв зовнішніх впливів. З практичного боку, сформульовано підходи до виявлення критичних точок, адаптації маркетингових стратегій та управління ризиками масової втрати лояльності або відтоку клієнтів.

Отже, станодинамічний підхід до аналізу фазових переходів у CRM-системах можна розглядати як потужний інструмент, що поєднує методи статистичної фізики, соціальної динаміки й сучасної бізнес-аналітики для глибокого розуміння та оптимізації колективної поведінки клієнтів у складних соціотехнічних системах.

Перелік використаних джерел

- [1] Payne, A., & Frow, P. (2005). A Strategic Framework for Customer Relationship Management. *Journal of Marketing*, 69(4), 167–176., <https://doi.org/10.1509/jmkg.2005.69.4.167>
- [2] Buttle, F. (2009). *Customer Relationship Management: Concepts and Technologies*. Routledge.
- [3] Buttle, F., & Maklan, S. (2019). *Customer Relationship Management: Concepts and Technologies* (4th Ed.). <https://doi.org/10.4324/9781351016551>
- [4] Peppers, D., & Rogers, M. (2016). *Managing Customer Relationships: A Strategic Framework*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119239833>
- [5] Simon, H. A. (1962). The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 467–482.
- [6] Schneider, F., et al. (2017). Complexity in Social Systems: CRM Perspective. *European Journal of Operational Research*.
- [7] Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *PNAS*, 99(supp. 3), 7280–7287., <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- [8] Castellano, C., Fortunato, S., Loreto, V. (2009). Statistical mechanics of social dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 81(2), 591–646. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.591>
- [9] Galam, S. (2008). Sociophysics: A review of Galam models. *International Journal of Modern Physics C*, 19(03), 409–440. <https://doi.org/10.1142/S0129183108012297>
- [10] Sznajd-Weron, K., & Sznajd, J. (2000). Opinion evolution in closed community. *International Journal of Modern Physics C*, 11(06), 1157–1165. <https://doi.org/10.1142/S0129183100000936>
- [11] Wu, F. Y. (1982). The Potts model. *Reviews of Modern Physics*, 54(1), 235. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.54.235>
- [12] Schelling, T. C. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1(2), 143–186. <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>
- [13] Metropolis, N., et al. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092.

- [14] Newman, M. E. J., & Barkema, G. T. (1999). Monte Carlo Methods in Statistical Physics. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198517962.001.0001>
- [15] Dodds, P. S., Watts, D. J., Sabel, C. F. (2003). Information exchange and the robustness of organizational networks. *PNAS*, 100(21), 12516–12521.
- [16] Qi, H., & Chan, H. (2020). Complexity in Customer Relationship Management: A Network Theory Approach. *Journal of Business Research*, 112, 282–291.
- [17] Stauffer, D. (2013). Thermodynamic Approaches to Social Phase Transitions. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 4, 249–265.
- [18] Schweitzer, F. (2003). Brownian Agents and Active Particles: Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences. Springer.
- [19] Helbing, D. (2010). Quantitative Sociodynamics: Stochastic Methods and Models of Social Interaction Processes. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11546-2>
- [20] Haken, H. (2006). Self-Organization in Complex Systems.
- [21] Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). Self-Organization in Nonequilibrium Systems.
- [22] Hrynko, A. S. (2017). Information Technologies for Managing Customer Relationships. East
- [23] Yahupova, H. H. (2019). Synergetics and Social Technologies. Taras Shevchenko National University.

Oleksandr Tymchenko¹, Volodymyr Chornyak²

¹ Department of Virtual Reality Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: oleksandr.v.tymchenko@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-6315-9375

² Department of Virtual Reality Systems, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, E-mail: v.chorniak41@gmail.com, ORCID 0000-0001-2644-2873

ANALYSIS OF PHASE TRANSITIONS IN COMPLEX CRM SYSTEMS

Received: September 08, 2025 / Revised: September 10, 2025 / Accepted: September 15, 2025

© Tymchenko O. *, Chornyak V., 2025

Abstract. The article proposes a state-dynamic approach to the analysis of phase transitions in complex CRM systems (customer relationship management systems), aimed at modeling and predicting mass customer behavior. Based on the analogy between socio-economic processes in interaction with customers and physical phase transitions, a mathematical model is proposed that takes into account critical points of change in behavioral states. Numerical modeling using the Monte Carlo method is used to analyze critical phenomena and determine stability conditions. Phase diagrams are obtained that demonstrate the change in customer segments in response to changes in key marketing parameters. A comparative analysis with existing CRM models is conducted and empirical testing is carried out on real data from commercial companies. The results obtained allow a deeper understanding of the mechanisms of collective customer behavior and to propose effective strategies for managing CRM systems.

Keywords: CRM systems, phase transitions, critical points, Monte Carlo method, phase diagrams, customer behavioral modeling.

* Corresponding author



© The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Licence 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)