

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ

Е.П. ОХАПКИНА^{1,2}, В.П. ОХАПКИН³, Р.В. МЕЩЕРЯКОВ⁴,
А.О. ИСХАКОВА⁴, А.Ю. ИСХАКОВ^{4,5}

¹ Российский государственный гуманитарный университет
125047, Россия, Москва, Миусская площадь, 6

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

³ Центр экспертно-аналитических и информационных технологий СП РФ
119021, Россия, Москва, Zubovskiy bul., 21, стр. 3

⁴ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65

⁵ Московский институт электроники и математики
123458, Россия, Москва, ул. Таллинская, 34

Аннотация. Социальная сеть как инструмент глобальной коммуникации различных слоев общества в разных странах все больше перестает быть таковым и превращается в социально-политический актив в борьбе за специфические интересы группы лиц, способных приобрести и/или управлять этим активом. В работе использованы данные о работе ряда сообществ русско-украинского сегмента социальной сети «ВКонтакте».

Целью исследования является формализация деятельности сообщества (группы) социальной сети. Сообщество рассматривается с позиции инструмента формирования мнений и агрессивного влияния на отдельно взятую персону, некоторую малую или широкую общность, актуализируется вопрос об использовании информационно-коммуникационных технологий в деструктивном ключе. Протекающие в сообществе социальной сети процессы показаны в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Система исследуется на устойчивость по методу функций Ляпунова. Одна из решаемых задач исследования – выявление и характеристика пограничных режимов, при которых функционирование сообщества переходит от стабильного состояния к хаосу. Рассмотрена имитационная модель построенной динамической системы при различных начальных условиях имитации. Применение средств математической физики для описания процессов киберфизических систем, в том числе в задаче оценки текстовых сообщений с признаками агрессии, в среде распределенных вычислений позволяет оценить траекторию их развития при различных начальных условиях.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, социальные сетевые сервисы, системная динамика, информационно-коммуникационные технологии, анализ устойчивости, имитационное моделирование, динамическое равновесие

Статья поступила в редакцию 17.03.2022

Принята к публикации 31.03.2022

Для цитирования. Охупкина Е.П., Охупкин В.П., Мещеряков Р.В., Исхакова А.О., Исхаков А.Ю. Динамическая система функционирования сообществ социальной сети // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 2 (106). С. 41–71. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-41-71

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в направлении анализа агрессивности высказываний достаточно активно изучаются в академических школах разных стран. Среди часто применяемых методов анализа встречаются различные архитектуры нейронных сетей для выявления контента,

содержащего деструктивную информацию [1–5]. В том числе применяются методы, основанные на использовании вероятностных подходов [4]. Другие подходы к глубокому анализу текстов связаны с классическим использованием математических методов, например, машины опорных векторов [6]. Исследования методом релевантного поиска, например, с применением латентно-семантического анализа, также существуют исследования, направленные на развитие методов факторизации матриц в задачах работы сетей электронной коммерции [7]. В статье Ма и др. рассматривается проблема объединения механизма рекуррентных нейронных сетей с использованием процедуры оценки внимания. Идея состоит в том, чтобы использовать данные о долговременной памяти рекуррентной нейронной сети и ряд особенностей, которые могут характеризовать контекст того, что описано в тексте. Существуют также исследования, связанные с поиском саркастических высказываний в тексте. Например, работа Кумара и др. [2]. В нем авторы показывают использование двунаправленной нейронной сети (LSTM). В исследовании Ксю и др. [8] показан метод использования онтологии для задачи сравнения понятий, используемых в тексте. Такой подход позволяет решить проблему неопределенности терминов. В дополнение к приведенным выше исследованиям по текстовой аналитике в области социальных сетей мы отмечаем обзор работ (которые также включают в себя вышеуказанные исследования) по этой теме, показанный в статье Жао и др. [9] «Специальная редакция раздела IEEE Access: передовые методы интеллектуального анализа данных для социальных вычислений».

Данное исследование, как и все вышеописанные, основывается на выявлении специфических реакций пользователей на размещаемый в социальной сети контент, определении параметров для моделирования предметной области и установлении взаимосвязей между ними. Рассмотрим протекающие в сообществе социальной сети процессы в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Построим имитационную модель динамической системы при различных начальных условиях имитации.

Цель и задачи исследования

Цель – формализация киберфизической системы социальной сети в форме уравнений математической физики. Построение имитационной модели разработанной динамической системы при различных начальных условиях имитации.

Задачи исследования:

1. Для всех определенных параметров системы сообществ социальной сети установить взаимозависимости, описываемые дифференциальными уравнениями.
2. Исследовать устойчивость динамической системы.
3. Составить характеристическое уравнение.
4. Найти точки равновесия и описать их классификацию.
5. Построить имитационную модель разработанной динамической системы и привести модельные сценарии.

Примем, что в рамках моделирования предметной области для системы сообществ социальной сети (далее в тексте будем использовать аббревиатуру ССС) определены три обязательных параметра:

1. L – общее количество отметок «нравится» (*англ.* like) за анализируемый период времени t .
2. P – общее количество подписчиков (постоянных читателей) для ССС за анализируемый период времени t .
3. S – общее количество сообщений в ССС вне зависимости от адресатов и получателей за анализируемый период времени t .

Каждый из приведенных параметров участвует в процессах системы ССС. Таким образом, для каждого параметра может быть определен закон его изменения, который в рамках математической постановки будет представлен характеристическим уравнением. Пусть

l_i – количество отметок *like* для одной произвольной записи («поста») ССС. Тогда параметр L может быть определен как сумма отметок *like* для всех постов ССС, имеющий вид (1):

$$L = \sum_{i=1}^n l_n, \quad (1)$$

где n – количество записей в ССС за анализируемый период времени t , i – порядковый номер записи.

Размер постоянной аудитории ССС напрямую зависит от уровня интереса и привлекательности публикаций, поставляемых сообществом. В качестве параметра, определяющего читательский интерес аудитории ССС, предлагается использовать введенный ранее показатель l_i . Пусть l_j – количество посетителей, ставших подписчиками целевого ССС после просмотра одной произвольной публикации. В этом случае параметр P может быть определен в виде записи (2):

$$P = \frac{\sum_{i,j=1}^{n,m} l_i p_j}{\gamma}, \quad (2)$$

где m – количество наборов посетителей, ставших подписчиками после просмотра одной произвольной публикации; j – порядковый номер публикации; γ – коэффициент негативного восприятия публикации j аудиторией, который может быть интерпретирован как доля негативных отзывов/комментариев о публикации j , при этом $\gamma \in [1, \dots, 9]$.

Для описанного набора параметров предполагается зависимость вида (3):

$$\gamma \rightarrow 0 \Rightarrow P \rightarrow \infty, \quad (3)$$

Таким образом, очевидно, что наименьший коэффициент негативного восприятия публикации j аудиторией приводит к увеличению числа посетителей, ставших подписчиками сообщества после прочтения публикации j .

В рамках математического моделирования предметной области предполагается, что в ССС возможность обмена сообщениями доступна руководству и пользователям, которые имеют статус подписчиков сообщества. Пусть s – количество сообщений, инициируемых одним подписчиком сообщества, а r – количество сообщений, инициируемых одним членом руководства сообщества. Далее предположим, что каждый из подписчиков и членов руководства сообщества может с некоторой вероятностью h начать обмен сообщениями. В этом случае для параметра S следует считать справедливым равенство вида (4):

$$S = \frac{(P_s + R_r)h}{\mu} - \vartheta, \quad (4)$$

где $R \in N$ – количество членов руководства сообщества; μ – технический коэффициент загруженности сети, $\mu \in (1, \dots, 1.8]$; ϑ – доля погрешности или количество сообщений, не дошедших до адресата ввиду проблем на технической стороне сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для всех ранее определенных параметров ССС могут быть установлены взаимозависимости, описываемые дифференциальными уравнениями.

Количество отметок типа «like» в сообществе зависит от качества и характера восприятия аудиторией поставляемых сообществом публикаций. С учетом данного фактора пред-

лагается описать закон изменения общего количества отметок типа «like» через коэффициенты негативного и положительного восприятия постоянной аудиторией генерируемого сообществом контента. Введение нового коэффициента положительного восприятия публикаций аудиторией позволяет описать закон изменения отметок типа «like» в виде уравнения (5):

$$\frac{dL}{dt} = \omega(L + P + S) - \gamma L, \quad (5)$$

где $\omega = [1, \dots, 9]$ – коэффициент положительного восприятия аудиторией публикаций сообщества.

Здесь предполагается, что отметки типа «нравится» могут выставять только участники, являющиеся подписчиками сообщества. В данном случае количество сообщений S следует считать косвенным показателем активности аудитории, ввиду чего в законе изменения количества отметок типа «нравится» значение данного параметра учитывается наравне с количеством подписчиков P .

В рамках моделирования предполагается, что размер постоянной аудитории будет изменяться в зависимости от общего числа отметок типа «like», а общее количество сообщений в сообществе никаким образом не влияет на размер постоянной аудитории, что может быть описано уравнением вида (6):

$$\frac{dP}{dt} = \omega L - 2\gamma P. \quad (6)$$

В данном случае влияние коэффициента негативного восприятия публикаций будет иметь вдвое большее значение, поскольку он является определяющим в решении читателя публикации стать членом постоянной аудитории ССС.

Подразумевается, что в ССС обмен сообщениями могут инициировать только подписчики и члены руководства сообщества. В этом случае закон изменения общего количества сообщений будет описан уравнением вида (7):

$$\frac{dS}{dt} = RP - \frac{\omega L}{\gamma}. \quad (7)$$

Все описанные законы изменения для каждого из целевых параметров дают возможность описать процессы ССС в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, которая выражает баланс между доступными параметрами ССС. Таковая система уравнений записана в виде (8):

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = \omega(L + P + S) - \gamma L \\ \frac{dP}{dt} = \omega L - 2\gamma P \\ \frac{dS}{dt} = RP - \frac{\omega L}{\gamma} \end{cases} \quad (8)$$

Исследование устойчивости динамической системы. Характеристическое уравнение. Точки равновесия и их классификация

Для полученной системы ДУ, выражающей баланс между целевыми параметрами ССС (8), может быть проведено исследование на устойчивость. Для решения задачи ис-

следования устойчивости предлагается использовать метод функций Ляпунова (прямой метод), который дает возможность судить об устойчивости системы на основе использования вводимых функций, именуемых функциями Ляпунова, без поиска решения системы [10, 11, 12, 13].

Далее предлагается рассмотреть общую идеологию и математические положения метода функций Ляпунова с ключевыми определениями.

Пусть имеется некоторая функция нескольких переменных вида (9):

$$V = V(v_1, v_2, \dots, v_n). \quad (9)$$

Таковую функцию будем называть знакоопределенной в произвольной области, если она во всех точках этой области вокруг начала координат сохраняет исходный знак и нигде не принимает нулевое значение, помимо начала координат, что соответствует (10):

$$(V(\bar{0}) = 0). \quad (10)$$

Если функция V обращается в нулевое значение в любой точке координатной плоскости независимо от начала координат, но ее знак при этом сохраняется, в этом случае функция V именуется знакопостоянной.

Функция V будет именоваться знакопеременной, если в целевой области вокруг начала координат постоянство знака не сохраняется.

Трактовка ключевой терминологии в вопросах разновидности функции V дает возможность рассмотреть положения Ляпунова об устойчивости нелинейных систем.

Пусть имеется исходная система дифференциальных уравнений n -го порядка, описываемая как (11):

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \varphi_1(v_1, v_2, \dots, v_n) \\ \frac{dv_2}{dt} = \varphi_2(v_1, v_2, \dots, v_n), \\ \vdots \\ \frac{dv_n}{dt} = \varphi_n(v_1, v_2, \dots, v_n) \end{cases} \quad (11)$$

Если для системы (11) может быть подобрана такая знакоопределенная функция (12)

$$V(v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (12)$$

для которой ее производная по времени вида (13)

$$W(v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (13)$$

будет точно так же знакоопределенной либо знакопостоянной, но будет иметь противоположный функции (12) знак, то в этом случае следует исходную систему (11) охарактеризовать как устойчивую.

Принимая допущение, что функция V знакоопределена и положительна, условия теоремы Ляпунова могут быть сформулированы в более однозначной интерпретации.

Чтобы судить об устойчивости положения равновесия, достаточно наличие дифференцируемой функции Ляпунова вида (12), которая удовлетворяет в пределах окрестности начала координат следующему набору условий:

1. $V(v_1, v_2, \dots, v_n) \geq 0$, при этом $V = 0$ при условии выполнения равенства (14)

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \bar{0}, \quad (14)$$

2. Производная функция по времени, описываемая как (15)

$$\frac{dV(\bar{v})}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial v_i} \frac{dv_i}{dt} = \left(\frac{dv_1}{dt}, \frac{dv_2}{dt}, \dots, \frac{dv_n}{dt} \right) \begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dv_n}{dt} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

в силу ДУ вида $\frac{dV(\bar{v})}{dt} = \bar{\varphi}(\bar{v})$ будет охарактеризована как отрицательная знакопостоянная функция, что описывает (16):

$$\frac{dV(\bar{v})}{dt} = \text{grad} \bar{V} \cdot \frac{d\bar{v}}{dt} = \text{grad} \bar{V} \cdot \bar{\varphi}(\bar{v}) \leq 0, \quad (16)$$

где $t \geq t_0$.

На основании вышеописанных положений имеется возможность определить явные условия устойчивости по методу функций Ляпунова.

Если функция V положительна и знакоопределена, а также если справедливо (17)

$$\frac{dV(\bar{v})}{dt} \leq 0, \quad (17)$$

то выполняется достаточное условие устойчивости.

Если $\frac{dV(\bar{v})}{dt}$ можно охарактеризовать как отрицательно определенную, то следует говорить о выполнении достаточного условия асимптотической устойчивости.

Достаточное условие устойчивости в целом описывает запись вида (18):

$$\frac{dV(\bar{v})}{dt} \leq 0. \quad (18)$$

Итоговый алгоритм исследования системы на устойчивость по методу функций Ляпунова:

1. Определить функцию Ляпунова для системы n -го порядка (n – количество переменных).
2. Отыскать частные производные по переменным.

3. Рассчитать производную функции по времени $\frac{dV(\bar{v})}{dt}$, определить знак этой производной.

Аргументирование в пользу выбора метода Ляпунова для анализа целевой системы на устойчивость может быть основано на следующих преимуществах применительно к задаче исследования:

1. К выбору функции V не предъявляются строгие требования, что позволит подобрать оптимальную функцию для динамической системы ССС.

2. Универсальность метода функций ввиду отсутствия жесткой привязки к линеаризации.

Система (8) может быть представлена в наиболее традиционном представлении, для этой цели предлагается произвести следующие замены: $L \rightarrow x$, $P \rightarrow y$, $S \rightarrow z$. В этом случае исходная система будет иметь вид (19):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \omega(x + y + z) - \gamma x \\ \frac{dy}{dt} = \omega x - 2\gamma y \\ \frac{dz}{dt} = Ry - \frac{\omega x}{\gamma} \end{cases} \quad (19)$$

Для исследования устойчивости необходимо свести систему к частному случаю. Будем считать, что коэффициент положительного восприятия публикаций аудиторией $\omega = 6$; коэффициент негативного восприятия публикаций аудиторией $\gamma = 3$; количество членов руководства сообщества $R = 4$. Тогда частный случай для системы (19) будет описывать (20):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 3x + 6y + 6z \\ \frac{dy}{dt} = 6x - 6y \\ \frac{dz}{dt} = 4y - 2x \end{cases} \quad (20)$$

В этом случае матрица A , описывающая систему (20), будет иметь вид (21):

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 6 & 6 \\ 6 & -6 & 0 \\ -2 & 4 & 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

С целью автоматизации вычислительных операций далее будет использоваться программный пакет для проведения технических вычислений MATLAB.

Коэффициенты характеристического уравнения для целевой системы могут быть найдены с помощью специальной функции **poly()**, аргументом которой является матрица. Применение этой функции возвращает результат, записанный в переменной $ans = [1 \ 3 \ -42 \ -72]$.

Таким образом, характеристическое уравнение для системы (20) будет записано в виде (22):

$$p^3 + 3p^2 - 42p - 72 = 0. \quad (22)$$

На практике задача исследования системы на устойчивость сводится к выбору некоторой положительно определенной и симметричной матрицы X и решению уравнения Ляпунова относительно искомой матрицы Q , что описано в (23):

$$AQ + QA^T = -X. \quad (23)$$

Для постановки уравнения Ляпунова введем матрицу Q , которая заведомо положительно определена и симметрична, что описано в (24):

$$Q = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Для решения уравнения Ляпунова в MATLAB имеется специальная функция **lyap()**. Посредством функции **eig()** для полученной матрицы X может быть найдено множество собственных значений λ вида (25):

$$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n). \quad (25)$$

По результатам применения функции **eig()** к найденной матрице X было получено множество ее собственных значений в виде их вектора, что отражено в (26):

$$\lambda = \begin{pmatrix} 2.5525 \\ -1.0147 \\ 0.2632 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Ввиду справедливости (27)

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1.7687 \neq 0, \quad (27)$$

следует говорить о выполнении достаточного условия устойчивости матрицы A , а следовательно, и системы (20) в целом. Поскольку $\lambda_2 = -1.0147$, следует говорить об отсутствии асимптотической устойчивости для матрицы A и системы (20) в целом.

Произведем анализ устойчивости системы на основе корней характеристического уравнения. Корни могут быть получены по результатам решения уравнения (22) либо путем применения функции **eig()** к исходной матрице A . Корни характеристического уравнения описаны в (28):

$$x_1 = -7.372; \quad x_2 = 6.000; \quad x_3 = -1.628. \quad (28)$$

Корни (28) в терминологии анализа устойчивости именуются показателями Ляпунова. Согласно положениям методологии исследования системы на устойчивость на основе показателей Ляпунова [14] состояние равновесия системы устойчиво только в том случае, если все найденные корни уравнения *затухают* (отрицательны). Наличие хотя бы одного положительного корня (в настоящем случае $x_2 = 6$) свидетельствует о неустойчивости состояния равновесия. Таким образом, достаточное условие устойчивости (27) для иссле-

дуемой системы не является необходимым и не может быть принято как объективный критерий оценки устойчивости для системы (20).

На основе показателей Ляпунова (28) может быть сделан вывод типовой принадлежности особой точки. Согласно принципу классификации [15, 16] действительные корни разных знаков идентифицируют особую точку типа *седло* со значениями на комплексной плоскости и переходным процессом.

Таким образом, была решена задача исследования системы (20) на устойчивость на основе метода функций Ляпунова, не прибегая к непосредственному поиску решения исходной системы.

Нелинейная компонента

Отметим, что динамическая система (19) линейна. Это означает, что она может описывать лишь экспоненциальный рост или экспоненциальную убыль входящих в нее переменных. В действительности наблюдать экспоненциальный закон изменения переменных можно лишь на самых начальных этапах эволюции системы, когда переменные еще очень близки к положению равновесия и нелинейными слагаемыми можно пренебречь. Таким образом, для того, чтобы система уравнений (19) корректно описывала процессы, происходящие в социальных сетях, добавим ко второму уравнению слагаемое $-\gamma P^2$, которое описывает сильное негативное восприятие контента. Это слагаемое можно интерпретировать, как то, что люди рассказывают друг другу и передают между собой негативное восприятие контента.

Тогда исходная система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений (ОДУ) имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = \omega(L + P + S) - \gamma L \\ \frac{dP}{dt} = \omega L - \gamma P(1 + P) \\ \frac{dS}{dt} = RP - \frac{\omega}{\gamma} L \end{cases} \quad (29)$$

Для поиска особых точек необходимо решить систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\omega(L_{\text{equil.}} + P_{\text{equil.}} + S_{\text{equil.}}) - \gamma L_{\text{equil.}} = 0. \quad (30.1)$$

$$\omega L_{\text{equil.}} - \gamma P_{\text{equil.}}(1 - P_{\text{equil.}}) = 0. \quad (30.2)$$

$$RP_{\text{equil.}} - \frac{\omega}{\gamma} L_{\text{equil.}} = 0. \quad (30.3)$$

Здесь $L_{\text{equil.}}$, $P_{\text{equil.}}$, $S_{\text{equil.}}$ – значения переменных, при которых система находится в равновесии. Из уравнения (30.3) выразим

$$L_{\text{equil.}} = \frac{\gamma R}{\omega} P_{\text{equil.}} \quad (31)$$

Подставим (31) в уравнение (30.2): $\omega \frac{\gamma R}{\omega} P_{\text{equil.}} - \gamma P_{\text{equil.}}(1 - P_{\text{equil.}}) = 0.$

Преобразуем к виду $P_{equil.} [\gamma(R-1) - \gamma P_{equil.}] = 0$.

Очевидно, что это уравнение имеет два корня:

$$P_{equil.}^1 = 0, \quad (32.1)$$

$$P_{equil.}^2 = R - 1. \quad (32.2)$$

Подставив (32.1) в уравнения (30.1–30.3), получим $L_{equil.}^1 = 0$ и $S_{equil.}^1 = 0$. Тогда первая особая точка (положение равновесия) системы ОДУ (29) примет вид:

$$\begin{cases} P_{equil.}^1 = 0 \\ L_{equil.}^1 = 0 \\ S_{equil.}^1 = 0 \end{cases} \quad (33)$$

Полученную особую точку будем называть тривиальной.

Найдем вторую особую точку. Для этого подставим (32.2) в (31) откуда получим

$$L_{equil.}^2 = \frac{\gamma R}{\omega} P_{equil.}^2 = \frac{\gamma R(R-1)}{\omega}. \quad (34)$$

Теперь подставим (34) и (32.2) в (30.1):

$$\begin{aligned} \omega(L_{equil.}^2 + P_{equil.}^2 + S_{equil.}^2) - \gamma L_{equil.}^2 &= 0 \\ \omega P_{equil.}^2 + (\omega - \gamma)L_{equil.}^2 + \omega S_{equil.}^2 &= 0 \\ S_{equil.}^2 &= \frac{(\gamma - \omega)}{\omega} L_{equil.}^2 - P_{equil.}^2 \\ S_{equil.}^2 &= (R-1) \left[\frac{(\gamma - \omega)\gamma R}{\omega^2} - 1 \right] \end{aligned}$$

Тогда окончательно вторая особая точка примет вид:

$$\begin{cases} P_{equil.}^2 = R - 1 \\ L_{equil.}^2 = \frac{\gamma R(R-1)}{\omega} \\ S_{equil.}^2 = (R-1) \left[\frac{(\gamma - \omega)\gamma R}{\omega^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (35)$$

При начальных параметрах, например $R = 5$, $\omega = 1$, $\gamma = 4$, система (35) запишется как $P_{equil.}^2 = 4$, $L_{equil.}^2 = 80$, $S_{equil.}^2 = 236$. Покажем результаты моделирования на рисунке 1.

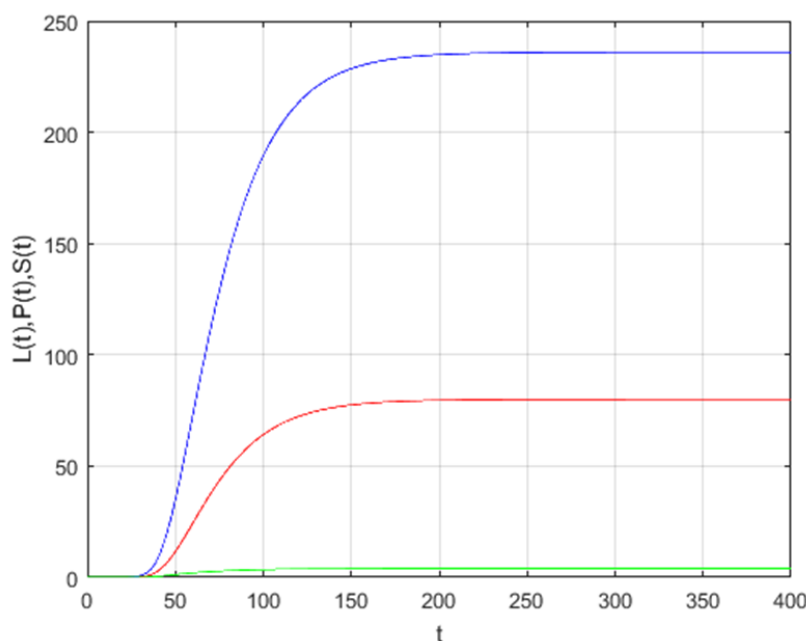


Рис. 1. Изменение переменных L , P и S при $R=5$, $\omega=1$, $\gamma=4$

Исследуем устойчивость положений равновесия (33) и (35), для чего перепишем исходную систему уравнений (29) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = f_1(L, P, S) = \omega(L + P + S) - \gamma L \\ \frac{dP}{dt} = f_2(L, P, S) = \omega L - \gamma P(1 + P) \\ \frac{dS}{dt} = f_3(L, P, S) = RP - \frac{\omega}{\gamma} L \end{cases}$$

Тогда Якобиан системы примет вид:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial L} & \frac{\partial f_1}{\partial P} & \frac{\partial f_1}{\partial S} \\ \frac{\partial f_2}{\partial L} & \frac{\partial f_2}{\partial P} & \frac{\partial f_2}{\partial S} \\ \frac{\partial f_3}{\partial L} & \frac{\partial f_3}{\partial P} & \frac{\partial f_3}{\partial S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega - \gamma & \omega & \omega \\ \omega & -\gamma - 2\gamma P_{equil.} & 0 \\ -\frac{\omega}{\gamma} & R & 0 \end{pmatrix}.$$

Легко заметить, что Якобиан зависит от $P_{equil.}$, тогда для тривиальной особой точки (33) матрица линеаризации имеет вид:

$$J_1 = \begin{pmatrix} \omega - \gamma & \omega & \omega \\ \omega & -\gamma & 0 \\ -\frac{\omega}{\gamma} & R & 0 \end{pmatrix}.$$

В свою очередь особая точка (35), описывающая насыщение переменных, получит матрицу линеаризации вида:

$$J_2 = \begin{pmatrix} \omega - \gamma & \omega & \omega \\ \omega & -\gamma - 2\gamma(R-1) & 0 \\ -\frac{\omega}{\gamma} & R & 0 \end{pmatrix}.$$

Собственные числа матрицы J_1 при $R=5$, $\omega=1$, $\gamma=4$ равны $-3,6490 + 0,3308i$, $-3,6490 - 0,3308i$, $0,2980 + 0,0000i$. Наличие корней с положительной действительной частью говорит о том, что тривиальное положение равновесия будет неустойчиво по отношению к малым возмущениям. Собственные же числа матрицы J_2 при таких же значениях параметров R , ω и γ равны $-36,0261$, $-2,2961$ и $-0,0378$. Все корни для J_2 имеют отрицательную действительную часть – особая точка устойчива при данных параметрах. Таким образом, фазовая траектория переходит из окрестности неустойчивой тривиальной особой точки $(0,0,0)$ в окрестность устойчивой особой точки $(4,80,236)$, как это показано на рисунке 2.

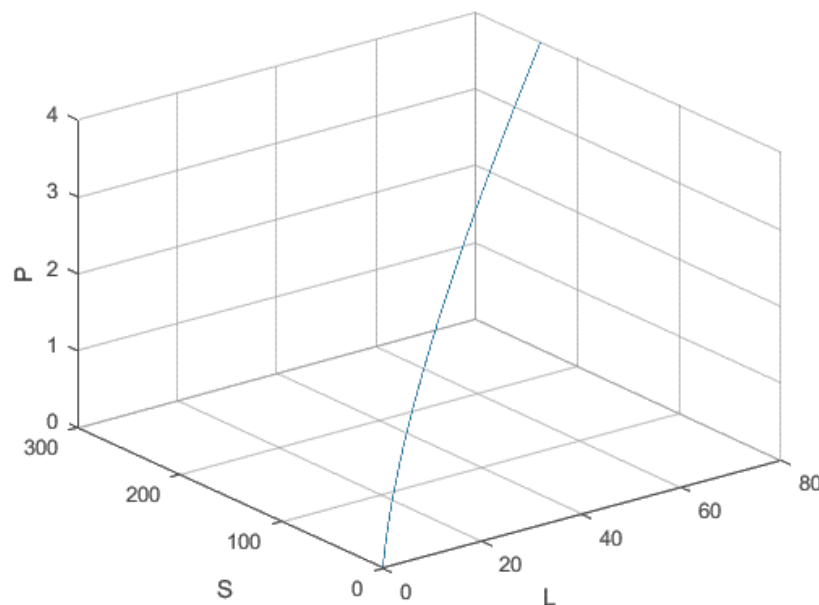


Рис. 2. Траектория в трехмерно фазовом пространстве при $R=5$, $\omega=1$, $\gamma=4$
(траектория движения – снизу вверх)

Из проведенного выше анализа хорошо видно, что при $R=0$ тривиальное положение равновесия устойчиво, а при $R=5$ оно теряет устойчивость. В таком случае малые отклонения от тривиального положения равновесия начинают экспоненциально нарастать с течением времени, однако их рост оказывается ограничен. Дело в том, что при $R=5$ существует еще одно положение равновесия, которое оказывается устойчивым и фазовая траектория притягивается к нему. Кроме того, R по сути является единственным параметром модели, которым можно управлять, т.е. сделать его зависящим от времени $R=R(t)$.

Суть предлагаемого управления состоит в том, чтобы перевести значение параметра из $R = 0$ в $R = 5$ с течением времени. Наиболее очевидным кажется резкий (мгновенный) переход из 0 в 5, например, с использованием функции Хевисайда, сдвинутой во времени и помноженной на требуемое значение (в данном случае на 5).

Однако используемая нами модель (29) нелинейная, поэтому отыскание ее решения возможно лишь численными методами. Хорошо известно, что численные методы плохо справляются с резкими скачками параметров. Действительно, при моделировании системы (29) с мгновенным изменением параметра R от 0 до 5 численная схема Рунге-Кутты 4-го порядка оказывается неустойчивой, каким бы мы ни выбирали шаг интегрирования.

Поэтому переход от 0 к 5 необходимо «сгладить», например, с применением гиперболического тангенса:

$$R(t) = \frac{R_{\max}}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right) \right). \quad (36)$$

Здесь $R_{\max}$ – значение параметра, к которому мы стремимся (в данном случае $R_{\max} = 5$), t_0 – момент, в который происходит переключение параметра, τ – параметр сглаживания перехода, чем больше этот параметр, тем более гладким будет переход от 0 к $R_{\max}$.

График зависимости $R(t)$ при $R_{\max} = 5$, $t_0 = 100$, $\tau = 50$ показан на рисунке 3.

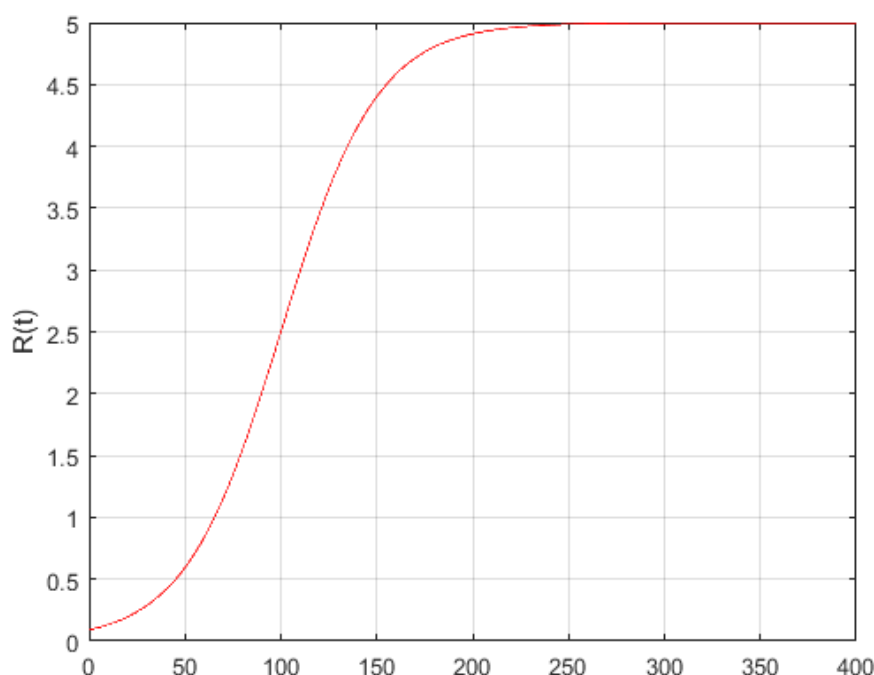


Рис. 3. График зависимости $R(t)$ при $R_{\max} = 5$, $t_0 = 100$, $\tau = 50$.

На рисунке 4 показана динамика системы при R , подчиняющемся закону изменения гиперболического тангенса.

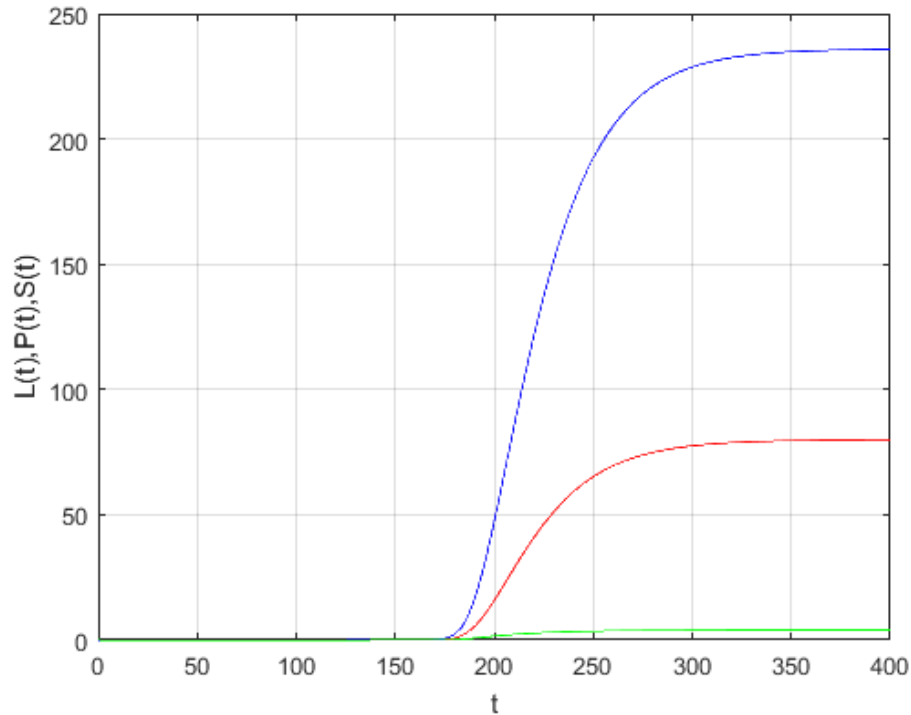


Рис. 4. Динамика системы при R , подчиняющемся закону изменения гиперболического тангенса

Из рисунка 4 видно, что динамическая система действительно начинает переходить в устойчивое положение равновесия, однако это происходит с задержкой (напомним, что $t_0 = 100$).

Эту задержку во времени лучше видно на рисунке 5, где изображены два графика $R(t)$ и $L(t)$.

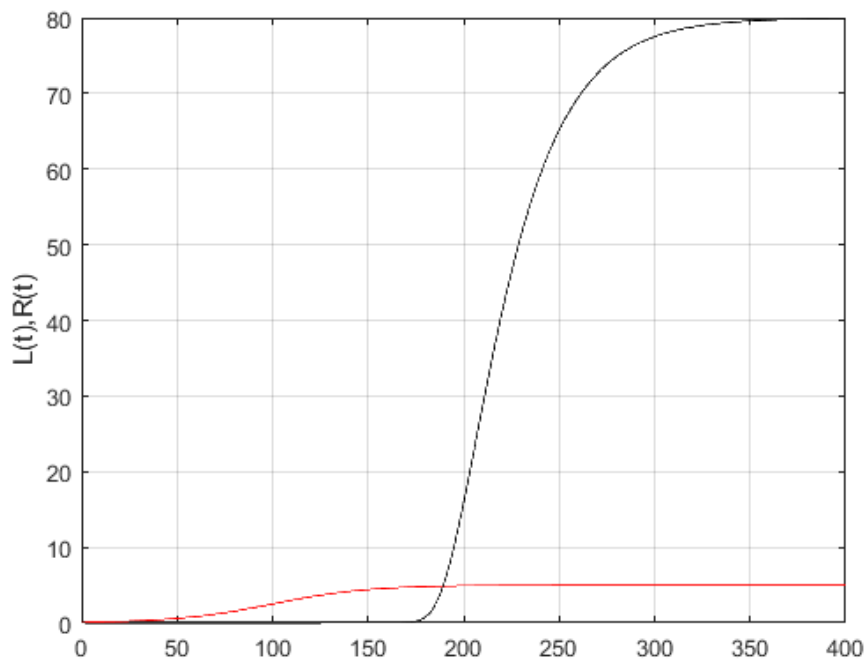


Рис. 5. Динамика системы с задержкой по времени

Проведем теперь моделирование при тех же параметрах, но теперь $R_{\max} = 10$. На рисунке 6 показана зависимость этого параметра от времени в этом случае.

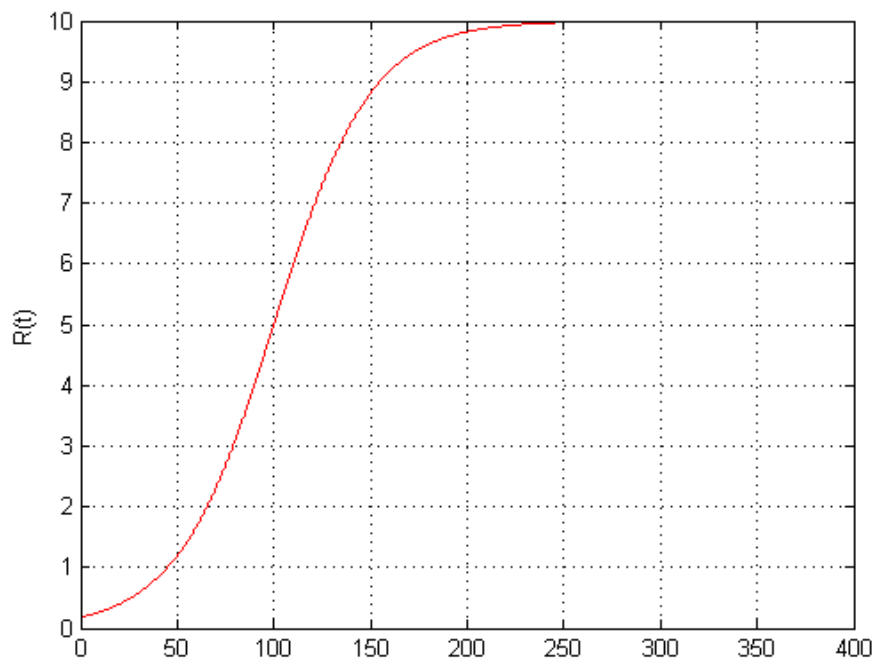


Рис. 6. Зависимость $R(t)$ при $R_{\max} = 10$

Динамика всей системы имеет вид, показанный на рисунке 7.

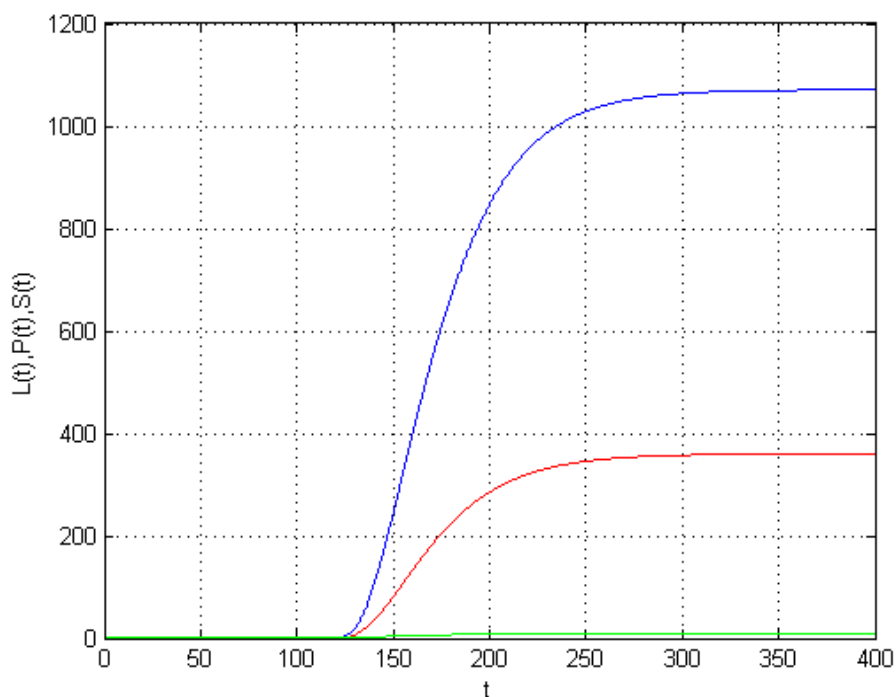


Рис. 7. Динамика системы при $R_{\max} = 10$

На рисунке 7 хорошо видно, как при этих параметрах система реагирует с запаздыванием на рост управляющего параметра R .

Таким образом, система уравнений, дополненная нелинейным слагаемым, описывает переход из тривиальной особой точки в точку, где переменные испытывают насыщение (нетривиальная особая точка). Положение нетривиальной особой точки в фазовом пространстве зависит от параметров модели. В реальной ситуации можно управлять параметром $R(t)$. Подобрано управление этим параметром. Серия численных экспериментов показала, что изменение этого параметра во времени эффективно влияет на динамику социальной сети, однако существует некоторая задержка в реакции социальной сети на изменение параметра $R(t)$, которую необходимо учитывать в реальной ситуации.

Данные социальной сети

В исследовании используется информация об открытой переписке в сообществах социальной сети «ВКонтакте». Временной период сообщений, в который пользователи оставляли сообщения в открытых сообществах, относится к 2014 году. В БД также отражены метаданные: дата и время переписки (диалога), идентификаторы пользователей участников, отметки «нравится», характеристики профиля пользователя и другие параметры. Визуальный анализ собранных данных говорит о том, что от 80 до 85% сообщений в форме постов или комментариев к ним представлены короткими репликами и носят нейтральный характер, в том числе содержащие нецензурную лексику. Также можно обнаружить сообщения, выражающие явно негативное отношение к оппоненту – агрессивные высказывания. Тематика сообщений за весь период сбора данных различна и преимущественно носит нейтральный характер, например, обсуждение направлений музыки. В БД можно встретить отдельные сегменты постов и комментариев к ним на политические темы с длинной веткой диалога и количеством участников более двух. Сбор информации о деятельности сообщества осуществлялся в русскоязычном сегменте социальной сети. Отметим, что этот период времени характеризуется эскалацией напряженности в российско-украинских отношениях, что также проявляется в общественном дискурсе. Часто в базе данных встречаются полноценные разделы обсуждения политических отношений между двумя странами.

Данные представлены в форме реляционной базы данных (далее для краткости будем использовать общеизвестное сокращение: БД) и собраны при помощи специализированной программы-обходчика¹ сайтов.

База данных

Проход программы-обходчика сопровождался одновременной записью в базу данных на платформе Microsoft SQL Server 2012. Структурно записи в исходной² БД представлены девятью таблицами. На рисунке 8 показана схема таблиц в базе данных. Негативным фактором, который создает риски нарушения целостности данных полученной исходной БД, является последовательный сбор записей для каждой таблицы. Попытка организовать связи по ключевым полям между несколькими таблицами образует связи «многие ко многим».

¹ На момент написания статьи большинство социальных сетей обладают инструментами разработчика. Например, application programming interface. Этот инструмент позволяет запрашивать и получать информацию о параметрах социальной сети напрямую без использования сторонних средств типа программ-обходчиков сайтов.

² Далее и всюду БД, полученную сразу после того, как отработала программа-обходчик, будем называть исходной БД. В исходной БД нет каких-либо связей по ключевым полям; к ней не применялись какие-либо процедуры по улучшению или обогащению данных.

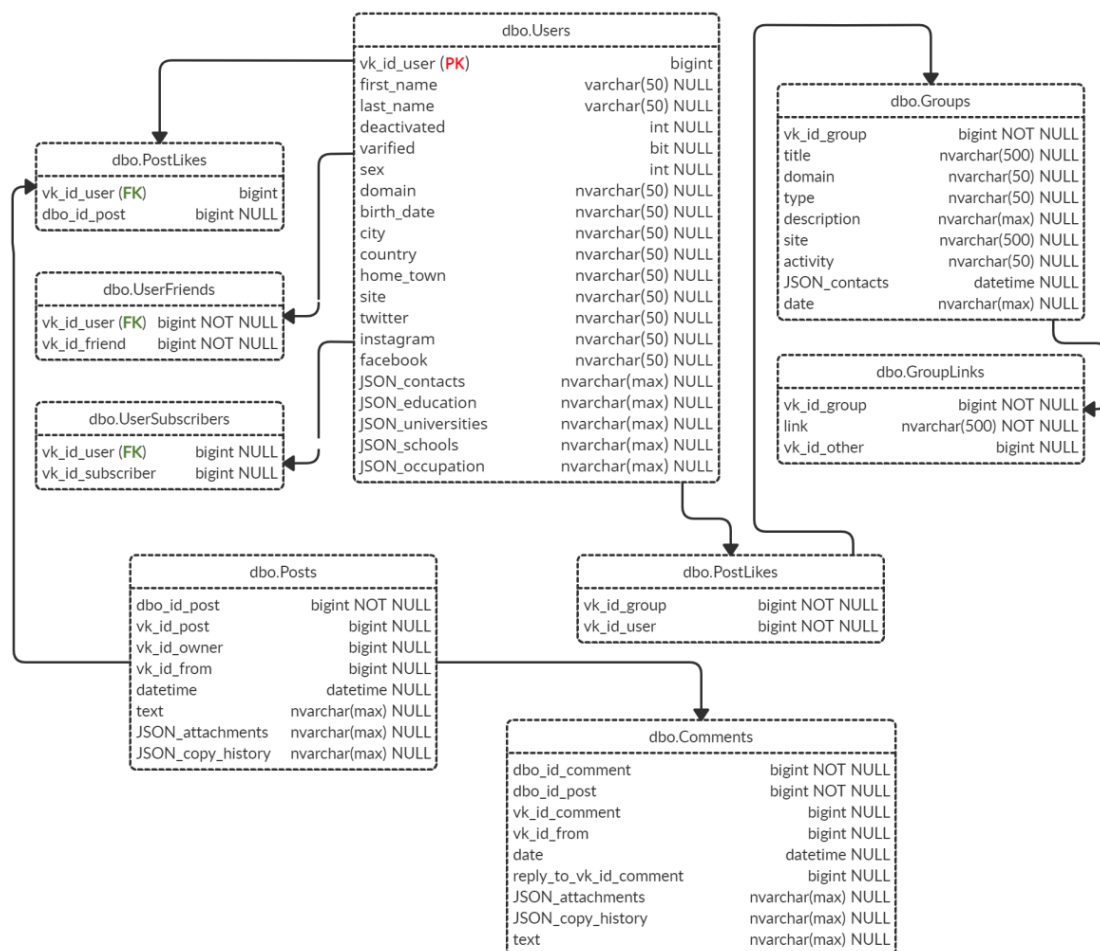


Рис. 8. Содержание полей в таблицах базы данных и их связи

В исходном состоянии после сбора информации связи в БД отсутствуют. С целью привести их к виду, показанному на рисунке 1, определим следующие действия по нормализации записей: установим количество уникальных записей (по всем полям таблиц) и устраним задвоенные; затем свяжем таблицы по ключевому полю как «один ко многим». Под уникальными записями будем подразумевать пользователя, оставившего один комментарий или опубликовавшего один пост. Результат выполнения запроса к БД показывает, что при общем числе записей в 7 776 529 уникальных из них незначительно меньше: 7 776 107. В процентном соотношении эта разница составляет менее 0,1%, однако с целью обеспечения целостности данных выполним нормализацию базы данных.

Работа с текстовыми сообщениями осложняется тем фактом, что в поле текстового сообщения в базе данных находится служебная информация об идентификационных номерах пользователей: кто направил сообщение и в чей адрес. Это затрудняет работу алгоритмов текстового анализа, например, морфологического анализа сообщения. Очевидно, что от такой неструктурированной информации в полях базы данных необходимо избавиться. Кроме того, обращение даже к правильно структурированной приведенной информации, но в большой базе данных является затратной операцией с точки зрения памяти и времени.

Имитационное моделирование

Воспользуемся системой имитационного моделирования iThink v.8.0 [18] для оценки динамики развития основных показателей (19) при различных начальных условиях. Эта

программа позволяет в короткие сроки сконструировать имитационную модель в виде ориентированного графа и протестировать различные режимы работы динамической системы, описывающей некоторый процесс или совокупность процессов [17]. Основными элементами управления в iThink, которыми мы воспользуемся для создания имитационной модели, являются резервуар как элемент накопления и отдачи некоторого ресурса; однонаправленный или двунаправленный потоки как маршруты, согласно которым ресурсы движутся по системе (говоря проще, поток – это математическое правило, правая часть уравнения, которая диктует, на какую величину изменится значение, хранящееся в резервуаре); конверторы – элементы, в которых находятся константы (хотя это не всегда так, поскольку этот элемент управления может быть преобразован к функционально зависимой переменной). На рисунке 9 показан ориентированный граф имитационной модели, соответствующий динамической системе (19).

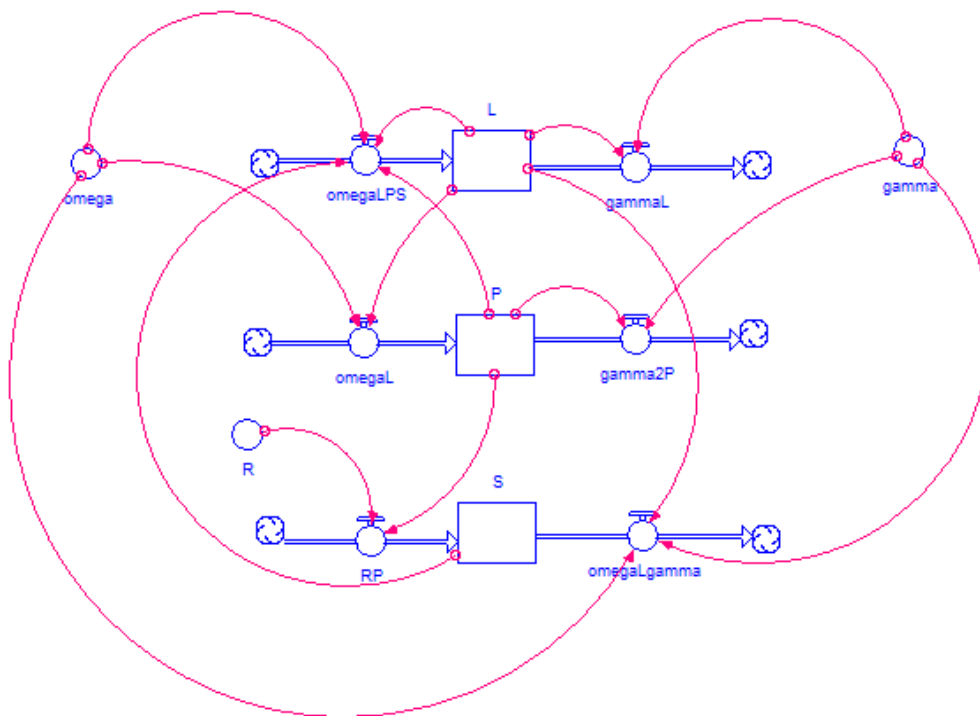


Рис. 9. Ориентированный граф динамической системы в системе моделирования iThink v. 8.0.

В графе динамической системы, представленной на рисунке 9, расположено 3 резервуара, которые будут отвечать за накопление, хранение и уменьшение значений L , P и S . В терминах iThink значения этих параметров выражают некоторый безразмерный для имитационной системы ресурс, величина которого изменяется согласно математическим законам, записанным в потоках (визуально представляет собой однонаправленный поток со стилизованным облачком с левого конца и стрелкой с правого, в центре размещен «вентиль»). Внутри этих потоков заданы правые части уравнений динамической системы (19), однако, заметим, что эти правые части разбиты на входящие и исходящие потоки. Входящий поток – это тот элемент правой части, что входит в уравнение с положительным знаком, то есть увеличивающий значение левой части. Соответственно, исходящий поток – это элемент правой части уравнения, входящий в него со знаком минус. Розовые стрелки обозначают видимость одного элемента графа другим. Например, стрелка, идущая от константы ω к потоку $\omega L \gamma$, означает, что в потоке будет доступно значение константы для вычислений.

Система имитационного моделирования iThink не требует фактической записи дифференциальных уравнений и генерирует код, содержащий их, самостоятельно. Все что требуется от разработчика – корректно выразить в виде ориентированного графа взаимосвязи параметров и констант.

Модельные сценарии

Рассмотрим несколько сценариев развития процессов изменения количества отметок «like» (L), подписчиков (P) и сообщений (S). В таблице 1 покажем начальные условия для первого сценария.

Таблица 1

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ СЦЕНАРИЯ

Параметр	Значения		
	Первый сценарий	Второй сценарий	Третий сценарий
L	100000	10000	500000
P	10000	1000	1000000
S	20000	2000	500000
ω	1.1	1.1	0.9
γ	2.5	2.5	1.0
R	5	5	1

Для решения в численном виде воспользуемся методом Runge-Kutta 4 – наиболее точным методом, доступным в iThink. В качестве временной шкалы укажем условные временные единицы. Это связано с тем, что для исследуемой базы данных сообщений социальной сети «ВКонтакте» известна последовательность сообщений, границы дат начала и конца сбора данных. На рисунке 10 можно видеть динамику изменения показателей L, P и S для начальных условий первого сценария.

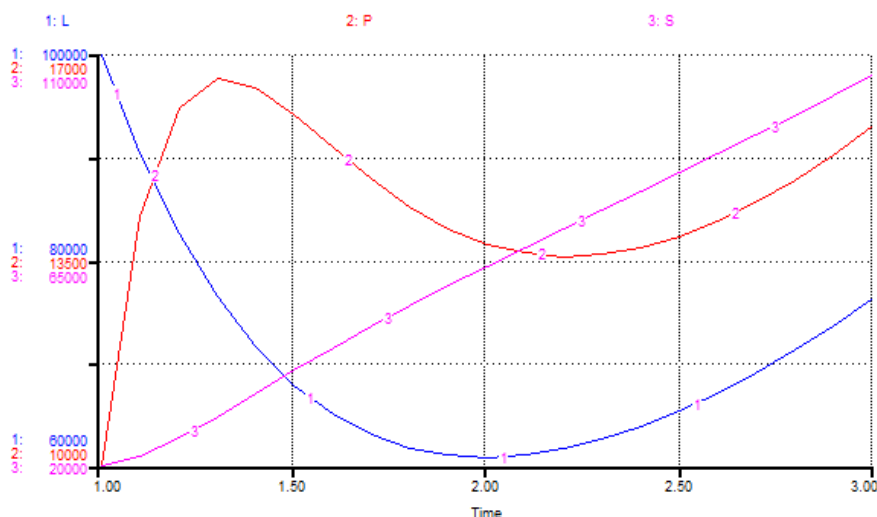


Рис. 10. Динамика развития процессов в условном масштабе времени (графики даны в разных масштабах для того, чтобы детально рассмотреть динамику каждого процесса)

По исходным условиям первого сценария можно заметить, что рассматривается вариант уже действующего сообщества социальной сети со значительной аудиторией подписчиков и высокой активностью. Параметрами ω и γ мы смоделировали ситуацию, в которой темпы прироста новых отметок «like» меньше темпов уменьшения количества «like», то есть выражение отметки «dislike». Можно предположить, что попытка искусственно управлять

количеством «dislike» кратковременно ведет к снижению подписчиков. Причем это снижение происходит с некоторым временным лагом (запаздыванием). Это видно по «горке» оранжевого графика. Перелом с последующим ростом в количестве подписчиков практически совпадает с таким же переломом с положительным ростом в количестве одобряемых сообщений. Покажем также на графиках 11 и 12 фазовые портреты динамической системы при начальных условиях первого сценария.

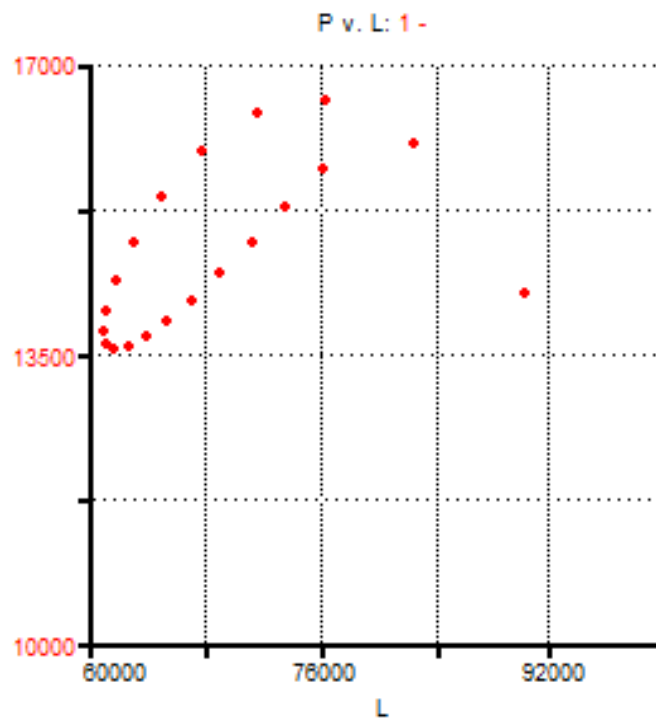


Рис. 11. Фазовый портрет «подписчики-лайки» при начальных условиях первого сценария

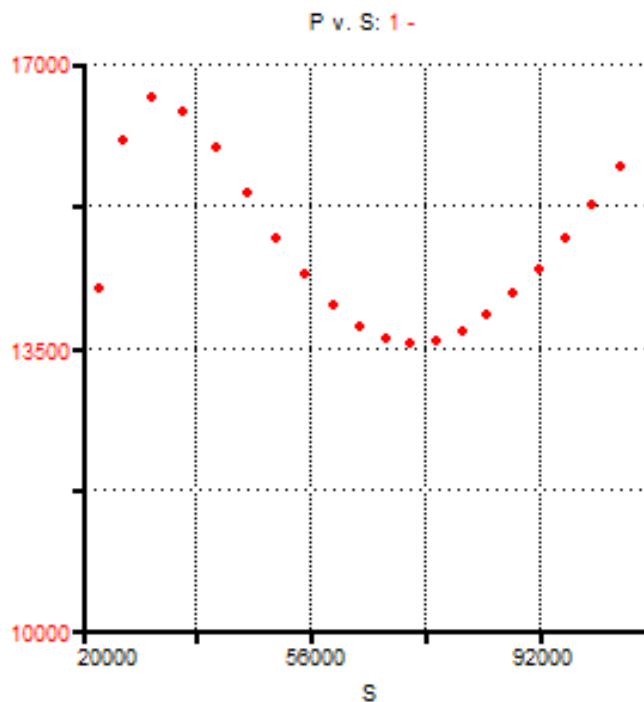


Рис. 12. Фазовый портрет «подписчики-сообщения» при начальных условиях первого сценария

Графики второго сценария покажем в приложении 1 (см. рисунки 20–22) в силу того, что он является близким к первому сценарию по параметрам имитации и демонстрирует лишь влияние тех же параметров на разные масштабы. Но рассмотрим, как отреагирует динамическая система на крупный масштаб сообщества социальной сети при малых параметрах его поддержки со стороны администрации сообщества и низкой активности. На рисунке 13 показана динамика основных процессов системы.

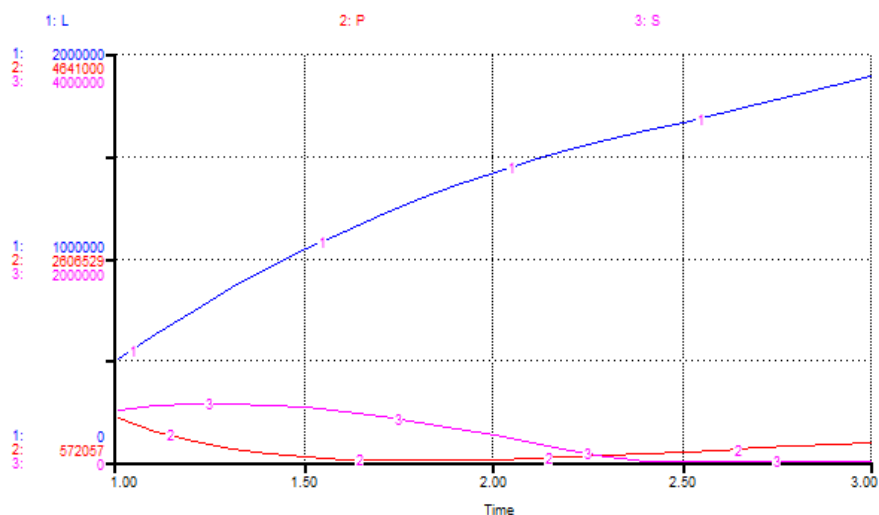


Рис. 13. Динамика эволюции при начальных условиях третьего сценария

Сообщество превращено в информационный стенд.

При слабой активности в виде новых постов в сообществе, малой административной поддержке тенденцию к росту имеет только показатель отметок «like». Это может свидетельствовать о том, что в действительности в крупном сообществе социальной сети лишь небольшое ядро генерирует новые темы. Большая часть участников сообщества исполняет роль проводников предложенных тем. Построим также фазовые портреты (рис. 14 и 15) при начальных условиях третьего сценария.

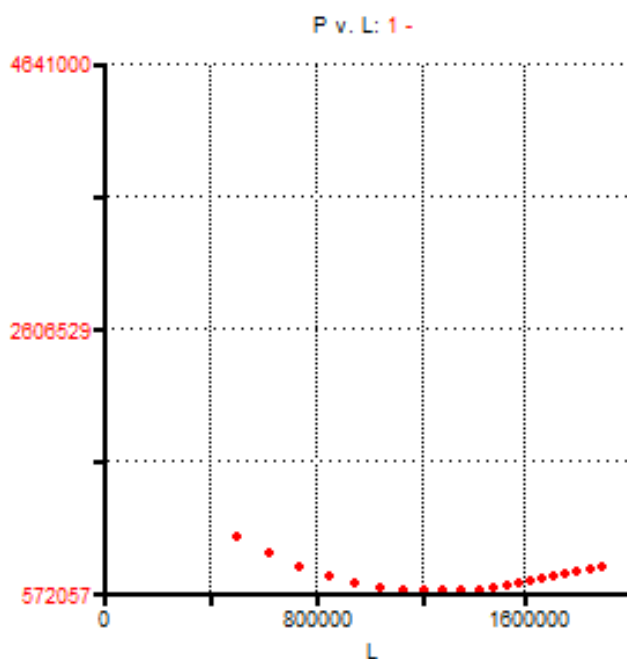


Рис. 14. Фазовый портрет «подписчики-лайки» при начальных условиях третьего сценария

В разделе анализа на устойчивость мы наглядно показали, что для этого набора процессов динамическая система функционирования сообщества социальной сети является нестабильной. Большинство из разыгранных нами сценариев демонстрируют тип особой точки «седло». На графиках фазовых портретов это можно проследить.

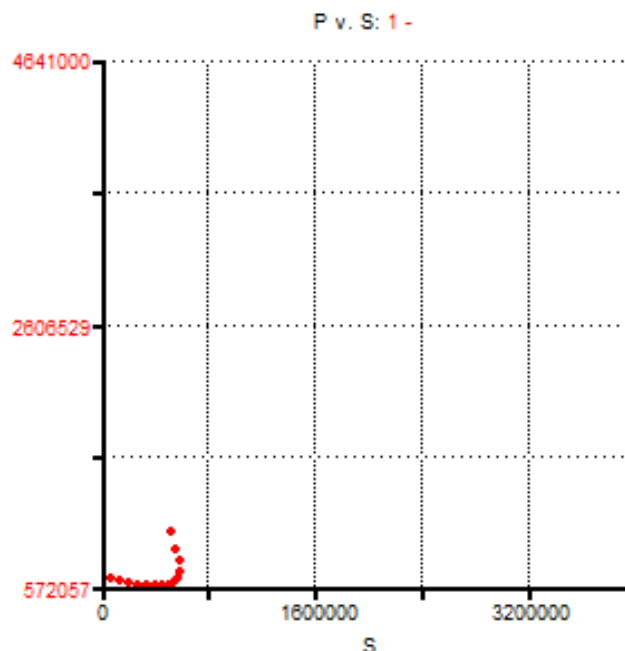


Рис. 15. Фазовый портрет «подписчики-сообщения» при начальных условиях третьего сценария

Причем изменение имитационного времени чаще всего приводит именно к той ситуации, что показана на рисунках 11, 12, 14 и 15.

В интерфейсе имитационной модели существует 3 шкалы изменения для параметров ω , γ и R . Изменение их значений очевидным образом ведет к различным состояниям динамической системы, однако переводят ее в положение равновесия такие из них, которые соблюдают соотношение $\omega < \gamma < R$. На рисунках 16 и 17 заметно положение равновесия в количествах постов и отметок «нравится» вплоть до имитационного времени, равного 200 единицам. Начиная со времени >200 единиц, изменяются значения на шкалах в апплете AnyLogic, нарушающие соотношение $\omega < \gamma < R$. Через 25 единиц имитационного времени значения приведены в указанное прежде соотношение, после чего наблюдается стабилизация процесса.

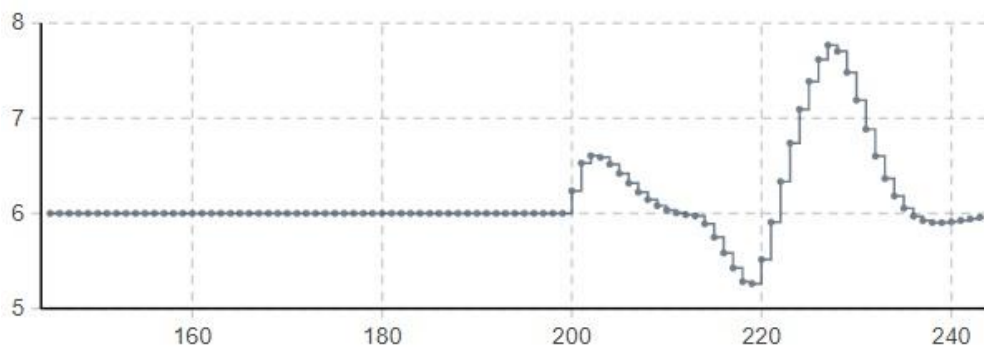


Рис. 16. Динамика процесса появления новых постов в зависимости от соотношения параметров ω , γ и R

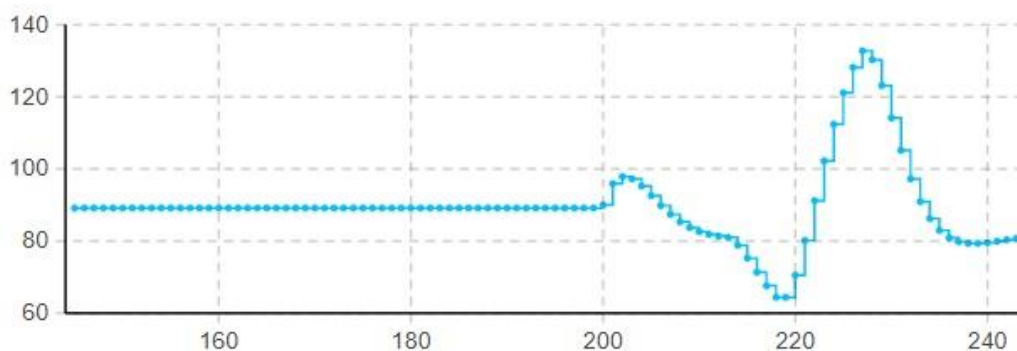


Рис. 17. Динамика процесса появления новых отметок «нравится» в зависимости от соотношения параметров ω , γ и R

На графиках на оси ординат отмечено модельное время (внутри имитационной системы); на оси абсцисс отражены значения показателей количества постов и отметок «нравится» (см. рисунок 17) соответственно.

Реализованная имитационная модель учитывает нелинейную компоненту, что позволяет избежать экспоненциального роста наблюдаемых показателей при малых изменениях в параметрах управления моделью. Покажем также на фазовых портретах «Посты – отметки «Нравится» и «Посты – Подписчики», что построенная динамическая система приводит к особой точке *седло*. Фазовые портреты построим при помощи имитационной программы iThink. На рисунках 18 и 19 при неизменных параметрах ω , γ и R , равных 1, 4 и 7 соответственно, получены фазовые портреты с особой точкой *седло*, что было доказано ранее.

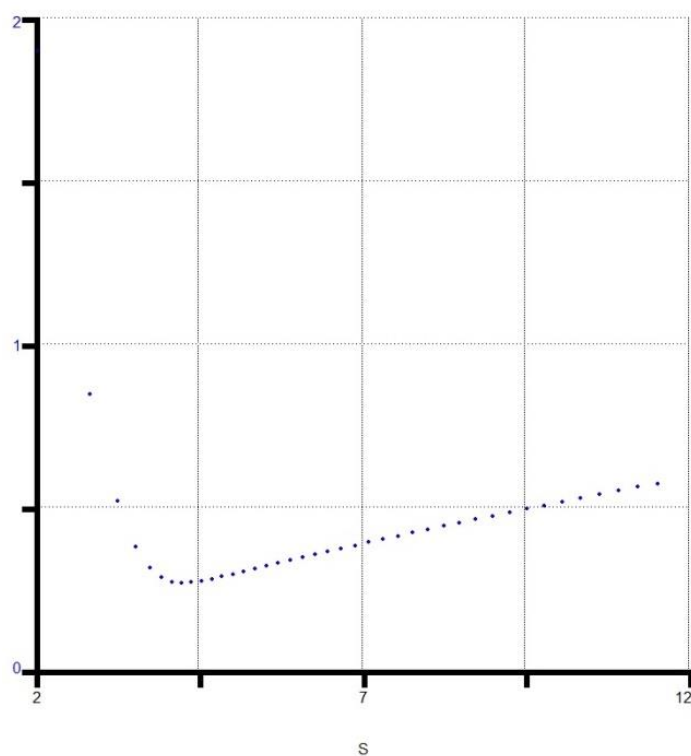


Рис. 18. Фазовый портрет «Посты – Подписчики»

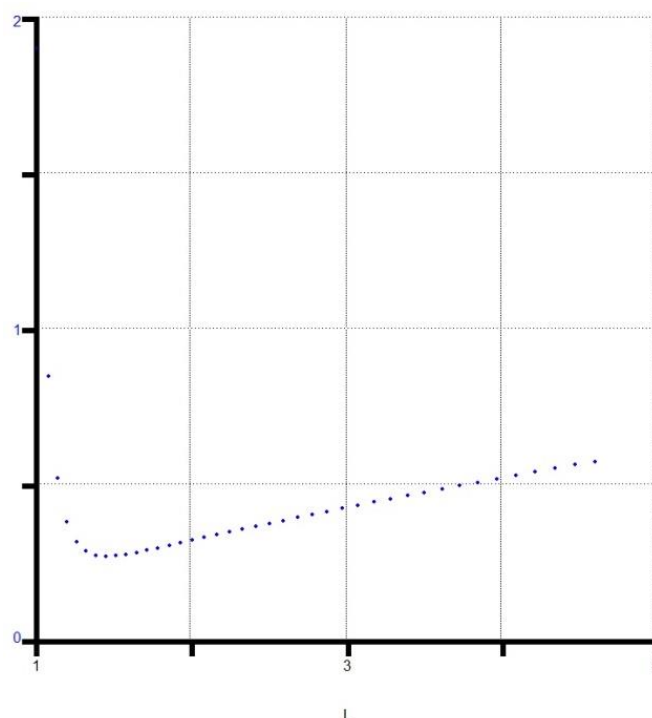


Рис. 19. Фазовый портрет «Посты – отметки «Нравится»

В некотором смысле получение особой точки такого типа является закономерным. В силу того, что одно из собственных значений положительно, точка равновесия неустойчива. В момент активизации подписчиков сообщества в форме комментирования, новых отметок «Нравится» привлекается внимание к посту (что послужило источником активного обсуждения?), таким образом формируя силу, направленную на выведение динамической системы из положения равновесия.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдение нестабильных режимов работы динамической системы для рассматриваемого объекта моделирования, с одной стороны, кажется предсказуемым: множество отдельно действующих пользователей. Но, с другой стороны, даже большое количество пользователей объединяют единые оценки высказываний, что говорит о том, что формирование мнений на виртуальной площадке возможно [18, 19, 20]. Авторы исследования считают перспективным также рассмотреть подход, связанный с созданием динамической системы, основанной на мультиагентном моделировании. В таком подходе формирование отклика со стороны пользователя подчинено его деятельности в малой группе большого сообщества социальной сети. В этом смысле малая группа выступает с двух позиций: как агент формирования мнения и его транслирования на общую аудиторию (которая в свою очередь имеет функцию предпочтения, выраженную в согласии или отрицании предложенного мнения), и в то же время является агентом сообщества, воспринимающим чужое мнение извне (та самая функция предпочтения). Реализация такого агента и его предпочтений возможна в виде нейронной сети.

Мультиагентный подход – это технологический подход к моделированию. Развитие математического подхода к анализу динамики систем, описывающих деятельность социальных сетевых сообществ, представлено в реализации управляющих воздействий. Например,

использование принципа максимума Л.С. Понтрягина. На самом деле динамическая система в виде системы дифференциальных уравнений уже построена, и, следовательно, могут быть определены такие управляющие воздействия на эту систему, которые переведут ее из одного положения на фазовой плоскости в другое. Целью контроля может быть требование, чтобы система находилась в едином режиме. Фактически каждая точка, найденная в управляющем фазовом пространстве, будет определять те самые границы параметров, при которых начинается переход от одного режима функционирования социальных сетевых сообществ (сообщества) к другому. Было бы также правильно использовать методы исследования графов в приложении к рассматриваемой теме. Наличие данных о функционировании сообществ в виде базы данных в плоском виде (такой тип представления данных, когда одному объекту записи, например пользователю, присваивается одно значение параметра и несмотря на большое количество параметров одного объекта этот объект записи повторяется для каждого нового значения параметра) может позволить отслеживать кратчайшие пути взаимодействия, например, наиболее активных аккаунтов с ярко выраженной агрессивной лексикой в комментариях.

В целом можно сказать, что изучение процессов функционирования социальных сетевых сообществ требует большей аналитической информации об их открытых и скрытых тенденциях. По мнению авторов, использование описанных выше методов исследования может обогатить знания по данной теме.

РЕЗУЛЬТАТ

Разработана динамическая система функционирования сообществ социальной сети с нелинейной компонентой. Эта ДС исследована на положение равновесия, которое соответствует особой точке *седло*, что близко отражает реальную поведенческую модель сообществ социальной сети. Активизация и раскрутка заданной темы, обсуждения, ее поддержка в форме отметок «Нравится» или репостов привлекает новых пользователей и новых подписчиков, тем самым увеличивая аудиторию и активность сообщества. Все действия выводят сообщество из устоявшегося положения с постоянным числом подписчиков и посетителей. Современная практика раскрутки сообществ СС демонстрирует увеличение аудитории с заранее декларируемой темой сообщества, а по достижении нужного числа подписчиков это сообщество перепродается как клиентская база, где новый владелец осуществляет миграцию к новой тематике сообщества.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленное исследование профинансировано РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта № 18-29-22104 «Разработка социально-киберфизической системы мониторинга разнообразного интернет-контента для противодействия проявлению агрессии, давления и других форм деструктивного воздействия на индивидуальное и групповое сознание пользователей».

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Здесь размещены графики второго сценария. Они показывают, что изменение масштабов сообщества социальной сети при неизменных темпах прироста и падения основных параметров динамической системы не ведет к радикальным изменениям в траектории развития системы.

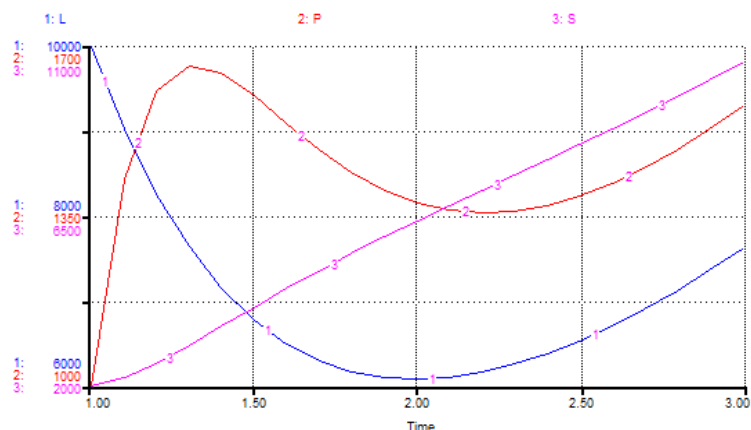


Рис. 20. Динамика системы при начальных условиях второго сценария

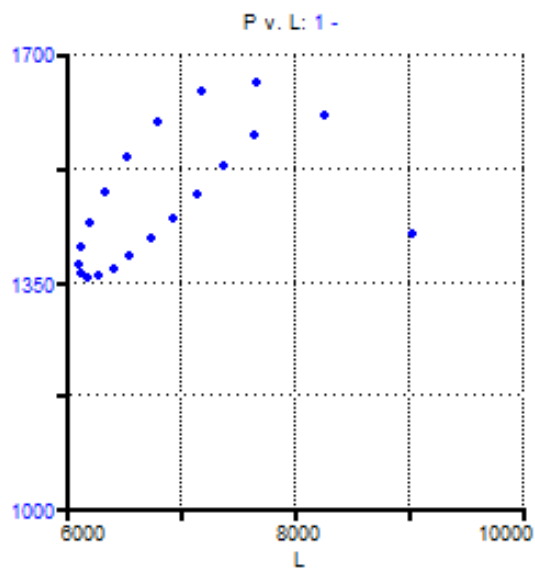


Рис. 21. Фазовый портрет «подписчики – лайки» при начальных условиях второго сценария

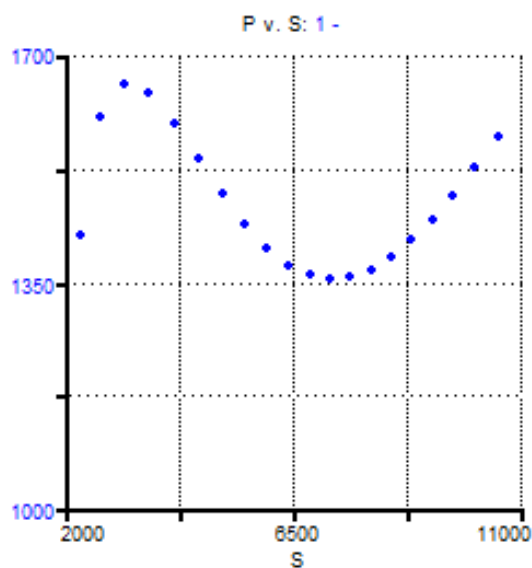


Рис. 22. Фазовый портрет «подписчики – сообщения» при начальных условиях второго сценария

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tocoglu M.A., Ozturkmenoglu O., Alpkocak A.* Emotion Analysis From Turkish Tweets Using Deep Neural Networks // IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 183061–183069. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960113.
2. *Kumar A., Narapareddy V.T., Aditya Srikanth V. et al.* Sarcasm Detection Using Multi-Head Attention Based Bidirectional LSTM // IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 6388–6397. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963630.
3. *Dong Y., Fu Y., Wang L et al.* A Sentiment Analysis Method of Capsule Network Based on BiLSTM // IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 37014–37020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973711.
4. *Liang H., Ganeshbabu U., Thorne T.* A Dynamic Bayesian Network Approach for Analysing Topic-Sentiment Evolution // IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 54164–54174. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2979012.
5. *Kumar A., Narapareddy V.T., Aditya Srikanth V. et al.* Aspect-Based Sentiment Classification Using Interactive Gated Convolutional Network // IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 22445–22453. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970030.
6. *Ding W.* SVM-Based Feature Selection for Differential Space Fusion and Its Application to Diabetic Fundus Image Classification // IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 149493–149502. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944899.
7. *Li M., Wu H., Zhang H.* Matrix Factorization for Personalized Recommendation with Implicit Feedback and Temporal Information in Social Ecommerce Networks // IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 141268–141276. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943959.
8. *Xu J., Xu Z., Chen J.* Semantic retrieval system based on ontology // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Information Security and Privacy. World Scientific and Engineering Academy and Society, Stevens Point, Wisconsin, USA. 2006. Pp. 124–129.
9. *Zhao Y., Pan S., Wu J. et al.* IEEE Access Special Section Editorial: Advanced Data Mining Methods for Social Computing // IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 228598–228604. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043060.
10. *Пуш Н., Абетс П., Лалуа М.* Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости. Москва: Мир, 1980. 300 с.
11. *Цимфер С.А.* Оценка параметров переходного процесса линейной системы на основе прямого метода Ляпунова // Процессы управления и устойчивость. 2016 Т. 3. № 1 С. 138–143.
12. *Kalitine B.S.* On solving the problems of stability by Lyapunov's direct method // Russian Mathematics. 2017. Vol. 61. No. 6. Pp. 27–36. DOI: 10.3103/S1066369X17060044.
13. *Гуляева Д.Р., Киселев А.В.* Применение методов Ляпунова для исследования устойчивости систем // Информационные системы и технологии: материалы докладов II международной научно-технической заочной конференции «ИСТ-2016», Юго-Западный государственный университет. Курск, 2016. С. 40–44.
14. *Плюснина Т.Ю., Фурсова П.В., Дьяконова А.Н. и др.* Математические модели в биологии: учебное пособие. Москва – Ижевск: НИЦ: «Регулярная и хаотическая динамика», 2021. 174 с.
15. *Щуров И.В.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. Интерактивный учебник [Электронный ресурс]. URL: <https://ode.mathbook.info/> (дата обращения: 25.09.2020)
16. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. Москва: Наука, 1988. 552 с.

17. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Устинов Р.Д. и др. Имитационное моделирование в системе структурного и имитационного моделирования «Ithink» // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 2. С. 159–164.
18. Минаев В.А., Сычев М.П., Куликов Л.С. и др. Моделирование манипулятивных воздействий в социальных сетях // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 1(24). С. 494–510. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.003.
19. Минаев В.А., Дворянкин С.В. Обоснование и описание модели динамики информационно-психологических воздействий деструктивного характера в социальных сетях // Безопасность информационных технологий. 2016. Т. 23. № 3. С. 40–52.
20. Cheng X., Fu S., de Vreede G.J. Understanding trust influencing factors in social media communication: A qualitative study // International Journal of Information Management. 2017. Vol. 37. No. 2. Pp. 25–35. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2016.11.009.

Информация об авторах

Охупкина Елена Павловна, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы» Института информационных наук и технологий безопасности, Российский государственный гуманитарный университет;

125047, Россия, Москва, Миусская площадь, 6;

старший преподаватель кафедры «Защита информации», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана;

105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1;

lenaokhupkina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-0891>

Охупкин Валентин Павлович, ведущий эксперт Центра экспертно-аналитических и информационных технологий, Счетная палата Российской Федерации;

119021, Россия, Москва, Zubovskiy bul., 21, стр. 3;

vpokhupkin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-8699>

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, профессор РАН, гл. науч. сотр., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

mrv@ieee.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1129-8434>

Исхакова Анастасия Олеговна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

shumskaya.ao@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8358-298X>

Исхаков Андрей Юнусович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;

117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;

доцент Московского института электроники и математики;

123458, Россия, Москва, ул. Таллинская, 34;

iskhakovandrey@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6603-265X>

REFERENCES

1. Tocoglu M.A., Ozturkmenoglu O., Alpkocak A. Emotion Analysis From Turkish Tweets Using Deep Neural Networks. IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 183061–183069. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960113.
2. Kumar A., Narapareddy V.T., Aditya Srikanth V. et al. Detection Using Multi-Head Attention Based Bidirectional LSTM. IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 6388–6397. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963630.

3. Dong Y., Fu Y., Wang L. et al. A Sentiment Analysis Method of Capsule Network Based on BiLSTM. IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 37014–37020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973711.
4. Liang H., Ganeshbabu U., Thorne T. A Dynamic Bayesian Network Approach for Analysing Topic-Sentiment Evolution. IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 54164–54174. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2979012.
5. Kumar A., Narapareddy V.T., Aditya Srikanth V. et al. Aspect-Based Sentiment Classification Using Interactive Gated Convolutional Network. IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 22445–22453. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970030.
6. Ding W. SVM-Based Feature Selection for Differential Space Fusion and Its Application to Diabetic Fundus Image Classification. IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 149493–149502. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944899.
7. Li M., Wu H., Zhang H. Matrix Factorization for Personalized Recommendation with Implicit Feedback and Temporal Information in Social Ecommerce Networks. IEEE Access, 2019. Vol. 7. Pp. 141268–141276. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943959.
8. Xu J., Xu Z., Chen J. Semantic retrieval system based on ontology. Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Information Security and Privacy. World Scientific and Engineering Academy and Society, Stevens Point, Wisconsin, USA. 2006. Pp. 124–129.
9. Zhao Y., Pan S., Wu J. et al. IEEE Access Special Section Editorial: Advanced Data Mining Methods for Social Computing. IEEE Access, 2020. Vol. 8. Pp. 228598–228604. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043060.
10. Rush N., Abets P., Lalua M. *Prjamoj metod Ljapunova v teorii ustojchivosti* [Lyapunov's direct method in stability theory]. Moscow: Mir, 1980. 300 p. (In Russian)
11. Cimfer S.A. Estimation of the parameters of the transition process of a linear system based on the direct Lyapunov method. *Processy upravlenija i ustojchivost'* [Control Processes and Stability]. 2016. Vol. 3. No. 1. Pp. 138–143. (In Russian)
12. Kalitine B.S. On solving the problems of stability by Lyapunov's direct method. Russian Mathematics. 2017. Vol. 61. No. 6. Pp. 27–36. DOI: 10.3103/S1066369X17060044.
13. Guljaeva D.R., Kiselev A.V. Application of Lyapunov methods to study the stability of systems. *Informacionnye sistemy i tehnologii: materialy dokladov II mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy zaochnoj konferencii «IST-2016»*. [Information systems and technologies: materials of reports of the II International Scientific and Technical Correspondence Conference "IST-2016"]. Kursk: Jugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet, [South-West State University] 2016. Pp. 40–44. (In Russian)
14. Pljusnina T.Ju., Fursova P.V., D'jakonova A.N. et al. *Matematicheskie modeli v biologii: uchebnoe posobie* [Mathematical models in biology: a textbook]. Moscow – Izhevsk: NIC: «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 2021. 174 p. (In Russian)
15. Shchurov I.V. *Obyknoennye differencial'nye uravnenija. Interaktivnyj uchebnik* [Ordinary differential equations. Interactive textbook]. URL: <https://ode.mathbook.info/> (accessed 25.09.2020). (In Russian)
16. Vasiliev F.P. *Chislennye metody reshenija jekstremal'nyh zadach* [Numerical methods for solving the extremal problems]. Moscow: Nauka, 1988. 552 p. (In Russian)
17. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Ustinov R.D. et al. Simulation modeling in the "IThink" structural and simulation modeling system. *Vestnik Tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University]. 2019. Vol. 22. No. 2. Pp. 159–164. (In Russian)
18. Minaev V.A., Sychev M.P., Kulikov L.S., Vaitz E.V. Modeling manipulative influences in social networks. *Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii* [Modeling, optimization and information technology]. 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 494–510. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.003. (In Russian)

19. Minaev V.A., Dvoryankin S.V. Foundation and description of informational and psychological destructive nature influences dynamics model in social networks. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologiy* [IT Security]. 2016. Vol. 23. No. 3. Pp. 35–48. (In Russian)
20. Cheng X., Fu S., de Vreede G.J. Understanding trust influencing factors in social media communication: A qualitative study. *International Journal of Information Management*. 2017. Vol. 37. No. 2. Pp. 25–35. DOI: 37.10.1016/j.ijinfomgt.2016.11.009.

MSC: 37N35; 91D30; 93D05

Original article

DYNAMIC SYSTEM OF FUNCTIONING OF SOCIAL NETWORK COMMUNITIES

**E.P. OKHAPKINA^{1,2}, V.P. OKHAPKIN³, R.V. MESHCHERYAKOV⁴,
A.O. ISKHAKOVA⁴, A.Y. ISKHAKOV^{4,5}**

¹ Russian State University for the Humanities
125047, Russia, Moscow, Miusskaya Square 6

² Bauman Moscow State Technical University
105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5, build. 1

³ Center of Expert and Analytical and Information Technologies of Accounts Chamber of the Russian Federation
119021, Russia, Moscow, Zubovsky blvd., 21, build. 3

⁴ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
117997, Russia, Moscow, 65 Profsojuznaja street

⁵ Moscow Institute of Electronics and Mathematics (MIEM HSE)
123458, Russia, Moscow, 34 Tallinskaya street

Abstract: Social networks are no longer used only as a tool for global communication of various segments of society in different countries. It is turned into a socio-political asset in the struggle for the specific interests of a group of people who can acquire and/or manage this asset. In the paper we use data of a number of communities of the Russian-Ukrainian segment of the social network «Vkontakte». The study formalizes one of the functional features of a social network: a community (group). The community is considered from the position of a tool for forming opinions and aggressive influence on a single person, some small or wide community. The issue of using information and communication technologies in a destructive way is being updated. The processes occurring in the social network community are shown in the form of a system of first-order differential equations. The system is investigated for stability by the method of Lyapunov functions. One of the tasks of the study is to identify and characterize the border regimes in which the functioning of the community goes from a stable state to chaos. The simulation model of the constructed dynamic system under different initial simulation conditions is considered. The use of mathematical physics tools to describe the processes of cyber-physical systems, including in the task of evaluating text messages with signs of aggression, in a distributed computing environment allows us to assess the trajectory of their evolution under various initial conditions.

Keywords: differential equations, social network services, system dynamics, information and communication technologies, stability analysis, simulation modeling, dynamic equilibrium

The article was submitted 17.03.2022

Accepted for publication 31.03.2022

For citation. Okhapkina E.P., Okhapkin V.P., Meshcheryakov R.V., Iskhakova A.O., Iskhakov A.Y. Dynamic system of functioning of social network communities. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2022. No. 2 (106). Pp. 41–71. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-2-106-41-71

Information about the authors

Elena Pavlovna Okhapkina, Senior Lecturer of Information Technologies and Systems Dep. Institute for Information Sciences and Security Technologies of Russian State University for the Humanities;

125047, Russia, Moscow, Miussskaya Square 6;

Senior Lecturer of Information Protection Dep. Bauman Moscow State Technical University;

105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya street, 5, build. 1;

lenaokhapkina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2382-0891>

Valentin Pavlovich Okhapkin, Leading Expert, Center of Expert and Analytical and Information Technologies of Accounts Chamber of The Russian Federation;

119021, Russia, Moscow, Zubovsky blvd., 21, build. 3;

vpokhapkin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-8699>

Roman Valerievich Meshcheryakov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher of the V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsojuznaja street;

mriv@ipu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1129-8434>

Anastasia Olegovna Iskhakova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsojuznaja street;

shumskaya.ao@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8358-298X>

Andrey Yunusovich Iskhakov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences;

117997, Russia, Moscow, 65 Profsojuznaja street;

Associate Professor at the Moscow Institute of Electronics and Mathematics;

123458, Russia, Moscow, 34 Tallinskaya street;

iskhakovandrey@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6603-265X>