

ISSN 2304–6201 (Print)
ISSN 2524–2601 (Online)

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК

Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна



Серія

«Математичне моделювання.

Інформаційні технології.

Автоматизовані системи управління»

Випуск 36

Харків
2017

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ВІСНИК

Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна



Серія

«Математичне моделювання.

Інформаційні технології.

Автоматизовані системи управління»

Випуск 36

Серія заснована 2003 р.

Харків
2017

Статті містять дослідження у галузі математичного моделювання та обчислювальних методів, інформаційних технологій, захисту інформації. Висвітлюються нові математичні методи дослідження та керування фізичними, технічними та інформаційними процесами, дослідження з програмування та комп'ютерного моделювання в наукоємних технологіях.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, працюючих у відповідних або суміжних напрямках.

Вісник є фаховим виданням у галузі фізико-математичних та технічних наук (Наказ МОН України № 1328 від 21.12.2015 р.).

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 18 від 22.12.2017 р.)

Редакційна колегія:

Азаренков М.О. (гол. редактор),
д.ф.-м.н., академік НАН України, проф.,
ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Жолткевич Г.М. (заст. гол. редактора),
д.т.н., проф. ФМІ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Лазурик В.Т. (заст. гол. редактора),
д.ф.-м.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ імені
В.Н. Каразіна

Споров О.Є. (відповідальний секретар),
к.ф.-м.н., доц. ФКН ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Золотарьов В.О., д.ф.-м.н., проф., ФТІНТ
імені Б.І. Веркіна НАН України

Куклін В.М., д.ф.-м.н., проф., ФКН ІВТ
ХНУ імені В.Н. Каразіна

Мацевитий Ю.М., д.т.н., академік НАН
України, проф., фізико-енергетичний ф-т
ХНУ імені В.Н. Каразіна

Руткас А.Г., д.ф.-м.н., проф., ФМІ ХНУ
імені В. Н. Каразіна

Стервоєдов М.Г., к.т.н., доц., ФКН ІВТ
ХНУ імені В.Н. Каразіна

Целуйко О.Ф., к.ф.-м.н., проф., ІВТ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Шейко Т.І., д.т.н., проф., фізико-
енергетичний ф-т ХНУ імені В.Н. Каразіна

Шматков С. І., д.т.н., проф., ФКН ІВТ
ХНУ імені В.Н. Каразіна

Щербина В.А., д.ф.-м.н., проф., ФМІ ХНУ
імені В.Н. Каразіна

Раскін Л.Г., д.т.н., проф., Національний
технічний університет "ХПІ"

Стрельникова О.О., д.т.н., проф. Ін-т
проблем машинобудування НАН України

Соколов О.Ю., д.т.н., проф., кафедра
прикладної інформатики, університет імені
Миколая Коперника, м. Торунь (Польща)

Prof. **Harald Richter**, Dr.-Ing., Dr. rer. nat.
habil. Professor of Technical Informatics and
Computer Systems, Institute of Informatics,
Technical University of Clausthal, Germany

Prof. **Philippe Lahire**, Dr. habil., Professor of
computer science, Dep. of C. S., University of
Nice-Sophia Antipolis, France

Адреса редакційної колегії: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 6,
ХНУ імені В. Н. Каразіна, к. 534.

Тел. +380 (57) 705-42-81, Email: journal-mia@karazin.ua.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21578-11478 Р від 18.08.2015.

© Харківський національний університет
імені В.Н.Каразіна, оформлення, 2017

ЗМІСТ

▪ С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський	5
Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак	
▪ Б. О. Близнюк, Л. В. Васильєва, И. Д. Стрельников, Д. С. Ткачук	14
Современные методы обработки естественного языка	
▪ G. Bulanchuk, A. Ostapenko	27
Modeling of the viscous fluid flow around rotating circular cylinders with the lattice Boltzmann method at moderate Reynolds numbers	
▪ А. И. Вайсбурд, Т. Г. Вихтинская, К. Э. Немченко	38
Обратное преобразование Радона не содержащее сингулярной фильтрации	
▪ Л. В. Васильєва, А. В. Передерин	44
Компьютерная программа для тестирования работников по пожарной и электробезопасности	
▪ А. В. Киричок, А. В. Мишин	50
Качественные модели сверхизлучения в инвертированных средах	
▪ V. V. Parshentsev, E. G. Tolstoluzhskaya	61
Parallel construction of decision trees	
▪ А. В. Приймак, В. В. Яновский	68
Эволюция сообществ стратегий при наличии источников	
▪ CONTENTS	85

Шановні читачі та автори цього збірника!

Редакція вживає заходів до перетворення нашого періодичного видання в науковий журнал, широко представлений у міжнародних наукометричних базах даних.

Першою, хоча далеко не останньою вимогою до журналу є забезпечення 4-х повноцінних і своєчасно підготовлених випусків на рік. Чекаємо на Вашу активну участь у формуванні та постійній підтримці відповідного портфелю редакції. Будь ласка, надсилайте Ваші власні статті та рекомендації до опублікування робіт Ваших колег та учнів!

Важливу роль у здійсненні наших планів відіграватиме зростання відсотку статей, що публікуються у збірнику англійською мовою. Надсилайте без вагань такі роботи до нашої редакції, якщо маєте впевненість не тільки в якості наукових результатів, але й готові до співробітництва в напрямку доведення тексту до якості, відповідної стандартам міжнародних видань. Зі свого боку редакційна колегія забезпечуватиме відповідну якість редагування всіх англійських анотацій та статей, написаних англійською мовою, виходячи протягом наступного року з того, що вони повинні складати до третини загального обсягу статей, які публікуватимуться.

На завершення нагадуємо, що фахові публікації у нашому збірнику повинні відповідати паспорту однієї з наступних спеціальностей (за номенклатурою, за якою зараз поки що діють спеціалізовані ради з захисту дисертацій):

з *фізико-математичних наук* – спеціальності:

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи,

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми,

01.02.04 – механіка деформованого твердого тіла,

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем;

з *технічних наук* - спеціальності:

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи,

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми,

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти,

05.13.06 – інформаційні технології,

05.13.21 – системи захисту інформації,

05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Просимо з розумінням поставитися до деяких ускладнень підготовки анотацій до статей. Справа в тому, що різні наукометричні бази вимагають різних форм і показників. Починаючи з 1 випуску 2018 року буде змінено вимоги до підготовки рукописів, головним чином у частині підготовки анотацій.

З повагою, **Редакційна колегія.**

УДК 004.056:681.3

Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак

С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна

В статті приведено обґрунтування проведення регресійного аналізу тенденцій розвитку кібератак. Виділені фактори, що, найімовірніше, найбільше позначаються на коливаннях інтенсивності атак. Проведені кореляційний та регресійний аналіз факторів впливу на кількість кібератак на web-ресурси з використанням статистики за останні кілька років. Проведена перевірка адекватності отриманих моделей і доведена можливість використання отриманих даних для покращення захисту web-ресурсів. Зроблені висновки щодо отриманих результатів і обґрунтовані шляхи підвищення достовірності результатів у подальших дослідженнях.

Ключові слова: кібератака, web-технології, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, кореляція.

В статье приведено обоснование проведения регрессионного анализа тенденций развития кибератак. Выделены факторы, которые, вероятнее всего, сказываются на колебаниях интенсивности атак. Проведены корреляционный и регрессионный анализ факторов влияния на количество кибератак на web-ресурсы с использованием статистики за последние несколько лет. Проведена проверка адекватности полученных моделей и доказана возможность использования полученных данных для улучшения защиты web-ресурсов. Сделаны выводы о полученных результатах и обоснованы пути повышения достоверности результатов в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: кибератака, web-технологии, регрессионный анализ, корреляционный анализ, корреляция.

The article gives a justification for conducting a regression analysis of trends in the development of cyber attacks. Factors which are likely to affect most the fluctuations in the intensity of attacks have been selected. Correlation and regression analysis of factors which influence the number of cyber attacks on web-resources have been carried out by using the statistics for a few previous years. The adequacy of the obtained models has been checked and the possibility of using the obtained data to improve the protection of web-resources has been proved. Conclusions regarding the obtained results are made and the ways of increasing the reliability of the results in further research are substantiated.

Key words: Cyber Attack, Web-technology, Regression Analysis, Correlation Analysis, Correlation.

1 Вступ

Сучасне суспільство користується всіма перевагами використання інформаційних технологій, які грають вирішальну роль практично в будь-якій людській діяльності. Очевидно, що в цих умовах значення кібербезпеки для сучасного суспільства надзвичайно зростає [1]. На сьогоднішній день кібербезпека перестала бути проблемою, яка турбує лише фахівців в цій області. Інциденти в сфері кібербезпеки позначаються на життєдіяльності споживачів інформаційних і багатьох інших послуг, яким наразі також добре відомо про вірусні атаки (WannaCry, Petya.A та інші) чи кібератаки, націлені на різноманітні об'єкти інфраструктури систем електронних комунікацій чи управління технологічними процесами (Stuxnet, Flame, BlackEnergy та інш.) [2].

Велике занепокоєння визивають як тяжкі техніко-економічні наслідки кібератак, так і тенденції до зростання їх кількості і різноманітності, що відображається статистичною звітністю в оглядах з кібербезпеки відомих світових компаній [6-11]. Деякі з цих кібератак націлені на веб-ресурси, зокрема, на веб-ресурси державних підприємств, адже мають політичне або економічне підґрунтя.

Численність елементів, що становлять кіберпростір [1,3], велика кількість взаємозв'язків між ними, можливість застосування спеціальних технік управління діями цих елементів по типу бот-мереж, наприклад, визначають можливості розвитку загроз, які присутні в інформаційному просторі. При цьому все наростаюча інтенсивність кібератак походить від масштабності світового кіберпростору. Складні атаки типу АРТ (Advanced Persistent Threats) мають комплексну структуру, різноманітні механізми своєї реалізації та спираються на можливість використання різних напрямків поширення інформації. Використання методів соціальної інженерії дозволяє знаходити найбільш продуктивні методи організації атак [3]. У кіберпросторі, як прогнозується спеціалістами, можуть розвиватися все більш небезпечні і складні загрози, що робить актуальною задачу їх всебічного аналізу та використання результатів її вирішення для ефективної протидії існуючим і можливим в майбутньому кіберзагрозам.

2 Обґрунтування напряму досліджень

Тенденції розвитку кібератак змінюються рік від року і на перший погляд є досить випадковими. Ми можемо провести їх аналіз по звітах авторитетних в цій сфері компаній, таких як Positive Technologies [6] та Cisco [9], що регулярно публікуються кожен квартал року. Звіти та огляди по кібератакам містять досить детальні статистичні дані, однак не дають можливості знайти причинно-наслідковий зв'язок між різними факторами, параметрами (векторами) та наслідками кібератак, лише поглянувши на них.

Для того, щоб дослідити закономірності підготовки і проведення кібератак та виявити зв'язок між ними та впливом різноманітних факторів, на наш погляд, необхідно провести кореляційний та регресійний аналіз таких даних, а конкретно – факторів, що характеризують кібератаки. Названі види аналізу є прикладом найбільш важливих і популярних кількісних методів математичного моделювання, метою яких є встановлення факту наявності або відсутності певного зв'язку (кореляції) між випадковими величинами або процесами та виявлення функціонального зв'язку, тобто виду цієї залежності [4,5].

Для того, щоб визначити основні тенденції розвитку кібератак, необхідно перевірити кореляцію між кількістю виявлених атак і чинниками (факторами), що імовірно можуть позначатися на коливаннях інтенсивності атак. Для проведення кореляційного аналізу були вибрані фактори, які, на наш погляд, найбільш імовірно впливають на основні тенденції розвитку кібератак:

- N – кількість виявлених атак на веб-ресурси, млн;
- N_1 – кількість нових виявлених видів (технік) атак, млн;
- N_2 – географічний фактор 1 (розповсюдженість атак);
- N_3 – географічний фактор 2 (потерпання від атак по світу);

N_4 – поширеність технологій атак;

N_5 – поширеність платформи web-ресурсів, на які здійснювались атаки;

N_6 – сфера життєдіяльності, що найбільше потерпала від атак.

Статистичні дані, які використані у даній роботі, було запозичено зі звітів по кібератакам за 2015-2017 роки від компаній Positive Technologies [6], Kasperky [7], McAfee [8], Cisco [9] та TrendMicro [10], а також з рейтингів веб-технологій, зпівставлених Stack Overflow [11]. Для аналізу в якості кількісного відображення рейтингу країни використовувався її порядковий номер в рейтингу країн за економічним розвитком [12]. Дані також були розподілені по кварталам з 2015 по 2017 роки.

3 Проведення кореляційного аналізу впливу факторів на розвиток кібератак

Для числової оцінки можливого зв'язку між двома випадковими величинами: Y (із середнім M_y і середньоквадратичним відхиленням S_y) і X (із середнім M_x і середньоквадратичним відхиленням S_x) прийнято використовувати [4] так званий вибірковий лінійний коефіцієнт кореляції:

$$r^* = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - a^*)(b_i - b^*)}{S[a]S[b]}, \quad (3.1)$$

де a^*, b^* - оцінки математичних очікувань $M[a]$ і $M[b]$;

$$S[a] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_i - a^*)^2}, \quad S[b] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (b_i - b^*)^2} \quad (3.2)$$

Коефіцієнт кореляції приймає значення від -1 до +1 в залежності від тісноти зв'язку між даними випадковими величинами. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, то X і Y називають некорельованими [5].

Нами було проведено кореляційний аналіз факторів $N_1 \dots N_6$ з фактором N (кількість виявлених атак). Результати зроблених розрахунків зведено у таблицю коефіцієнтів кореляцій (табл.3.1).

Таблиця 3.1 Коефіцієнти кореляції

Позначення фактору	Значення коефіцієнту кореляції
N_1	0,720521
N_2	-0,7367
N_3	0,773986
N_4	0,328211
N_5	0,422164
N_6	0,600009

По результатам аналізу даних в табл. 3.1 можна зробити висновок, що тісно корельованим з кількістю атак є фактор виявлення нових шкідливих технологій, а також географічні фактори. Саме ці фактори було використано на наступному етапі аналізу даних по кібератакам.

4 Застосування регресійного аналізу впливу факторів на розвиток кібератак

Окрім встановлення факту наявності або відсутності певного зв'язку (кореляції) між випадковими величинами або процесами метою дослідження може бути і безпосереднє визначення функціонального зв'язку, тобто виду цієї залежності. Поставлена мета досягається регресійним аналізом значень факторів і відгуку [13,14]. Для цього необхідно знайти коефіцієнти та рівняння регресії [15,16], загальний вигляд якого представлений у наступному виразі :

$$y^* = f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n = \sum_{i=0}^n \beta_i x_i, \quad (4.1)$$

де $x_0 = 1$, β_i - коефіцієнти регресії.

Процедура побудови лінійної регресійної моделі була автоматизована в табличному редакторі Excel корпорації Microsoft. Зокрема для побудови лінійної регресії була застосована функція «ЛИНІЙН», яка потрібна для розрахунків статистик для ряду із застосуванням методу найменших квадратів.

Дані розрахунків з використанням даної функції приведені на діаграмі з графіком регресії і її рівнянням (рис. 4.1).

На рис. 4.1 наведено побудовану регресійну модель впливу кількості нових виявлених шкідливих технологій (технік атак) на кількість виявлених атак в цілому. На рис. 4.2 і 4.3 наведені побудовані регресійні моделі впливу географічних факторів на кількість виявлених атак.

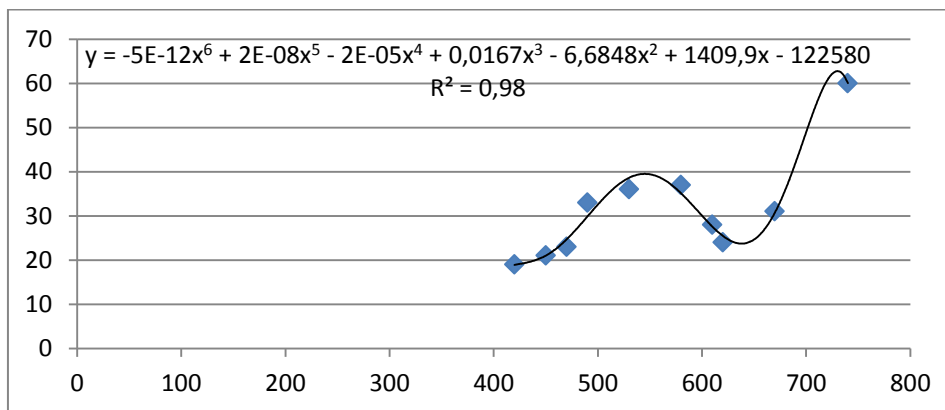


Рис. 4.1 Регресійна модель кількості виявлених атак на веб-ресурси, млн та кількості нових виявлених шкідливих технологій, млн.

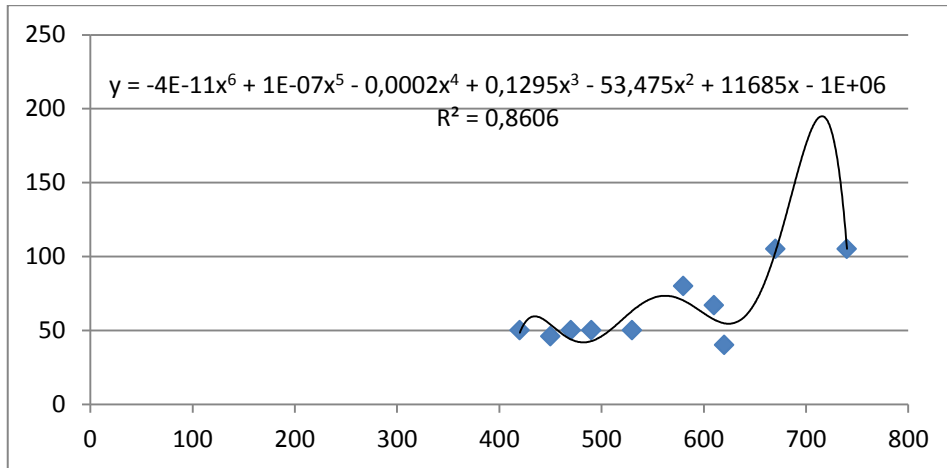


Рис. 4.2 Регресійна модель кількості виявлених атак на веб-ресурси, млн та країни, що найбільше потерпала від атак.

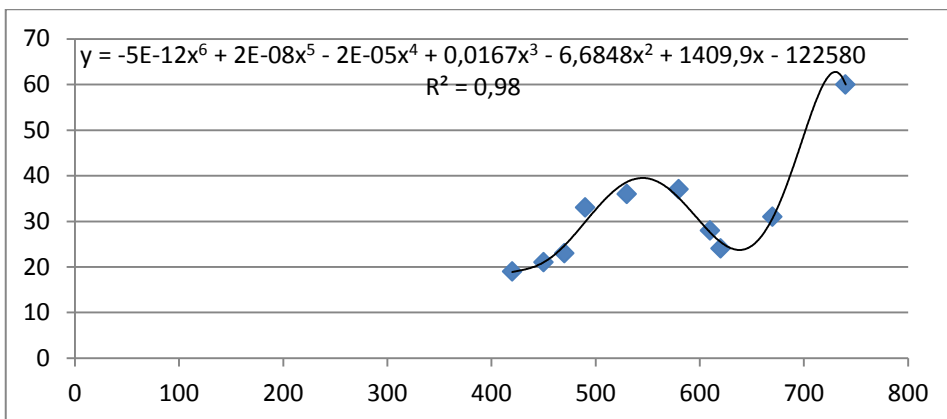


Рис. 4.3 Регресійна модель кількості виявлених атак на веб-ресурси, млн та країни, звідки розповсюджувалася найбільша кількість атак.

5 Результати проведення аналізу

Перевірка адекватності моделей, побудованих на основі рівнянь регресії, починається з перевірки значимості кожного коефіцієнта регресії.

Значимість коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою відомого t-критерію Стьюдента [17]:

$$t_p = \frac{|a_i|}{\sqrt{\sigma_{a_i}^2}}, \quad (5.1)$$

де $\sigma_{a_i}^2$ - дисперсія коефіцієнта регресії;

Параметр моделі визнається статистично значущим, якщо $t_p > t_{кр}$.

Проведемо оцінку коефіцієнтів регресії. Результати оцінки для першого рівняння наведені в табл. 5.1. Перше рівняння регресії має вигляд:

$$y = -5E - 12x^6 + 2E - 08x^5 - 2E - 05x^4 + 0,0167x^3 - 6,6848x^2 + 1409,9x - 122580$$

Таблиця 5.1 Результати оцінки коефіцієнтів регресії першого рівняння

Номер коефіцієнту регресії	Значення коефіцієнту регресії	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення	Значення $t_{розр}$
1	5,00E-12	2138565539	46244,6271	1,08E-16
2	2,00E-08			4,32E-13
3	2,00E-05			4,32E-10
4	0,0167			3,61E-07
5	6,6848			1,45E-04
6	1409,9			3,05E-02
7	122580			2,65E+00

Результати оцінки для першого рівняння наведені в табл. 5.2. Друге рівняння регресії має вигляд:

$$y = -4E - 11x^6 + 1E - 07x^5 - 0,0002x^4 + 0,1295x^3 - 53,475x^2 + 11685x - 1E + 06$$

Таблиця 5.2 Результати оцінки коефіцієнтів регресії другого рівняння

Номер коефіцієнту регресії	Значення коефіцієнту регресії	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення	Значення $t_{розр}$
1	4E-11	1,4232E+11	377250,1	1,06E-16
2	1E-07			2,65E-13
3	0,0002			5,30E-10
4	0,1295			3,43E-07
5	53,475			1,42E-04
6	11685			3,10E-02
7	1E+06			2,65E+00

Результати оцінки для третього рівняння наведені в табл. 5.3. Третє рівняння регресії має вигляд:

$$y = -1E - 11x^6 + 4E - 08x^5 - 6E - 05x^4 + 0,0473x^3 - 20,53x^2 + 4708,7x - 445935$$

Таблиця 5.3 Результати оцінки коефіцієнтів регресії третього рівняння

Номер коефіцієнту регресії	Значення коефіцієнту регресії	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення	Значення $t_{розр}$
1	1,00E-11	2,8311E+10	168258,806	5,94E-17
2	4,00E-08			2,38E-13
3	6,00E-05			3,57E-10
4	0,0473			2,81E-07
5	20,53			1,22E-04
6	4708,7			2,80E-02
7	445935			2,65E+00

Критичні значення t-розподілу при 22 ступенях свободи приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Критичні значення t-розподілу

Ймовірність	t-значення
0,05	2,074
0,01	2,819
0,001	3,792

В наших моделях всі коефіцієнти підтверджують правило $|t_{розр}| > t_{критич}$. Це означає, що моделі є достатньо адекватними, статистично значимими і можуть використовуватися для прогнозування. На основі зроблених висновків можна робити прогнози щодо тенденцій кібератак, а також імовірно вказувати, які чинники могли вплинути на ріст чи зниження кількості атак. Завдяки цьому отримані дані є підґрунтям для покращення ефективності систем безпеки web-ресурсів, посиляючись на той чи інший фактор безпеки. Наприклад, якщо значимим фактором є кількість нових виявлених технік, то це свідчить про те, що безпеку web-ресурсів необхідно забезпечувати з оглядом на тенденцію появи нових видів атак. Значимість географічного фактору може сказати про те, чи є безпечним використання домену тієї чи іншої країни для своїх web-ресурсів. Інтерпретацію отриманих результатів і зроблених висновків викладено у наступному розділі.

6 Висновки

Таким чином, результати дослідження свідчать про наявність кореляції вибраних факторів з основними дослідженими тенденціями розвитку кібератак. Побудовані регресійні моделі для найбільш поширених корелюючих факторів є адекватними і статистично значимими. Кореляція між факторами N (кількість виявлених атак) і N_1 (кількість нових виявлених шкідливих технологій) досить логічна, адже з появою нових технологій кібератак, для яких ще не знайдені методи протидії, кількість атак в цілому збільшиться. Достатньої кореляції для факторів популярності різновидів атак та платформ веб-розробки не було виявлено, але географічна кореляція виявилася більш цікавою.

Географічні кореляції можуть свідчити про різні речі. У випадку кореляції з першим географічним фактором маємо негативну кореляцію з країнами, що розповсюджують атаки. Це означає, що в більш технологічно розвинених країнах спостерігається більша агресивність проведення кібератак. У випадку з урахуванням впливу другого географічного фактору маємо позитивну кореляцію з країнами, що потерпають від атак, тобто країни з гіршим рівнем розвитку потерпають від кібератак в більшій мірі, ніж розвинені країни.

Це може означати, що розвинені країни, на відміну від країн, що розвиваються, забезпечили себе достатнім захистом, або ж це може свідчити про зміну політичних і соціальних причин кібератак. Це, нажаль, говорить про збільшення небезпеки для країн, що розвиваються. Однак ці висновки неостаточні, адже вони залежать від коректності вхідних даних для проведення аналізу.

В цілому результати проведення регресійного аналізу факторів, що характеризують розвиток кібератак, можуть бути уточнені за рахунок розширення і забезпечення адекватності вхідних статистичних даних. Також вони можуть бути використаними з метою прогнозування розвитку кібератак та розробки методів і засобів протидії їм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України Про основні засади забезпечення кібербезпеки України - Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 45, ст.403.
2. Center for Internet Security - Cybersecurity Threats [Електронний ресурс] / Center for Internet Security – Режим доступу: <https://www.cisecurity.org/cybersecurity-threats/>, вільний.
3. Бурячок, В. Л. Інформаційна та кібербезпека: соціотехнічний аспект: підручник / [В. Л. Бурячок, В. Б. Толубко, В. О. Хорошко, С. В. Толюпа]; За заг. ред. В. Б. Толубка. - К.: ДУТ, 2015. - 288 с.
4. Елисеєва И. И. Общая теория статистики: Учебник / Елисеєва И. И., Юзбашев М. М. Под ред. И. И. Елисеєвой. — 4-е издание, переработанное и дополненное. — М: Финансы и Статистика, 2002. — 480 с.
5. Айвазян С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики. / Айвазян С.А. – М.: Юнити. 2001. – 432с.

6. Positive Research 2015-2017 [Електронний ресурс] / Positive Technologies // 2015-2017. – Режим доступу: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/>, вільний.
7. Развитие информационных угроз в 2015-2017 годах. Статистика. [Електронний ресурс] / АО KasperskyLab // 2015-2017. – Режим доступу: <https://securelist.ru/all/?category=736>, вільний.
8. McAfee Labs Threat Report [Електронний ресурс] / McAfee Labs // September 2017. – Режим доступу: <https://www.mcafee.com/us/security-awareness/articles/mcafee-labs-threats-report-sep-2017.aspx>, вільний.
9. Cisco 2016 Annual Security Report [Електронний ресурс] / Cisco // 2015-2017. – Режим доступу: https://www.cisco.com/c/m/en_us/offers/sc04/2016-annual-security-report/index.html, вільний.
10. A Rising Tide: New Hacks Threaten Public Technologies [Електронний ресурс] / TrendLabs // 2015-2017. – Режим доступу: <https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/research-and-analysis/threat-reports/roundup/a-rising-tide-new-hacks-threaten-public-technologies>, вільний.
11. Stack Overflow Annual Developer Survey. [Електронний ресурс] / Stack Exchange Inc // 2015-2017. – Режим доступу: <https://insights.stackoverflow.com/survey>, вільний.
12. Legatum Prosperity Index. [Електронний ресурс] / LEGATUM INSTITUTE // 2015-2017. – Режим доступу: <http://www.prosperity.com/rankings>, вільний
13. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
14. Соколов, Г.А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике: Учебное пособие / Г.А. Соколов, Р.В. Сагитов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 202 с.
15. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа = Methoden der Korrelation - und Regressiolynsanalyse. / Фёрстер Э., Рёнц Б. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 302 с.
16. Стрижов В.В. Методы выбора регрессионных моделей. / Стрижов В.В., Крымова Е.А. – М.: ВЦ РАН, 2010. – 60 с.
17. Ромакін В. В. Комп'ютерний аналіз даних: Навчальний посібник. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2006. — 144 с.

УДК 004.89

Современные методы обработки естественного языка

Б. О. Близнюк, Л. В. Васильева, И. Д. Стрельников, Д. С. Ткачук
*Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022, Харьков, Украина*

В данной статье рассмотрены основные проблемы обработки естественного языка. Проанализированы основные направления обработки, методы, инструменты и библиотеки, доступные на текущий момент времени. Проведено два эксперимента, где данные методики были применены для решения реальных задач – анализ тональности новостного фона некоторых криптовалют с целью определения зависимостей между новостным фоном и их обменным курсом и анализ фактов о сотрудничестве компаний, используя их упоминания в различных пресс-релизах. Показано, что анализ текстовых данных имеет большое практическое значение в современном мире.

Ключевые слова: обработка естественного языка, анализ текста, обработка текста, анализ тональности текста, классификация, нейронные сети, сбор данных.

У даній статті розглянуті основні проблеми обробки природної мови. Проаналізовано основні напрямки обробки, методи, інструменти та бібліотеки, що наразі доступні. Проведено два експерименти, де дані методики були застосовані для вирішення реальних завдань - аналіз тональності новин щодо деяких криптовалют з метою визначення залежностей між новинами і обмінним курсом і аналіз фактів про співпрацю компаній, використовуючи їх згадки в різних прес-релізах. Показано, що аналіз текстових даних має велике практичне значення в сучасному світі.

Ключові слова: обробка природної мови, аналіз тексту, обробка тексту, аналіз тональності тексту, класифікація, нейронна мережа, збір даних.

The main challenges of natural language processing have been covered in the article. The main processing tasks, methods and libraries presently available have been analyzed. Two experiments have been carried out, where these techniques have been used to solve real-life problems, namely, the analysis of the internet news concerning some cryptocurrencies to see if the sentiment of those news correlated with the prices of the cryptocurrencies and the extraction of facts from the various press-releases to find out the companies with established partnerships. It has been shown that natural language processing is a very important and powerful tool in the modern age.

Key words: Natural Language Processing, text analysis, text processing, sentiment analysis, classification, neural network, data mining.

1 Введение

Мы живем во время, когда объемы производимой человечеством информации больше, чем когда либо и количество этих данных растет с каждым днем. Однако значительную пользу из этой информации можно извлечь лишь при правильной обработке и анализе этих данных.

Сейчас ежесекундно по всему миру создаются гигабайты новых данных различного вида: делаются новые снимки, видеозаписи, пишутся сотни отзывов к товарам в интернет-магазинах, тысячи комментариев под записями на Facebook, десятки рецензий к фильмам в онлайн-кинотеатрах, цены на акции то

взлетают, то падают. И большая часть этих данных в “сыром” виде практически бесполезна. Чтобы извлечь из них какую-то пользу, их нужно отфильтровать и обработать. Во времена, когда технологии еще не были так развиты, все это приходилось делать вручную. На это уходили часы, дни, недели, а то и месяцы. А если учесть, что раньше и самой информации для обработки было в разы меньше, то несложно понять, что сейчас обрабатывать такие объемы вручную просто невозможно. Поэтому было разработано множество алгоритмов, которые позволяют делать это при помощи компьютерной техники. Именно о таких методах, касающихся обработки естественного языка и пойдет речь в данной работе.

2 Основные направления

Обработка естественного языка (Natural Language Processing, NLP) — общее направление искусственного интеллекта и математической лингвистики. Оно изучает проблемы компьютерного анализа и синтеза естественных языков. Применительно к искусственному интеллекту, анализ означает понимание языка, а синтез – генерацию грамотного текста. Решение этих проблем будет означать создание более удобной формы взаимодействия компьютера и человека.[1] К основным направлениям обработки естественного языка относят такие, как извлечение фактов, анализ тональности текста, ответы на вопросы, информационный поиск, генерация текста, перевод и т.д. Подробнее о некоторых из них.

2.1 Извлечение информации или фактов

Под извлечением информации подразумевается поиск в неструктурированном или слабо структурированном документе отдельных интересующих вас фактов. Например, у вас имеется огромное количество статей, в которых фигурирует большое количество разных личностей, и вы хотите составить базу данных, которая будет хранить данные о том, кто из фигурирующих в данных статьях людей, являются мужем и женой. Данный пример был использован для демонстрации[2] возможностей программы под названием DeepDive, созданной группой студентов и работников университета Stanford.

2.2 Анализ тональности текста

Анализ тональности текста подразумевает под собой автоматическое определение эмоциональной окраски текста и выявление отношения человека, написавшего текст, к объекту обсуждения. Данный тип анализа может быть использован, например, продавцами для того, чтобы лучше понять, какой из продаваемых им товаров пользуется большим успехом среди покупателей, анализируя отзывы. Также его могут использовать власти для выявления отношения к ним и их решениям граждан страны и т.д. В наше время наиболее часто используемыми в исследованиях методами являются методы на основе машинного обучения с учителем. Сутью таких методов является то, что на первом этапе обучается машинный классификатор (например, байесовский) на

заранее размеченных текстах, а затем используют полученную модель при анализе новых документов.[3]

2.3 Ответы на вопросы

Под данное определение в целом могут подходить и так называемые чат-боты, которые имитируют реальное общение с людьми посредством передачи текстовых сообщений, и специальные программы, которые сперва анализируют некий текст, а после – отвечают на вопросы, связанные с его содержанием. Результаты одного из последних исследований на эту тему, описаны в статье [4], под авторством John Ball.

2.4 Перевод текста

Также одним из наиболее известных и часто используемых направлений обработки естественного текста является его перевод с одного естественного языка на другой. Одной из наиболее продвинутых методик, используемых в данный момент для достижения правильного перевода, является использование нейронных сетей типа “Seq2Seq”[5] с “Вниманием”[16], что расшифровывается, как “sequence to sequence”, или “последовательность в последовательность”. Позже, мы более подробно рассмотрим данный тип нейронных сетей.

3 Способы анализа

Для решения вышеописанных задач, исследователи пользуются огромным набором инструментов и техник анализа естественного языка. Некоторые из них узкоспециализированные, как seq2seq, другие же могут применяться в различных ситуациях, как Word2Vec, о котором дальше и пойдёт речь.

3.1 Word2Vec

В основе данной технологии лежит представление слов в виде векторов заданной размерности, располагая похожие слова близко друг к другу. То есть, расстояние между векторами слов, обозначающих похожие вещи, например, “кот” и “собака”, будет значительно меньше, чем между словами, значения которых имеют мало общего, например, “кот” и “самолёт”. Данная особенность позволяет более гибко представлять данные, которые в дальнейшем могут быть использованы в обучении нейронных сетей, различных классификаторов и т.д.

Для создания базы соответствий “слово - вектор”, алгоритм сначала просматривает весь выданный ему текст, составляя “словарь”, который в последующих итерациях работы алгоритма, будет использован для определения соответствующих векторов. Существует два основных подхода: CBOW (Continuous Bag of Words) и Skip-gram. CBOW – «непрерывный мешок со словами» модельная архитектура, которая предсказывает текущее слово, исходя из окружающего его контекста. Архитектура типа Skip-gram действует иначе: она использует текущее слово, чтобы предугадывать окружающие его слова.[6]

3.2 Определение структуры текста

Все тексты на естественном языке имеют большое количество слов, которые не несут информации о данном тексте. К примеру, в английском языке такими

словами являются артикли, в русском к ним можно отнести предлоги, союзы, частицы. Данные слова называют шумовыми или стоп-словами. Для достижения лучшего качества классификации на первом этапе предобработки текстов обычно необходимо удалять такие слова. Второй этап предобработки текстов – приведение каждого слова к основе, одинаковой для всех его грамматических форм. Это необходимо, так как слова несущие один и тот же смысл могут быть записаны в разной форме. Например, одно и то же слово может встретиться в разных склонениях, иметь различные приставки и окончания.

3.3 Нейронные сети

Искусственные нейронные сети представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров – искусственных нейронов. Алгоритм работы таких процессоров зачастую крайне прост. Например, процессор может просто преобразовать полученный на входе сигнал, используя некую математическую функцию, в выходной. И, тем не менее, будучи соединёнными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие по отдельности простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

RNN/LSTM

Рекуррентные нейронные сети [7] отличаются от другого типа сетей тем, что кроме связей, переходящих от одного нейрона к другому напрямую, как в сетях прямого распространения, а также связи, проходящие “во времени”. То есть, сигнал от одного нейрона на этапе t перейдёт к другому (или этому же) нейрону на этапе $t+1$. Таким образом рекуррентные нейронные сети могут сохранять информацию во времени, тем самым “запоминая” некоторые данные. Данная их особенность как раз очень сильно помогает в переводе, классификации и обработке природного текста в целом, так как наш язык устроен таким образом, что некоторые данные в начале блока текста, могут повлиять на понимание и/или перевод в его конце. В данной [17] статье отлично показаны реальные возможности рекуррентных нейронных сетей и их применения.

CNN

СНС - сверточные нейронные сети лучше всего показали себя в распознавании объектов и образов на картинках, классификации изображений, выделении особенностей и сжатии данных. Однако, им нашлось применение и в обработке текста.

Посимвольный подход.

Посимвольный подход для классификации текста с помощью сверточных нейронных сетей был предложен в статье [16]. Подробнее опишем данный метод. Алфавит - это упорядоченный набор символов. Пусть данный алфавит состоит из m символов. Каждый символ алфавита в тексте закодирован с помощью $1 - m$ - кодировки. (т. е. каждому символу будет сопоставлен вектор длины m элемент которого равен единице, в позиции равной порядковому номеру символа в алфавите, а нулю во всех остальных позициях.) В случае, когда в тексте встретится символ, который не вошел в алфавит, то его необходимо закодировать вектором длины m состоящим из одних нулей. Далее, из текста следует выбрать первые l символов. Параметр l должен быть большим,

чтобы в первых l символах содержалось достаточно информации для определения класса всего текста.

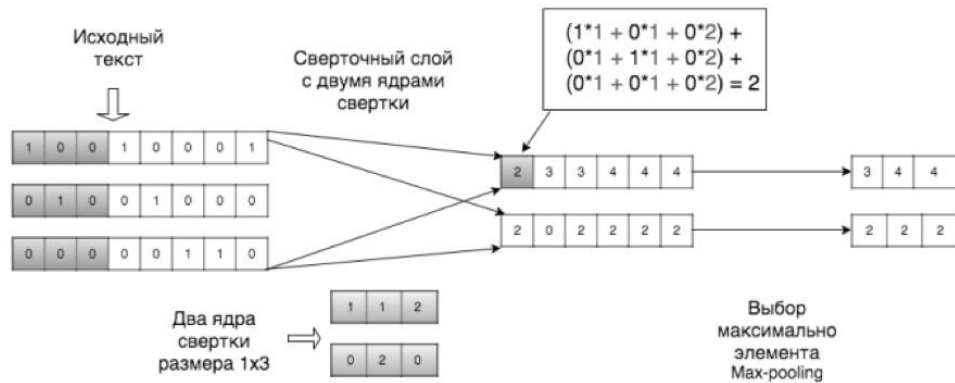


Рис. 1 Посимвольный подход

Затем исходные векторы объединяются в матрицу размера $m \times l$, в которой в каждый столбец будет иметь не более одной единицы. Каждая строка полученной матрицы используется как отдельная карта признаков. На вход сверточной нейронной сети подается m карт признаков размера $1 \times l$ аналогично изображению. Архитектуру сети необходимо выбирать исходя из задачи. На Рис. 1 приведен пример посимвольного подхода для $l = 6$, $m = 3$. В примере показан один сверточный и один субдискретизирующий слой.

Подход с использованием кодирования слов.

В данном подходе каждому слову в тексте сопоставляется вектор фиксированной длины, затем из полученных векторов для каждого объекта выборки составляется матрица, которая аналогично изображениям подается на вход сверточной нейронной сети. На Рис. 2 приведен пример сверточной нейронной сети с использованием кодирования слов.

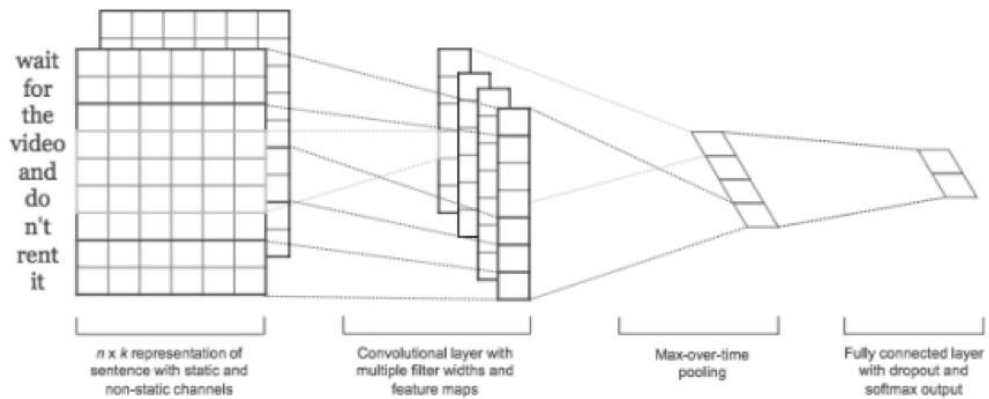


Рис. 2 Подход с использованием кодирования слов

Seq2Seq

Універсальна бібліотека кодировщик-декодер для Tensorflow[5], которая может использоваться для машинного перевода, определения содержания текста, моделирования диалогов, описания содержания изображений и т. д. Seq2Seq позволяет создавать и обучать модели нейронных сетей вида 'sequence to sequence'.

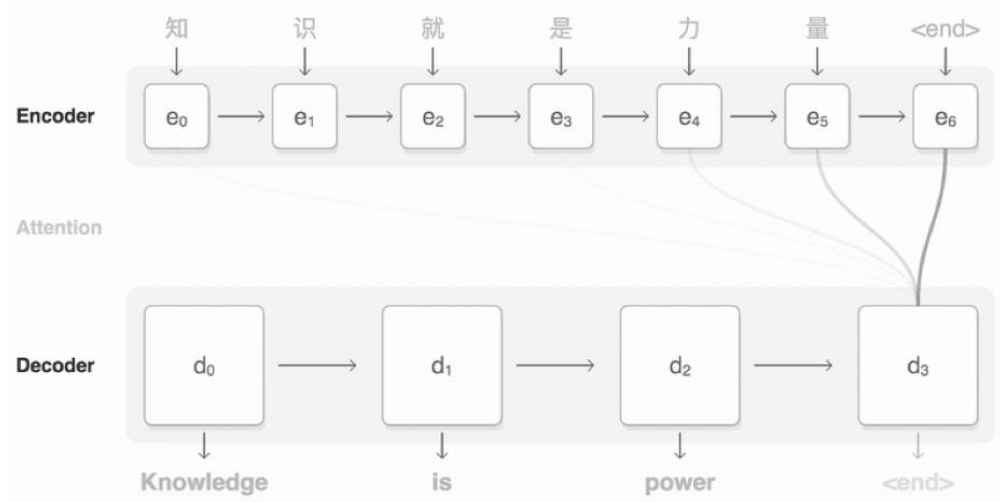


Рис. 3 - Визуализация принципа работы библиотеки Seq2Seq, источник: <https://github.com/google/seq2seq>

4 Другие классификаторы

4.1 Байесовский классификатор

Наивный байесовский классификатор – простой вероятностный классификатор, основанный на применении теоремы Байеса со строгими (наивными) предположениями о независимости.

Достоинством наивного байесовского классификатора является малое количество данных для обучения, необходимых для оценки параметров, требуемых для классификации.

Пусть X – множество описаний объектов, Y – множество наименований классов. На множестве пар «объект, класс» определена вероятностная мера P . Имеется конечная обучающая выборка независимых наблюдений $X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$, полученных согласно вероятностной мере P .

При работе с непрерывными данными основное предположение состоит в том, что непрерывные значения, связанные с каждым классом, распределяются в соответствии с распределением Гаусса.

4.2 SVM/SVC

Метод опорных векторов (англ. SVM, support vector machine) – набор схожих алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и

регресійного аналізу. Особливим свойством методу опорних векторів є неперервне зменшення емпіричної помилки класифікації та збільшення зазору, тому метод також відомий як метод класифікатора з максимальним зазором.

Основна ідея методу – перетворення вихідних векторів у простір більш високої розмірності та пошук розділюючої гіперплощини з максимальним зазором у цьому просторі. Дві паралельні гіперплощини будуються по обидві сторони розділюючої гіперплощини, розділюючи класи. Розділюючою гіперплощиною буде гіперплощина, що максимізує відстань до двох паралельних гіперплощин. Алгоритм працює в припущенні, що чим більше різниця або відстань між цими паралельними гіперплощинами, тим менше буде середня помилка класифікатора.

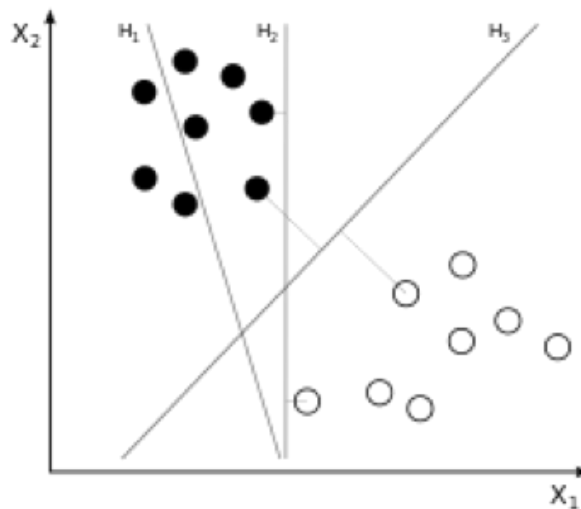


Рис. 4 H_1, H_2, H_3 – гіперплощини. H_3 – гіперплощина максимальної різниці

5 Сущестующие библиотеки для NLP

5.1 Stanford CoreNLP

Данный бесплатный программный продукт был создан общими усилиями студентов и научных работников университета Stanford. Основной задачей, которая была поставлена в начале его разработки, было создание набора современных инструментов, позволяющих обрабатывать неструктурированный текст. По сей день этот продукт является одним из лучших в своей нише. С его помощью можно провести полный анализ частей речи в тексте, структуры текста, провести распознавание именованных объектов, определить, где в тексте разные существительные обозначают один и тот же объект, провести анализ тональности текста и многое другое. Больше информации о продукте и примеры использования можно найти на официальном сайте [12].

5.2 Natural Language Toolkit, NLTK

Данная бесплатная библиотека для языка программирования Python является одной из лучших для создания различных программных продуктов на этом языке. Она предоставляет большой набор инструментов, корпусов текста, имеет предусмотренные обертки для использования других библиотек внутри себя. Например, для анализа тональности текста и разметки предложений, есть возможность подключения вышеописанного продукта Stanford CoreNLP. Также для различных классификаций в NLTK был предусмотрен интерфейс для подключений классификаторов из другой библиотеки – Scikit learn, о которой пойдёт речь дальше. А больше информации об использовании, устройстве данной можно найти на официальном сайте[13].

5.3 Scikit learn

Хотя эта библиотека не имеет никаких специфических инструментов для обработки природного языка, в ней имеется огромное количество классификаторов, основанных на различных алгоритмах; моделей нейронных сетей и прочих общих инструментов для машинного обучения. Используя её вместе с другими, узконаправленными инструментами, можно создавать очень сложные и качественные системы для обработки, анализа, классификации и даже генерации природного текста. Ярким примером использования данной библиотеки является следующий[14] обучающий материал, написанный человеком под ником sentdex.

5.4 Tensorflow

Также как и вышеописанная библиотека, Tensorflow[15] абсолютно не задумывалась, как библиотека для обработки природного текста, а как инновационная библиотека для машинного обучения и, в особенности, искусственных нейронных сетей. Но она также может быть использована для анализа и генерации природного текста. Вышеописанный seq2seq, как и Word2Vec, являются частью данной библиотеки, постоянно дорабатываются и уже успешно используется для различных исследований и создания программных продуктов. В данной [5] обучающей статье можно прочитать о том, как можно использовать модель seq2seq для перевода текста.

6 Практическое применение анализа текста

В течение всего 2017 года технология блокчейн стремительно набирала обороты. Цены на криптовалюты очень сильно отличаются друг от друга и завязаны на огромном количестве факторов. Таких, как общее количество “монет” или “токенов”, наличие верхней границы их количества, способ “добычи” данной валюты и многие другие. Так как в целом технология всё ещё очень нова, движения цен на данный тип валют в основном зависят от одного ключевого фактора – мнения людей о данной валюте, которое формируется исходя из новостей ключевых крипто-изданий, анонсов от разработчиков, информации о партнерстве с другими организациями и остальном новостном фоне. Хороший новостной фон вокруг валюты приводит к повышенному вниманию со стороны общественности, что привлекает больше

заинтересованных людей, что повышает спрос, и, как правило, позитивно сказывается на стоимости данной валюты.

Обратную ситуацию мы можем наблюдать при негативном новостном фоне вокруг какой-то криптовалюты – плохие новости зачастую негативно влияют на динамику роста данной валюты.

Однако, данные выводы были сделаны в ходе наблюдений за рынком и не были подкреплены никакими статическими данными. Для подтверждения гипотезы было решено спроектировать и реализовать систему, которая позволила бы проанализировать новостной фон некоторых криптовалют и сравнить результаты анализа с графиком изменения стоимости.

В ходе предварительного исследования было найдено несколько сервисов, предоставляющих анализ тональности текста, среди которых Sentiment140, sentiment_viz, AlchemyAPI и другие. Функционал данных сервисов довольно ограничен и позволяет проанализировать лишь небольшое количество записей.

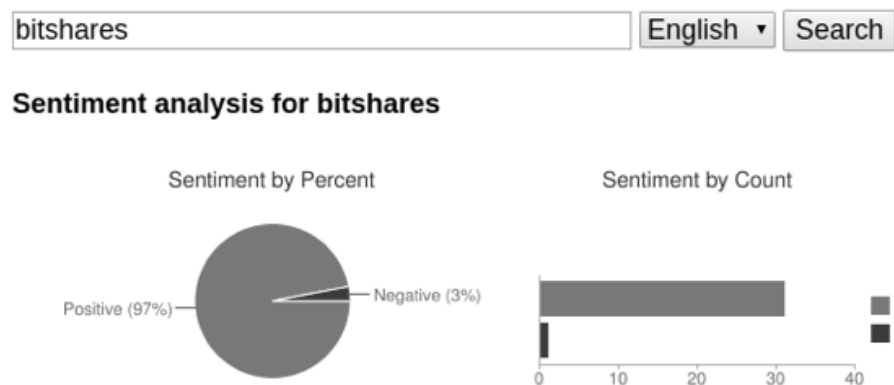


Рис. 5 – Пользовательский интерфейс сервиса Sentiment140

Нами была спроектирована система для обработки новостей, статей, комментариев и прочих текстовых данных, которые непосредственно касались криптовалют. На момент написания данной статьи система всё еще находится в ранних этапах разработки, однако уже имеется рабочий прототип для анализа тональности текста новостей и анонсов, которые люди размещают на площадке “Twitter”.

Для начальных этапов разработки системы было решено использовать более простые в создании и обслуживании методы, а именно – создать классификатор для определения тональности новостей, который будет включать в себя разные подходы к классификации. Было принято решение для каждой поступающей новости вычислять sentiment score – индикатор, показывающий, насколько позитивный или негативный окрас имеет данная новость.

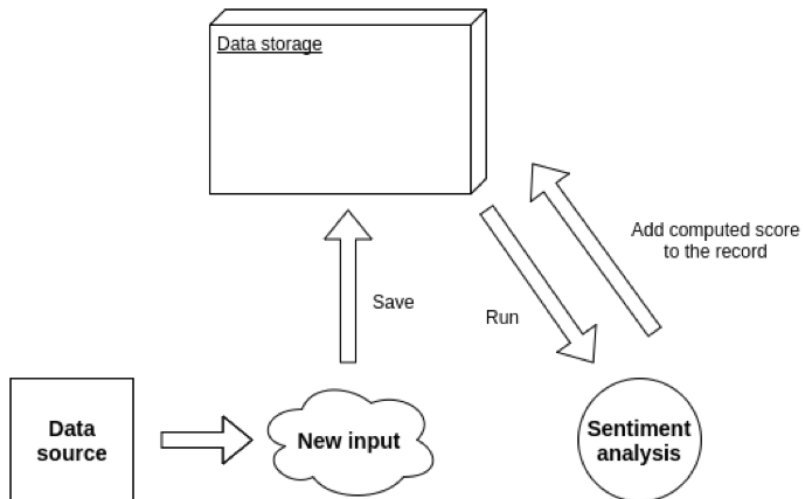


Рис. 6 - Высокоуровневый обзор архитектуры системы для анализа новостей о криптовалютах

Ранее нами было проведено еще одно исследование, в ходе которого была поставлена задача – выяснить, можно ли, используя очень простые правила, извлечь из большого количества неструктурированного текста нужную информацию.

Было решено проверить данное предположение, извлекая факты о сотрудничестве компаний, используя их упоминания в различных пресс-релизах. В исследовании использовались пресс-релизы таких компаний, как Cloudera, Microsoft, Amazon и др.

Для изначальной сборки данных была использована модифицированная версия Apache Nutch. Была скачана информация из общего архива данных, а также более актуальные статьи были собраны непосредственно с официальных сайтов компаний. Ярким примером использованных данных является пресс-релиз компании Cloudera [8].

Система работала следующим образом - на первом этапе были загружены все нужные нам данные, далее данные были помещены в Elasticsearch. После, используя написанный нами скрипт на языке Ruby, итеративно, к каждой статье, был применен следующий алгоритм:

1. Проверить правильность регистра слов в заголовке пресс-релиза.
2. Устранить неправильно написанные слова, используя составленные словари, анализ текста самой статьи
3. Проверить, что все оставшиеся слова, написанные с большой буквы, являются названиями компаний, используя поиск по базе данных компаний на Crunchbase [9], Wikipedia [10] и графе знаний Google [11].
4. Внести информацию о данных компаниях в базу данных, если таковых еще нет
5. Проверить заголовок на наличие отобранных нами слов, обозначающих сотрудничество между двумя сторонами

б. Если таковые имеются, то проверить расположение названий компаний и найденных слов относительно друг друга и, если они соответствуют правилам, то внести в базу данных запись о сотрудничестве этих двух компаний

Из-за своей простоты, алгоритм потребовал много времени отладки, заполнения словарей и отбора исключений. Однако, он всё равно дал очень неплохой результат. Из нескольких десятков тысяч статей мы смогли собрать информацию о сотрудничестве более 150 компаний. На Рис. 7 показан скриншот собранных данных в PostgreSQL на ранних этапах работы алгоритма.

	id [PK] serial	names character varying[]		company1_id integer	company2_id integer
1	1	{Cloudera,"Cloudera Inc.",	1	4	5
2	2	{Google,"Google Inc","Goog	2	6	1
3	3	{Dell}	3	7	1
4	4	{Cloudera39s}	4	1	8
5	5	{Hadoop}	5	1	9
6	6	{Talend}	6	1	10
7	7	{Informatica}	7	11	1
8	8	{"Digital Reasoning"}	8	1	12
9	9	{Cseries}	9	13	1
10	10	{"Hadoop MetaScale"}	10	14	1
11	11	{Oracle}	11	15	1
12	12	{Converse}	12	1	16
13	13	{Caggemini}	13	17	1
14	14	{Splunk}	14	1	5
15	15	{FICO}	15	18	1
16	16	{"Cloudera Enterprise"}	16	1	19
17	17	{Persado}	17	1	20
18	18	{Accenture}	18	1	21
19	19	{Udacity}	19	22	1
20	20	{"Red Hat"}	20	1	3
21	21	{"Microsoft Azure"}	21	23	1
22	22	{Telkomsel}	22	24	25
23	23	{NEC}	23	26	1
24	24	{"Cloudera Science Week"}			
25	25	{AsiaPacific}			
26	26	{Experian}			
*					

Рис. 7 – Данные о компаниях

Полученную информацию мы позже преобразовали и внесли в базу данных, основанную на графах – Neo4j. Ниже, на Рис. 8 и Рис. 9, приведены примеры собранных данных.

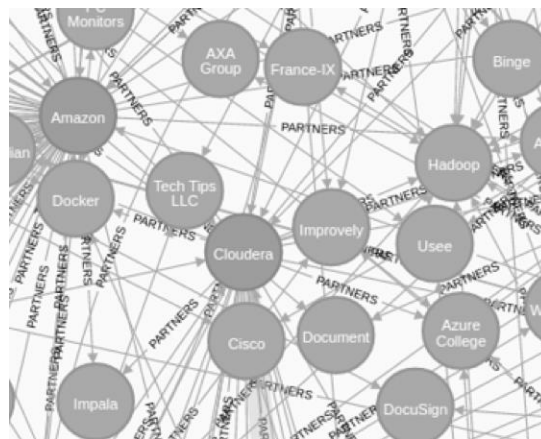


Рис. 8 – Связи между собранными данными

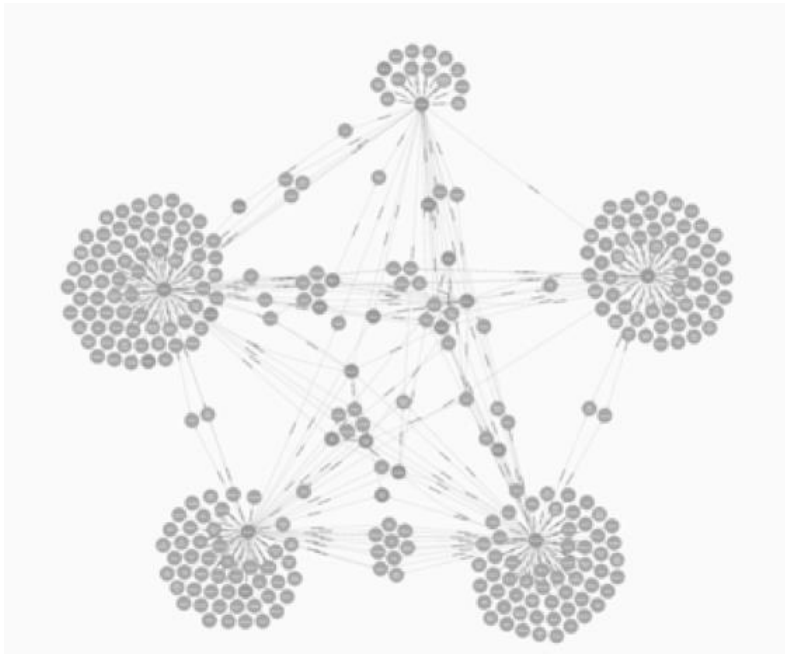


Рис.9 – Связи между собранными данными

7 Выводы

В данной работе были рассмотрены основные направления и способы анализа естественного языка, а также методы обработки текстовых данных. Приведено описание существующих инструментов и библиотек для Natural Language Processing. В приведенных примерах используются некоторые из упомянутых в статье методы обработки и классификации текста.

В эксперименте с оценкой котировок криптовалют можно полагать, что есть некоторая зависимость между значением тональности текста и обменным курсом.

В эксперименте с анализом фактов о сотрудничестве компаний с помощью их упоминаний в пресс-релизах был создан граф взаимодействия более 150 компаний.

Подводя итог можно сделать вывод что в современном мире, в среде постоянно растущих объемов информации, анализ текстовых данных имеет большой потенциал и широкое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка естественного языка – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Обработка_естественного_языка
2. DeepDive Tutorial. Extracting mentions of spouses from the news – Режим доступа: <http://deepdive.stanford.edu/example-spouse>
3. Анализ тональности текста – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Анализ_тональности_текста

4. John S. Ball Using NLU in Context for Question Answering: Improving on Facebook's bAbI Tasks –ARXIV, Электронная версия печ. публикации arXiv:1709.04558, 09/2017 – PDF формат, версия 2 – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1709/1709.04558.pdf>
5. Neural Machine Translation (seq2seq) Tutorial – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/tutorials/seq2seq>
6. Word2vec – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Word2vec>
7. LSTM – сети долгой краткосрочной памяти – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/wunderfund/blog/331310/>
8. Cloudera Broadens its Collaboration with Thorn to Include Software and Services to Fight Child Sexual Exploitation – Режим доступа: <https://www.cloudera.com/more/news-and-blogs/press-releases/2016-09-28-cloudera-broadens-its-donation-to-thorn-to-include-software-services-fight-child-sexual-exploitation.html>
9. Crunchbase – Режим доступа: <https://www.crunchbase.com/>
10. Wikipedia – Режим доступа: <https://www.wikipedia.org/>
11. Knowledge – Inside Search – Google - Режим доступа: <https://www.google.com/intl/bn/insidesearch/features/search/knowledge.html>
12. Stanford CoreNLP – Режим доступа: <https://stanfordnlp.github.io/CoreNLP/>
13. Natural Language Toolkit – Режим доступа: <http://www.nltk.org/>
14. Creating a module for Sentiment Analysis with NLTK – Режим доступа: <https://pythonprogramming.net/sentiment-analysis-module-nltk-tutorial/>
15. TensorFlow – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/>
16. Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, Illia Polosukhin Attention Is All You Need – ARXIV, Электронная версия печ. публикации arXiv:1706.03762, 06/2017 – PDF формат, версия 5 – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762.pdf>
17. Zhang, X. Character-level convolutional networks for text classification / Xiang Zhang, Junbo Zhao, Yann LeCun // In Advances in Neural Information Processing Systems. — 2015. — Feb. — 649 - 657 p.
18. Andrej Karpathy The Unreasonable Effectiveness of Recurrent Neural Networks – 04/2015– Режим доступа: <http://karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness/>

UDC 532.5

Modeling of the viscous fluid flow around rotating circular cylinders with the lattice Boltzmann method at moderate Reynolds numbers

G. Bulanchuk, A. Ostapenko

Pryazovskyi State Technical University, Ukraine

In this work the task of the viscous fluid flow around both a circular cylinder which rotates with the constant speed in a plane channel and a lattice of rotating cylinders has been numerically solved by the lattice Boltzmann method. The method of setting the boundary conditions on the rotating cylinder boundary has been developed and tested. The comparison of obtained results with known numerical results obtained by other numerical methods has been made. Both stationary and periodic solutions have been investigated. The dependence of the computational grid resolution on the cylinder rotation speed for the predefined accuracy has been shown.

Keywords: *viscous fluid, rotating circular cylinder, lattice of cylinders, Boltzmann equation, Reynolds number.*

В роботі методом ґраткових рівнянь Больцмана чисельно розв'язувалася задача обтікання потоком в'язкої рідини кругового циліндра в плоскому каналі та решітки кругових циліндрів, що обертаються зі сталою швидкістю. Була розроблена та протестована методика задання граничних умов на границі циліндра, що обертається. Проведено порівняння отриманих результатів із відомими чисельними розв'язками, що були отримані іншими методами. Досліджувались як стаціонарні так і періодичні режими течій. Показана залежність розміру розрахункової сітки від швидкості обертання циліндру при заданій точності.

Ключові слова: *в'язка рідина, обертальний круговий циліндр, решітка циліндрів, рівняння Больцмана, число Рейнольдса.*

В данной работе с помощью методом решеточных уравнений Больцмана численно решалась задача обтекания потоком вязкой жидкости кругового цилиндра в плоском канале и решетки круговых цилиндров, которые вращаются с постоянной скоростью. Была разработана и протестирована методика задания граничных условий на границе вращающегося цилиндра. Проведено сравнение полученных результатов с известными численными решениями, полученными другими методами. Исследовались как стационарные, так и периодические режимы течений. Показана зависимость размера расчетной сетки от скорости вращения цилиндра при заданной точности.

Ключевые слова: *вязкая жидкость, вращающийся круговой цилиндр, решетка цилиндров, уравнение Больцмана, число Рейнольдса.*

1. Introduction

Rotating circular cylinder is a classical problem in fluid mechanics [1, 2]. During a cylinder rotation, a symmetric flow around it becomes disrupted and forms a circulation flow [2]. In this case, a flow rate increases on the one hand of a rotating cylinder and decreases on the other one. The speed difference entails the difference in pressure. Thus, the additional lift appears (the Magnus effect [3]).

In this paper, to simulate the fluid flow around a rotating cylinder the lattice Boltzmann method has been used. Usage of this method, based on the kinetic theory of gases, started in 1990 and is growing rapidly [4]. One of the advantages of this

method are simplicity of understanding and programming, due to all stages being well understood processes of a particle collision and a particle transport which are described by the linear equations and therefore can be solved with the explicit schemes. There is also a possibility to parallelize the algorithm on CPU using the OpenMP technology and on GPU, using the CUDA technology. The usage of the CUDA technology provides a significant speed-up of computations, approximately in 50-70 times [5].

The lattice Boltzmann method is one of the new promising approaches in the computational fluid dynamics and it is widely used for the simulation of the conventional and multiphase flows [6], the multi-component flows [7], the flows with the free boundaries [8], the heat transfer [9] and the calculation of hydrodynamic coefficients [10]. The method has been already used for the flow simulation around a rotating circular cylinder built on complex boundaries [11-12], but clear and universal rules for setting the rotating boundary condition have not been given.

The aim of this work is to develop and test the boundary conditions needed to specify the rotation of a circular cylinder constructed along the edges of the computational grid cells with the lattice Boltzmann method. The obtained results have been compared with the similar results obtained with other numerical experiments.

2. The lattice Boltzmann method

For the fluid dynamics simulation with the lattice Boltzmann method, the pseudo particles described by the discrete particle density distribution function f_k [13-15] have been used. The particle displacement probability in one of the k directions has been described by the distribution function values. It should be noted that in the kinetic theory of gases, the particle density distribution function determines the density of the probability of finding the particle around the point of the six-dimensional phase space (coordinates and velocities) [16].

The computational field is divided by the square cells with the length d . There are nine values of the particle density distribution function in each cell. Thus, particles can move to one of the eight possible directions or stay at rest (fig.1). This model is called two-dimensional nine-vectors model of the lattice Boltzmann method (D2Q9) [13-15].

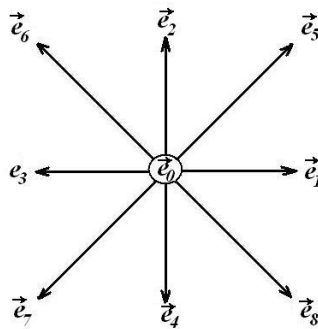


Fig. 1. Possible directions of the particle movement according to D2Q9 model

To determine the size of cells d , the fluid kinematic viscosity ν and the number of cells per length N are set. The time step is calculated according to the equation [17]:

$$\Delta t = \frac{1}{3} \frac{d^2}{\nu} \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

where τ – nondimensional parameter of relaxation [17]. According to equation (1) and basing on the condition $\Delta t > 0$, the limitation of the relaxation parameter is $\tau > 0.5$.

Such modeling parameters as the lattice speed c and the lattice speed of sound c_s are defined as [18]:

$$c_s = \frac{1}{\sqrt{3}} c = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{d}{\Delta t} \quad (2)$$

The system of the discrete kinetic equations that describes the movement of pseudo particles is [17]:

$$f_k(\vec{r} + \vec{e}_k d, t + \Delta t) = f_k(\vec{r}, t) + \Omega_k, \quad k = \overline{0,8}. \quad (3)$$

where Ω_k – collision operator [17] (the model of the collision integral from the integral Boltzmann equation);

$\vec{r} = (x, y)$ – coordinates;

t – time.

The model of the collision integral is presented in the BGK (Bhatnagar-Gross-Krook) approximation form [17], which is the linear relaxation to the local Maxwell equilibrium:

$$\Omega_k = \frac{f_k^{eq}(\vec{r}, t) - f_k(\vec{r}, t)}{\tau} \quad (4)$$

In the LBM for isothermal flows, the expansion of the Maxwell equilibrium distribution function by the powers of the velocity vector \vec{u} has form [19]:

$$f_k^{eq}(\vec{r}, t) = w_k \rho(\vec{r}, t) \left(1 + \frac{(c\vec{e}_k, \vec{u}(\vec{r}, t))}{c_s^2} + \frac{1}{2} \frac{(c\vec{e}_k, \vec{u}(\vec{r}, t))^2}{c_s^4} - \frac{1}{2} \frac{\vec{u}(\vec{r}, t)^2}{c_s^2} \right) \quad (5)$$

where w_k – weights;

ρ – fluid density;

\vec{u} – velocity vector.

The weights for the D2Q9 model are: $w_0 = \frac{4}{9}$; $w_{1-4} = \frac{1}{9}$; $w_{5-8} = \frac{1}{36}$ [17].

The conversion from the particle density distribution function to the fluid properties such as density ρ , velocity \vec{u} and pressure p is performed according to equations [17]:

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_{k=0}^8 f_k(\vec{r}, t); \quad \vec{u}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\rho(\vec{r}, t)} \sum_{k=0}^8 c \vec{e}_k f_k(\vec{r}, t); \quad p(\vec{r}, t) = c_s^2 \rho(\vec{r}, t) \quad (6)$$

It is known that the disadvantage of the LBM is conditional stability [14, 15, 19-21]. The stability of the solution is affected by:

- c_s – the lattice speed of sound: as shown in [14], the method remains stable when: $c_s < \sqrt{1 - U_{\max}^2}$, where U_{\max} is the maximum speed value in the computational domain;
- τ – the relaxation parameter: to avoid the negative influence of the relaxation parameter on the numerical results, it is usually set as $\tau = 1$ [15];
- c – the lattice speed: as shown in [19, 20], the method remains stable when $M \ll 1$, where M is the lattice Mach number calculated by the equation:

$$M = \frac{U_{\max}}{c} \quad (7)$$

3. Setting the boundary conditions

There are several methods of setting the boundary conditions in LBM [15, 22-24] which can be chosen according to the task.

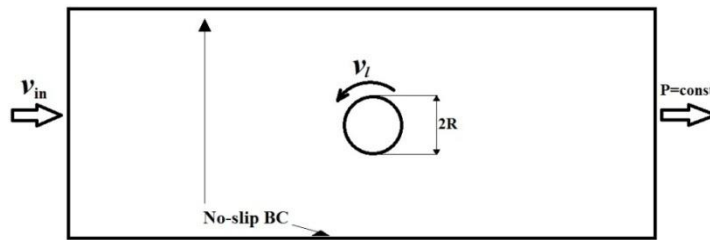


Fig. 3. Boundary conditions

In this work the following boundary conditions (BC) are used (fig. 3):

➤ No-slip BC. The method for setting the no-slip BC is described in [22] in details and it is implemented by setting the condition of the particles reflection from the boundary in the opposite direction.

➤ Inlet BC. Inlet BC. When the inlet BC is set, there are two levels that describe fluid: the macroscopic level and the microscopic one. Firstly, at the macroscopic level, the velocity components are set. The fluid density on the boundary can be calculated according to the method described in [24, 25] using the known distribution function values. As the lattice speed of sound is a variable value, the density is calculated according to the equation:

$$\rho(\vec{r}, t) = \frac{(f_0 + f_2 + f_4) + 2(f_3 + f_6 + f_7)}{1 - \frac{1}{c} u_x(\vec{r}, t)}$$

Then, at the microscopic level, the unknown distribution function values on the boundary can be calculated by formulas [25]:

$$f_1(\vec{r}, t) = f_3(\vec{r}, t) + \frac{2}{3c} \rho(\vec{r}, t) u_x(\vec{r}, t)$$

$$f_5(\vec{r}, t) = f_7(\vec{r}, t) + \frac{1}{2} (f_4(\vec{r}, t) - f_2(\vec{r}, t)) + \frac{1}{6c} \rho(\vec{r}, t) u_x(\vec{r}, t)$$

$$f_8(\vec{r}, t) = f_6(\vec{r}, t) + \frac{1}{2} (f_2(\vec{r}, t) - f_4(\vec{r}, t)) + \frac{1}{6c} \rho(\vec{r}, t) u_x(\vec{r}, t)$$

➤ **Outlet BC.** The fluid flow from a channel is implemented by the constant pressure boundary condition at the outlet of channel [25]. For this purpose, firstly set the u_x velocity component on the boundary which is equal to the velocity on the previous layer of the computational grid $u_x(N_x - 1, j) = u_x(N_x - 2, j)$. Here N_x is a number of cells along x axis. Velocity component u_y is set as zero: $u_y(N_x - 1, j) = 0$. All nine values of the distribution function are recalculated according to the equation (5). Thus, there is the relaxation of the distribution function to the local equilibrium on the right boundary.

➤ **Symmetric BC.** Using the symmetric BC particles that move over the boundary not reflecting from it but transferring to the opposite boundary without changing their direction (fig. 4) [22].

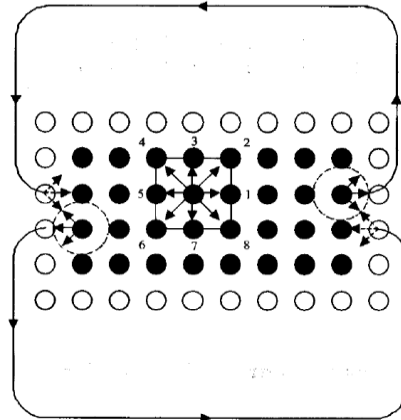


Fig. 4. The motion scheme of the particles. The symmetric boundary conditions are applied to the side walls

For setting the rotation of a cylinder the following technique is proposed. Consider a circular cylinder with radius R , which rotates with the constant linear speed v_l . A circumference shown in fig. 5 corresponds to the boundary layer of the cells with a fluid that are directly adjacent to the cylinder. Knowing the rotating speed of the cylinder the velocity components v_x, v_y in each cell with a fluid that borders the cylinder can be calculated. For this, knowing that the velocity vector is directed along tangent, we can use the property of the perpendicular vectors:

$$\vec{v} \cdot \vec{r} = 0 \quad (8)$$

where $\vec{v} = (v_x, v_y)$ – the velocity vector at any point on the circumference;

\vec{r} – the radius vector from an arbitrary point on the circumference to its center (AO vector in fig.5);

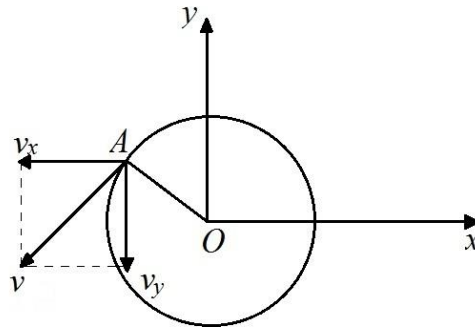


Fig. 5. The direction of the velocity vector and its components in any point of the circumference

The linear velocity of rotation v_l is a velocity vector module \vec{v}

$$v_l = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (9)$$

Combining equations (8-9) we obtain the system of nonlinear equations for the each cell with a fluid from the circumference in fig. 5.

$$\begin{cases} \vec{v} \cdot \vec{r} = 0, \\ |\vec{v}|^2 = v_l^2. \end{cases} \quad (10)$$

Solving the system (10) numerically by using the Newton method we got the velocity components values v_x, v_y for each fluid cell. For all fluid cells that border the cylinder we set all nine values of the particle density distribution function using equation (5) of the Maxwell equilibrium distribution function.

4. Results of the modeling

All calculations presented below have been obtained using original program written in C++ language in the development environment software Visual Community2015 using CPU parallel technology OpenMP.

4.1. Rotating circular cylinder modeling

To test the proposed method of setting the rotating conditions in LBM, the series of calculations of laminar flows around a rotating cylinder at Reynolds number $Re = 200$ and at dimensionless rotating speed belonging to the range $v_l = 0,5 - 3$ have been conducted. The obtained results, namely, the flow patterns have been compared with the known experimental data [1-3].

The results of the calculations have been obtained as periodic solutions and stationary circulating flows. Possible instability of a numerical solution is a feature of modeling such flows with the lattice Boltzmann method. When cylinder rotating speed increases, the lattice Mach number also increases according to formula (7). To avoid

the increase of the lattice Mach number and, consequently, instability, the lattice speed c must be decreasing. Lattice speed c reduction can be achieved by grinding the computational grid, which leads to the increase in the simulation time.

Let us set the kinematic viscosity $\nu = 6,25 \cdot 10^{-5}$, the diameter of the cylinder $D = 0,125$, the fluid velocity at the entrance of the channel $U_{in} = 0,1$, the relaxation parameter $\tau = 0,55$, the simulation time $T = 20$ and the size of the domain 2×1 . Thus, the Reynolds number is $Re = 200$ and the blockage ratio is $B = 1/D = 8$. Also the series of calculations with these parameters to get the lattice Mach number $M \approx 0,15$ have been conducted. A larger value M will result in increasing an error of the numerical solution, as shown in [19, 20]. The results of the numerical solutions are presented in the table 1.

Tab. 1. Dependence of the rotation speed of a cylinder on the modeling parameters

Rotation speed v_l	$v_l = 0,5$	$v_l = 1,0$	$v_l = 1,5$	$v_l = 2,0$	$v_l = 3,0$
Number of cells N	300	300	350	400	550
Time step Δt	0,00296	0,00296	0,00218	0,0025	0,00182
Lattice speed c	1,125	1,125	1,3125	1,5	2,0625
Mach number M	0,144	0,163	0,158	0,159	0,156
Solution time (min)	44	43	87	141	460

Flow patterns for different cylinder rotation speeds are shown in figure 6.

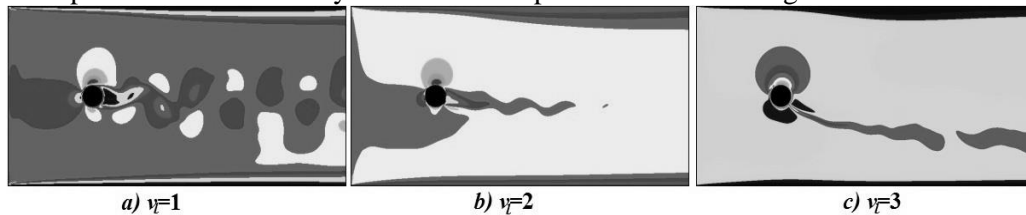


Fig. 6 – Flows around a rotating circular cylinder at Reynolds number $Re = 200$ and at different rotation speeds

As shown in figure 6, when the fluid flows around a rotating circular cylinder the circulating current appears. A solution can be periodic or stationary depending on the cylinder rotation speed. It should be noted that the transition from the periodic to the stationary solution occurs at the rotation speed critical values $v_l^{cr} = 1,9$ for the Reynolds number $Re = 200$. The same results have been shown in [3]. Thus, the obtained results fully correspond to the existing data.

As shown in table 1, the solution time increases with an increase of the rotation speed (fig. 7).

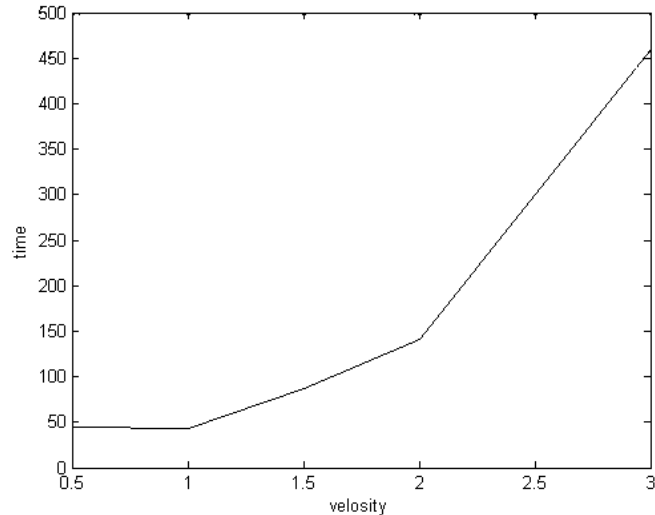


Fig. 7. Graph of the dependence of the solution time from the cylinder rotation speed at the Reynolds number $Re=200$

The reason for this growth is the grinding of the computational grid, required to obtain the lattice Mach number $M \approx 0,15$. Therefore, the calculations for the rotation speed $v_i > 3$ have not been carried out in this work. Nevertheless, these results can be obtained by using algorithm parallelization on GPU using CUDA technology, which could increase calculation speed up to 100 times depending on the computational capabilities of the graphics card [5].

4.2. Modeling a lattice of rotating circular cylinders

Let us make the series of similar calculations for a lattice of rotating cylinders. To do this, we define the symmetry boundary conditions on the top and the bottom boundaries of the domain, as has been shown in the previous section. The received flow patterns are corresponding to the flows at Reynolds number $Re=200$, shown in Fig. 8.

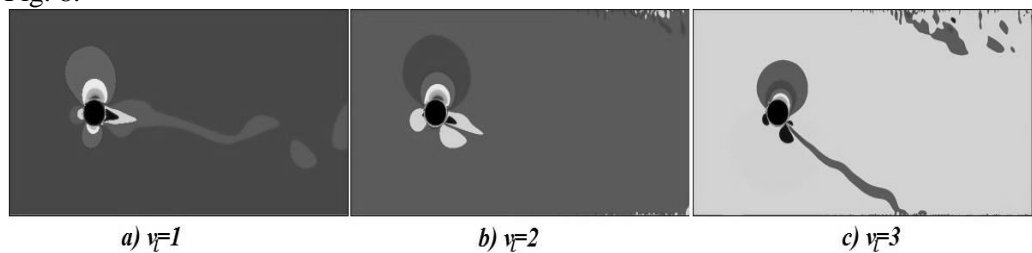


Fig. 8. Flow around a lattice of rotating circular cylinders at Reynolds number $Re = 200$ at different rotational speeds

As shown in Fig. 8, there is not the vortex separation from cylinders for the speed range $v_i = 1-3$ and the solutions are stationary. If the rotation speed is less than the

velocity of the fluid flow, i.e. $v_l < 1$, there is the separation of vortices and the solution is periodic (fig. 9).

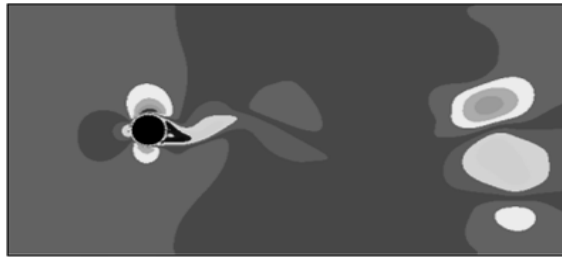


Fig. 9. Flow around a lattice of rotating circular cylinders at Reynolds number $Re = 200$ and $v_l = 0,5$

Thus, the flow pattern in the simulation of a lattice of rotating cylinders differs from the flow in a channel with the same parameters. Moreover, the critical rotation speed value at which the solution transits from the periodic to the stationary one for the case of the flow around a lattice of cylinders is less than for the case of the flow in a channel.

Conclusion

The paper presents the results of modeling the two-dimensional problem of a viscous fluid flow around a rotating circular cylinder in a plane channel and the flow around a lattice of rotating cylinders with the lattice Boltzmann method. The method of defining the boundary conditions for the rotation of cylinders for simple geometry, in which the cylinder is constructed along the edges of the cells of the computational grid has been proposed and tested. Both periodic and stationary regimes of the received flows have been shown. We have determined the critical number of the circular cylinder rotation speed, at which the transition from periodic solution (when the vortex track behind a cylinder is observed) to the stationary one occurs. Namely, $v_l^{kr} = 1,9$ for the Reynolds number $Re=200$ which corresponds to the results of other authors. The dependence of the cylinder rotation speed on the solution time has been shown. The data confirm the adequacy of the proposed method of setting the rotation conditions. Furthermore, this technique is much simpler in terms of description and programming. It should be noted that the lattice Boltzmann method is of great potential. We are planning to obtain a sustainable solution for large Reynolds numbers in further researches.

REFERENCES

1. Mazo A. B. Numerical Simulation Of a Viscous Separation Flow Around a Rotating Circular Cylinder / A. B. Mazo, I. V. Morenko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2006. – Vol. 79, No. 3. – P. 496 – 502
2. Mittal S. Flow Past a Rotating Cylinder / S. Mittal, B. Kumar // J. Fluid Mech. – 2003. – Vol. 476. – P. 303-334

3. Калинин Е. И. Стационарные и периодические режимы ламинарного обтекания вращающегося цилиндра / Е. И. Калинин, А. Б. Мазо // Ученые записки ЦАГИ. – 2011. – Т. 17, № 5. – С. 59 - 71
4. Succi S. The Lattice Boltzmann Equation: A New Tool For Computational Fluid-Dynamics / S. Succi, R. Benzi // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1991. – Vol. 47. – P. 219-230.
5. Куперштох А.Л. Трехмерное моделирование двухфазных систем типа жидкость-пар методом решеточных уравнений Больцмана на GPU / А.Л. Куперштох // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – № 13. – С. 130-138.
6. Leclaire S. Enhanced equilibrium distribution functions for simulating immiscible multiphase flows with variable density ratios in a class of lattice Boltzmann models / S. Leclaire, N. Pellerin, M. Reggio, J.-Y. Trepanier // International Journal of Multiphase Flow. – 2013. – Vol. 57. – P. 159-168.
7. Anderl D. Free surface lattice Boltzmann with enhanced bubble model / D. Anderl, S. Bogner, C. Rauh, U. Rude, A. Delgado // Computers and Mathematics with Applications. – 2014. – Vol.67, № 2. – P. 331-339.
8. Coupanec E. Boundary conditions for the lattice Boltzmann method. Mass conserving boundary conditions for moving walls / E. Coupanec. – Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Department of Energy and Process Engineering, 2010. – 39 p.
9. Grazyna K. The numerical solution of the transient heat conduction problem using the lattice Boltzmann method / K. Grazyna // Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science. – 2006. – № 11. – P. 23-30.
10. Yu D. Viscous flow computations with the method of lattice Boltzmann equation / D. Yu, R. Mei, L. Luo, W. Shyy // Progress in Aerospace Sciences. – 2003. – V. 39. – P. 329-367
11. Zu Y. Q. Numerical method of lattice Boltzmann simulation for flow past a rotating circular cylinder with heat transfer / Y. Q. Zu, Y. Y. Yan // Int. J. of Num. Methods for Heat and Fluid. – 2008. – V. 18, N. 6. – P. 766-782
12. Fallah K. Numerical simulation of flow around two rotating circular cylinders in staggered arrangement by multi-relaxation-time lattice Boltzmann method at low Reynolds number / K. Fallah, A. Fardad, N. Sedaghatizadeh, E. Fattahi, A. Ghaderi // World Applied Sciences Journal. – 2011. – 15 (4). – P. 544-554
13. Mussa M. Numerical Simulation of Lid-Driven Cavity Flow Using the Lattice Boltzmann Method / M. Mussa // Applied Mathematics. – 2008. – Vol. 13. – P. 236-240.
14. Wolf-Gladrow D. Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models - An Introduction / D. Wolf-Gladrow. – Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine, 2005. – 273 p.
15. Succi M. Lattice Boltzmann Modeling. An Introduction for Geoscientists and Engineers / M. Succi. – Miami: Springer, 2006. – 171 p.
16. Ляпин И.И. Введение в теорию кинетических уравнений: Учебное пособие / И.И. Ляпин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 205 с.

17. Rettinger C. Fluid Flow Simulation using the Lattice Boltzmann Method with multiple relaxation times / C. Rettinger. – Erlanger: Friedrich-Alexander University Erlanger-Nuremberg, 2013. – 38 p.
18. Mohamad A.A. Lattice Boltzmann Method. Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes / A.A. Mohamad. – London: Springer, 2011. – 178 p.
19. He X. Lattice Boltzmann Model for the Incompressible Navier – Stokes Equation / X. He // Journal of statistical physics. – 1997. – Vol.88. – P. 927–944.
20. Bulanchuk G. Stability investigation of the two-dimensional nine-vectors model of the lattice Boltzmann method for fluid flows in a square cavity / G. Bulanchuk, O. Bulanchuk, A. Ostapenko // Вестник Харьковского нац. унив. им. В.Н. Каразіна. Серия: Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. –2015. – № 28. – С. 113-125.
21. Aslan E. Investigation of the Lattice Boltzmann SRT and MRT Stability for Lid Driven Cavity Flow / E. Aslan, I. Taymaz, A.C. Benim // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2014. – Vol.2, №4. – P. 317-324.
22. Succi S. The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond / S. Succi. – Oxford: University Press, 2001. – 288 p.
23. Latt J. Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method / J. Latt, B. Chopard, O. Malaspinas, M. Deville, A. Michler // Physical Review. – 2008. – Vol. 77. – P.1-17.
24. Zou Q. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model / Q. Zou, X. He // Phys. Fluids. – 1997. – Vol. 9, No. 6. – P. 1591-1598
25. Остапенко А. А. Исследование влияния переменной скорости звука в ячейке при моделировании течения в плоском канале и обтекания кругового цилиндра потоком вязкой жидкости при расчете методом решеточных уравнений Больцмана / А. А. Остапенко, О. Н. Буланчук, Г. Г. Буланчук // Вестник Черкасского унив. Серия физ-матем. н. – 2016. – № 1. – С. 50-64

УДК 51.76, 519.6

Обратное преобразование Радона не содержащее сингулярной фильтрации

А. И. Вайсбурд, Т. Г. Вихтинская, К. Э. Немченко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

В работе изложены результаты исследования в области компьютерной томографии, на основе которого предложен метод восстановления внутренней структуры исследуемого объекта. Идея заключается в использовании обратного преобразования Радона, которое не приводит к возникновению сингулярного ядра. В работе проведен проверка данного метода и его сравнение с уже существующими методиками.

Ключевые слова: преобразования Радона, теорема о центральном сечении, обратное проектирование, рамп - фильтр, гауссов фильтр низких частот.

В роботі викладені результати дослідження в області комп'ютерної томографії, на основі якого запропонований метод відновлення внутрішньої структури досліджуваного об'єкта. Ідея полягає в використанні зворотного перетворення Радону, яка не призводить до виникнення сингулярного ядра. В роботі проведено перевірка даного методу і його порівняння з уже існуючими методиками.

Ключові слова: перетворення Радону, теорема про центральний перетин, зворотне проектування, рамп-фільтр, гаусів фільтр низьких частот.

The paper presents the results of a study in the field of computed tomography, on the basis of which the method for reconstructing the internal structure of a studied object has been proposed. The idea is to use the inverse Radon transform, which does not lead to the emergence of a singular nucleus. In this work, this method has been tested and compared with the existing methods.

Keywords: Radon transform, central cross-section theorem, reverse projection, ramp filter, Gaussian low-pass filter.

1. Введение

Во многих областях науки, таких как медицина, геофизика, астрофизика, промышленная дефектоскопия, диагностика плазмы и других, возникает проблема определения внутренней структуры объекта. Для решения данной задачи во многих случаях являются неприемлемыми прямые методы исследования, связанные с разрушением объекта, поэтому создаются специальные системы получения данных. Физический принцип этих систем состоит в использовании воздействия, представляющего собой процесс произвольной природы (излучение, волновое поле и т.д.), и последующей регистрацией отклика этого процесса на объект.

Важную роль в определении внутренней структуры объекта играют исследования связанные с определением 3D - функций истинного распределения таких параметров как температуры, плотности, концентрации компонент в объемах исследуемых объектов. Возможность получения такого рода данных позволяет разрабатывать новые, более точные модели физических объектов, глубже понимать физические процессы и явления протекающие в них и пр. Поэтому, разработка новых методов для решения задач реконструкции функций распределения исследуемых параметров объектов является актуальной задачей.

2. Преобразование Радона

В основе большинства томографов лежит идея, состоящая в том, что внутреннюю структуру объекта можно представить, получив ряд параллельных поперечных сечений [1-5]. Поэтому главная задача компьютерной томографии состоит в получении двумерного (плоского) изображения поперечного сечения исследуемого объекта, которая и будет рассмотрена далее.

Метод получения двумерного томографического изображения содержит два этапа. На первом этапе формируются проекционные данные, на втором по проекционным данным восстанавливается изображение поперечного сечения. Обозначив плотность распределения в исследуемом слое как $f(x,y)$ для регистрируемого одномерного изображения $F(X,\alpha)$, которое соответствует проекции сделанной под углом α , получаем следующее выражение:

$$F(X, \alpha) = \int f(x, y) dl. \quad (1)$$

Здесь интеграл берется вдоль луча проектирования, X – координата на детекторе, dl – элемент длины луча проектирования.

Связь между декартовыми координатами x и y в слое, и координатами l на луче и X и детекторе дается соотношениями

$$\begin{cases} x(l, X) = X \cos \alpha - l \sin \alpha \\ y(l, X) = X \sin \alpha + l \cos \alpha \end{cases} \text{ и } \begin{cases} X = x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ l = y \sin \alpha - x \cos \alpha \end{cases}, \quad (2)$$

которые позволяют переписать интеграл (1) в виде двукратного интеграла:

$$F(X, \alpha) = \int dx dy \delta(x \cos \alpha + y \sin \alpha - X) f(x, y). \quad (3)$$

Если входящую в (3) дельта-функцию записать через ее Фурье-представление:

$$\delta(x) = \int \frac{dQ}{2\pi} \exp(iQx), \quad (4)$$

то выражение (3) приобретет вид:

$$F(X, \alpha) = \int \frac{dQ}{2\pi} \int dx dy \exp(iQ(x \cos \alpha + y \sin \alpha - X)) f(x, y) \quad (5)$$

Теперь, как и для дельта-функции, следует записать Фурье представление исходной функции распределения:

$$f(x, y) = \int \frac{dk_x dk_y}{(2\pi)^2} g(k_x, k_y) \exp(ik_x x + ik_y y) \quad (6)$$

где $g(k_x, k_y)$ – Фурье-образ функции $f(x, y)$, который определяется следующим образом:

$$g(k_x, k_y) = \int dx dy f(x, y) \exp(-ik_x x - ik_y y) \quad (7)$$

Подставив (6) в (5) и выполняя интегрирование по пространственным координатам для функции $F(X,\alpha)$ получаем выражение

$$F(X, \alpha) = \int \frac{dQ}{2\pi} e^{+iQX} g(Q \cos \alpha, Q \sin \alpha). \quad (8)$$

Это выражение формально является разложением Фурье

$$F(X, \alpha) = \int \frac{dQ}{2\pi} e^{+iQX} G(Q, \alpha) \quad (9)$$

функции $F(X, \alpha)$, поэтому для Фурье-образа этой функции получаем следующее соотношение

$$G(Q, \alpha) = g(Q \cos \alpha, Q \sin \alpha), \quad (10)$$

Суть преобразования Радона сводится к использованию проекции $F(X, \alpha)$ для нахождения исходной функции распределения $f(x, y)$. С этой целью в (6) совершаем переход в полярную систему координат в соответствии с законом преобразования

$$\begin{cases} k_x = k \cos \beta \\ k_y = k \sin \beta \end{cases}, \text{ где } 0 < k < +\infty, 0 \leq \beta < 2\pi. \quad (11)$$

В этих координатах соотношение (6) представляется в виде

$$f(x, y) = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} \frac{k dk d\beta}{(2\pi)^2} g(k \cos \beta, k \sin \beta) \exp(ikx \cos \beta + iky \sin \beta). \quad (12)$$

Далее в этом соотношении необходимо перейти к новым переменным, которые равны старым $q = k$ и $\gamma = \beta$, но заданным в другой области определения:

$$-\infty < q < +\infty, 0 \leq \gamma < \pi.$$

В этих переменных интегрирование (12) примет вид

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{\pi} \frac{|q| dq d\gamma}{(2\pi)^2} g(q \cos \gamma, q \sin \gamma) \exp(iqx \cos \gamma + iqy \sin \gamma) \quad (13)$$

Сравнение (13) и (10) показывает, что в них входит одна и та же функция $g(q \cos \gamma, q \sin \gamma)$ своих аргументов, причем области определения аргументов совпадают. Это заключение позволяет связать Фурье-образ $G(Q, \alpha)$, где α – угол проекции в обычном пространстве, с Фурье-образом плотности $g(q \cos \gamma, q \sin \gamma)$, где γ – угловая переменная в Фурье-пространстве:

$$g(q \cos \gamma, q \sin \gamma) = G(Q, \alpha) \Big|_{\alpha=\gamma, Q=q}. \quad (14)$$

Полученное соотношение представляет собой так называемую теорему о центральном сечении [6-8].

Используя связь (15) приводим (14) к виду

$$f(x, y) = \int \frac{|Q| dQ d\alpha}{(2\pi)^2} G(Q, \alpha) \exp(iQx \cos \alpha + iQy \sin \alpha). \quad (15)$$

Это выражение представляет собой искомое решение задачи о восстановлении и отражает суть преобразований Радона. Таким образом, исходя из (15), обратное преобразование Радона может быть записано в виде

$$f(x, y) = \int d\alpha dX F(X, \alpha) R(X - x \cos \alpha - y \sin \alpha). \quad (16)$$

Здесь

$$R(z) = \int \frac{|Q| dQ}{(2\pi)^2} \exp(-iQz) \quad (17)$$

формально представляет собой ядро обратного преобразования Радона, и дальнейшие исследования теперь сводятся к поиску явного вида этой функции.

Основной проблемой при этом является тот факт, что интеграл (17) содержит особенность и, поэтому, вместо него используется приближенные функции [8-10], которые отражают основные свойства функции (17), но при этом приводят к приближенному восстановлению.

К простейшим из таких методов относится введение максимальной пространственной частоты Q_{\max} :

$$R(z) = \int_{-Q_{\max}}^{Q_{\max}} \frac{|Q| dQ}{(2\pi)^2} \exp(-iQz), \quad (18)$$

которое приводит к следующему явному виду функции G :

$$R(z) = \frac{2}{(2\pi)^2} \left[\frac{Q_{\max} \sin(Q_{\max} z)}{z} - \frac{1 - \cos(Q_{\max} z)}{z^2} \right]. \quad (19)$$

К недостаткам такого метода относится отсутствие алгоритма выбора максимальной пространственной частоты Q_{\max} , зависимость наилучшего выбора такой частоты от частотных свойств исходного изображения, а также наличие артефактов в восстановленном изображении.

3. Предлагаемая методика восстановления

Основной идеей данной работы является использование обратного преобразования Радона в общем виде:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int |Q| dQ d\alpha dX F(X, \alpha) \exp(-iQ(X - x \cos \alpha - y \sin \alpha)) \quad (20)$$

В этом случае не возникает понятия фильтра R (18), который используется для фильтрации (обработки) проекций перед процедурой обратного проектирования (16). Вместо этого предлагается не менять порядок интегрирования в общем соотношении (20) и вести обработку исходных данных всегда с помощью тройного интегрирования:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} |Q| dQ \int d\alpha dX F(X, \alpha) \cos(Q(X - x \cos \alpha - y \sin \alpha)) \quad (21)$$

Такой метод позволяет избавиться от целого ряда недостатков стандартной методики (16).

Во-первых, отсутствует необходимость искусственного подбора максимальной частоты восстановления Q_{max} , или других подгоночных параметров фильтров [8-10], что кроме прочих преимуществ, позволяет избавиться от характерных для приближенного восстановления (16) артефактов.

Во-вторых, сходимость интегралов в (21) при этом обеспечивается частотными характеристиками исходных проекций $F(X, \alpha)$, что позволяет одинаково хорошо восстанавливать амплитуды всех частотных компонент исходного распределения плотности $f(x, y)$.

В-третьих, такой подход позволяет явным образом переходить к реальным исследованиям, в которых угловая переменная α и координата на детекторе X являются дискретными величинами. Такой переход особенно важен, так как конечной целью исследования является малоракурсная томография, или томосинтез, в котором количество проекций резко ограничено, а форма пучка рентгеновского излучения является конусной.

Для того, чтобы убедиться, что любое приближение фильтра (19) вносит артефакты в восстановленное изображение, заменим в (20) истинный «наклонный фильтр» (ramp filter) $|Q|$ на его обобщенное приближение в форме гауссовой кривой:

$$|Q| \rightarrow |Q| \exp(-Q^2 / 2Q_0^2) \quad (22)$$

Здесь Q_0 – эффективный параметр фильтрации высоких частот, аналогичный Q_{max} в (18).

Используя (22) в формуле обращения (20) с учетом (3) получаем выражение для восстановленной функции в виде свертки:

$$\tilde{f}(x, y) = \int dx_1 dy_1 f(x_1, y_1) F(x - x_1) F(y - y_1) \quad (23)$$

Здесь

$$F(x) = \int \exp\left(iQx - \frac{Q^2}{2Q_0^2}\right) \frac{dQ}{(2\pi)} = \sqrt{\frac{Q_0^2}{2\pi}} \exp(-x^2 Q_0^2 / 2). \quad (24)$$

Выражение (23), как и следовало ожидать, представляет собой нечто иное, как гауссов фильтр низких частот, поэтому восстановление с фильтрами типа (22) обязательно приводит к потерям и артефактам при восстановлении границ и объектов малого размера.

Таким образом, явное введение фильтрации в обратном преобразовании Радона всегда приводит к ухудшению качества восстановления.

Результаты данной работы являются основой для дальнейшего исследования вопроса о восстановлении внутренних структур объектов. Следующим шагом

должно стать изучение применимости предложенного метода в случае ограниченного числа проекций, а также рассмотрения веерного и конусного проецирования. Необходимо будет оценить возможные потери точности в данных случаях и провести аналитическое и экспериментальное сравнение существующих и предложенного методов восстановления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anger, B. and Portenier, C. Radon Integrals. – Boston, MA: Birkhäuser, 1992. – 329 p.
2. Deans, S. R. The Radon Transform and Some of Its Applications. – New York: Wiley, 1983. – 462 p.
3. Kak, A. C. and Slaney, M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. – IEEE Press, 1988. – 323 p.
4. Esser, P. D. (Ed.). Emission Computed Tomography: Current Trends. – New York: Society of Nuclear Medicine, 1983. – 249 p.
5. Shepp, L. A. and Kruskal, J. B. Computerized Tomography: The New Medical X-Ray Technology // Amer. Math. Monthly. – 1978. – V. 85. – P. 420-439.
6. Nievergelt, Y. Elementary Inversion of Radon's Transform. // SIAM Rev. – 1986. – V. 28. – P. 79-84.
7. Durrani, T. S. and Bisset, D. Erratum to: The Radon Transform and Its Properties. // Geophys. – 1985. – V. 50. – P. 884-886.
8. Hungerbühler, N. Singular Filters for the Radon Backprojection. // J. Appl. Analysis. – V. 5. – P. 17-33.
9. Kunyansky, L. A. Generalized and Attenuated Radon Transforms: Restorative Approach to the Numerical Inversion // Inverse Problems. – V. 8. – P. 809-819.
10. Zalcman, L. Uniqueness and Nonuniqueness for the Radon Transform // Bull. London Math. Soc. – V. 14. – P. 241-245.

УДК 004.4.621; 641.8

Компьютерная программа для тестирования работников по пожарной и электробезопасности.

Л. В. Васильева, А. В. Передерин

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

В статье представлена компьютерная программа для оценивания знаний рабочих по темам пожарной и электробезопасности. Разработана компьютерная программа которая содержит в себе тест по данной теме и разработан механизм оценивания результатов этого теста. Проведен анализ и сравнение аналогичных методик. Подробно описаны все функции компьютерной программы. Описана структура программы. Составлено руководство пользователя. В результате апробации выявлены достоинства и преимущества созданного продукта.

Ключевые слова: компьютерное тестирование, тестирование по пожарной безопасности, тестирование по электробезопасности.

В статті представлена комп'ютерна програма для оцінювання знань робітників за темами пожежної та електробезпеки. Розроблено комп'ютерну програму яка містить в собі тест з даної теми і розроблений механізм оцінювання результатів цього тесту. Проведено аналіз і порівняння аналогічних методик. Детально описано всі функції комп'ютерної програми. Описано структуру програми. Складено керівництво користувача. В результаті апробації виявлені більше вартість і переваги створеного продукту.

Ключові слова: комп'ютерне тестування, тестування з пожежної безпеки, тестування з електробезпеки.

The computer program for assessing the workers' knowledge in the field of fire and electrical safety has been presented in the article. The computer program which contains the test has been developed and the mechanism for evaluating the test results is presented. The analysis of and comparison with the similar methods have been carried out. Detailed description of all the computer program functions has been presented. The program structure has been described. The user manual has been compiled. The results of approbation shows the advantages of the created product.

Key words: computer testing, fire safety testing, electrical safety testing.

Среди основных мероприятий по обеспечению охраны труда на предприятии выделяют следующие: 1) Обучение охране труда и безопасным методам выполнения работ всех категорий; 2) Своевременный мониторинг технологического оборудования; 3) Регламентирование техники выполнения особо опасных работ; 4) Использование средств индивидуальной защиты; 5) Проведение обязательных, предварительных и периодических медицинских осмотров; 6) Обязательное социальное страхование от несчастных случаев; 7) Аттестация рабочих мест по условиям и охране труда.

Данная работа посвящена одной из актуальных проблем, с которой сталкиваются специалисты, которые должны обучать и проверять результаты обучения большого количества людей за короткий срок. Эта проблема является наиболее актуальной для ответственных за охрану труда на крупных предприятиях, поскольку возникает необходимость в короткие сроки провести обучение и тестирование всех сотрудников. Данная работа призвана помочь руководителям работ, а так же ответственным лицам на которых возложено

приказом руководителя обязанность проведения инструктажей. Т.е. всем тем кто проводит вступительные, повторные и целевые инструктажи.

Повышение уровня знаний работников в области охраны труда вообще и по вопросам пожарной и электробезопасности в частности, является очень важным для безопасной работы абсолютно всех учреждений и предприятий в любой отрасли. Тестирование знаний рабочих по пожарной и электробезопасности проводятся раз в три года, и занимает определенное время. Поэтому целью данной работы было разработать компьютерную программу, которая поможет ответственным за обучение и контроль знаний по пожарной и электробезопасности в учреждениях быстро и эффективно справиться с этой задачей.

Вопросы пожарной и электробезопасности в настоящее время приобрели еще большую актуальность. Каждый день на каком-то из предприятий или заводе происходит авария из-за несоблюдения техники безопасности. В результате, такие халатные отношения приводят к ущербу производству, персоналу и предприятию в целом. Чтобы избежать подобных случаев и количество их появлений в разы уменьшить было принято решение о разработке данной компьютерной программы.

В ходе данного исследования был проведен анализ интернет ресурса на наличие аналогичных программ. Существующие онлайн тесты не всегда удобные, поскольку предоставляют возможности для тестирования не в полной мере. Аналогичных программ которые позволяют провести тестирование по данной теме не было найдено. Поэтому была разработана программа, которая позволяет быстро и удобно решить поставленную задачу.

В ходе решения поставленной проблемы, была разработана компьютерная программа на языке программирования Java, а графический интерфейс разработан с помощью платформы JavaFX. Интерфейс программы отвечает всем современным требованиям эргономики, является интуитивно понятным, доступным и простым в использовании. Для создания тестовых вопросов были использованы несколько источников в области охраны труда, пожарной безопасности и электробезопасности. В программе содержится в общей сумме 50 тестов, которые рассматривают сразу 3 темы: пожарную безопасность, электробезопасность и охрану труда. Тесты идут друг за другом и имеют только один вариант правильного ответа. Последовательность вопросов не меняется, поэтому при запуске нового тестирования, вопросы будут идти в такой же последовательности, что и в предыдущий раз. Программа легко инсталлируется на любой компьютер так же, как и обычный софт, и не требует сложного оборудования. Во время установки пользователю предьявляется ряд окон на которых можно будет прочитать что устанавливается, указать путь установки самой программы, окно с отображением состояния установки и завершающее окно которое оповещает, что данная программа была успешно установлена на компьютер пользователя. Данная программа может быть установлена на компьютерах с операционной системой Windows, начиная от Windows 95 заканчивая Windows 7. Так же на компьютере должно быть установлено JDK из последних версий, чтобы приложение разработанное на языке программирования Java могло функционировать.

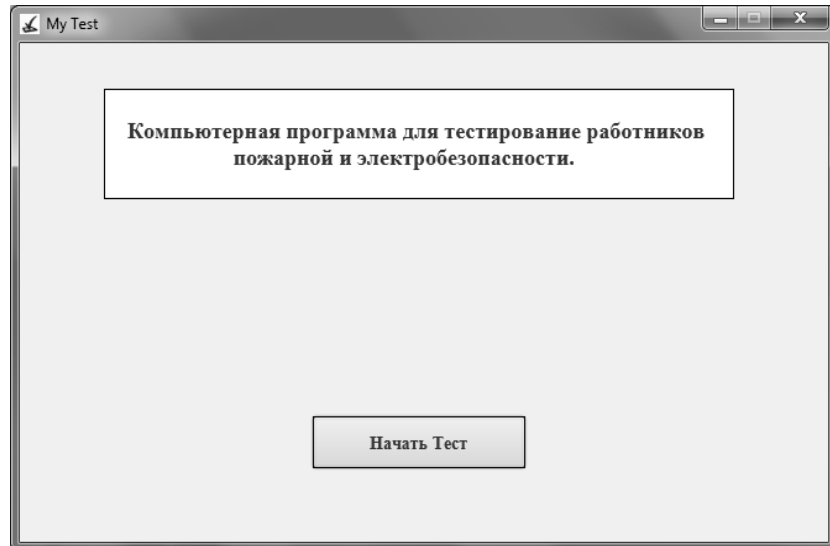


Рис 1. Главное окно программы

После установки программы на рабочем столе пользователя будет создан ярлык с помощью которого можно запустить программу для тестирования и начать само тестирование. Сама программа состоит из двух окон и одного диалогового окна который показывает результат тестирования. При запуске программы загружается главное окно программы, которое изображено на Рис 1.

На главном окне изображено название программы и одна кнопка «Начать Текст», с помощью которой можно запустить само тестирование. После нажатия на кнопку «Начать Текст», начнется само тестирование, и программа запустит второе окно программы.

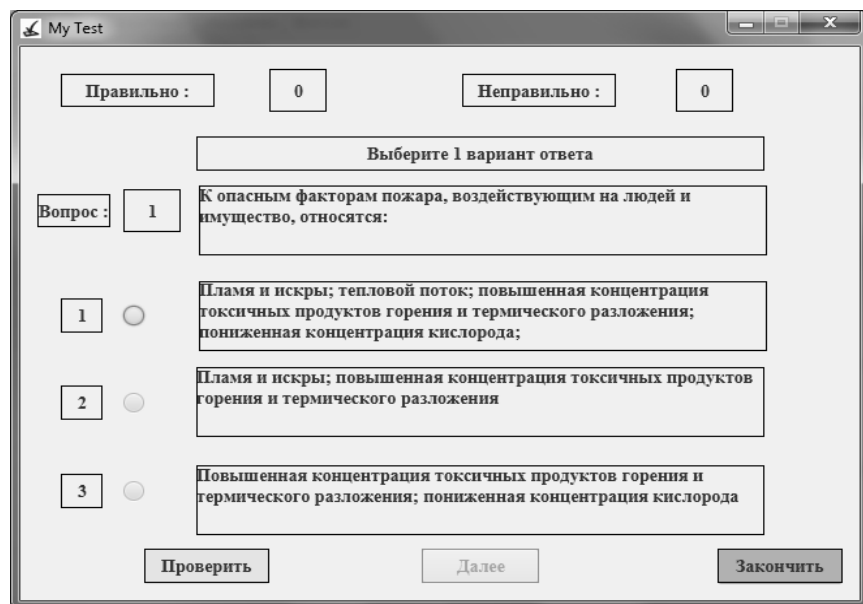


Рис 2. Окно тестирования

На рис 2 изображено само окно тестирования. На нем находится 3 функциональные кнопки «Проверить», «Далее» и «Закончить», с помощью которых проходит тестирование. В ходе тестирования можно отследить свой результат с помощью верхней части окна, где отображается количество правильных и неправильных ответов по ходу тестирования. Это позволяет ускорить процедуру тестирования не проходя всего материала. Так же отображается номер текущего вопроса, чтобы знать, сколько пройдено и сколько осталось еще вопросов.

В окне изображено 4 прямоугольника, текст в которых будет меняться в зависимости от номера вопроса. В первом прямоугольнике будет написан сам вопрос. В других трех прямоугольниках будут написаны варианты ответов.

С помощью круглого маркера, который находится слева от прямоугольников с ответами, будет помечается тот вариант ответа, который считается правильным. После того как правильный вариант будет выбран следует нажать кнопку «Проверить». С помощью этой кнопки, выбранный ответ сравнивается с базой теста и проверяется на правильность. Если ответ который был выбран был правильным, то текст ответа станет зеленого цвета и кнопка «Далее» станет активной. Если же ответ был не правильным, то текст выбранного ответа станет красного цвета, а текст ответа, который правильный станет зеленого. Кнопка «Далее» так же станет активной.

С помощью того, что текст ответа принимает красный и зеленые цвета, тестируемый в ходе прохождения теста не только проверяет свои знания, но и расширяет их. Так, при прохождении теста еще раз, количество правильных ответов будет уже больше, чем в предыдущий раз тестирования. Без нажатия кнопки «Проверить», кнопка «Далее» не будет активна. Это сделано для такого случая, когда тестируемый не знает правильного ответа, чтобы он не пропускал данный вопрос, а получал на него ответ, и в следующий раз при прохождении тестирования дал правильный ответ.

Если тестируемый не выберет ни одного ответа и нажмет кнопку «Проверить», то кнопка «Далее» станет активной, текст ответа, который правильный будет зеленого цвета, но при этом будет засчитано, что ответ был не правильный, так как его вообще не было. Это говорит о том, что тестируемый не знает на него ответа.

Во время прохождения тестирования, есть возможность выбрать несколько вариантов ответа, но при этом будет засчитан тот, что выше, так как правильный ответ на вопрос только один. Следовательно, при выборе двух ответов и нажатии на кнопку «Проверить», тот ответ, который выше будет сравниваться с базой тестов и после этого отобразится в соответствующем цвете.

Если в ходе прохождения теста, тестируемый не пройдет полностью тест (50 вопросов), но при это нажмет кнопку «Закончить», то программа закроется и текущий процесс не будет никуда сохранен. Это сделано с целью предотвращения прохождения теста предыдущего участника. Т.е. если тестируемый запустит программу и там уже будет отвечено 27 вопросов, он может дойти тест до конца и присвоить результаты предыдущего тестируемого себе.

После того как тестируемый пройдет все 50 вопросов и нажмет кнопку «Далее», программа выведет ему диалоговое окно с надписью об его успеваемости. В этом окне будет написан текст и цифра в процентах, на сколько процентов из ста он прошел тест. Количество правильных ответов в процентах считается как количество правильных ответов умноженные на 2. Это позволяет глобально оценить знания тестируемого и быстро сделать вывод о его успеваемости. Пример окна изображен на Рис 3.

После того как тест окончен, результаты тестирования должен проверить человек который ответственный за это. После проверки результатов тестирования, тестируемый может быть свободный и пройти повторное тестирование исходя из его результатов. При прохождении тестирования подряд несколько раз, происходит запоминание тех вопросов на которые не было дано правильного ответа. При проведении контрольного последнего тестирования, тестируемые покажет наилучший свой результат и сможет закрепить полученные знания. Это происходит благодаря тому, что вопросы которые используются для тестирования идут каждый раз в одинаковой последовательности. Благодаря этому у тестируемого не перемешиваются разные вопросы с разными ответами, а происходит постепенное запоминание материала изложенного в тестах.

Сам тест состоит из 50 вопросов потому, что данное количество вопросов достаточно, чтобы в общей мере понять насколько человек знаком с материалом и при прохождении занимает не много времени, чем онлайн тесты.

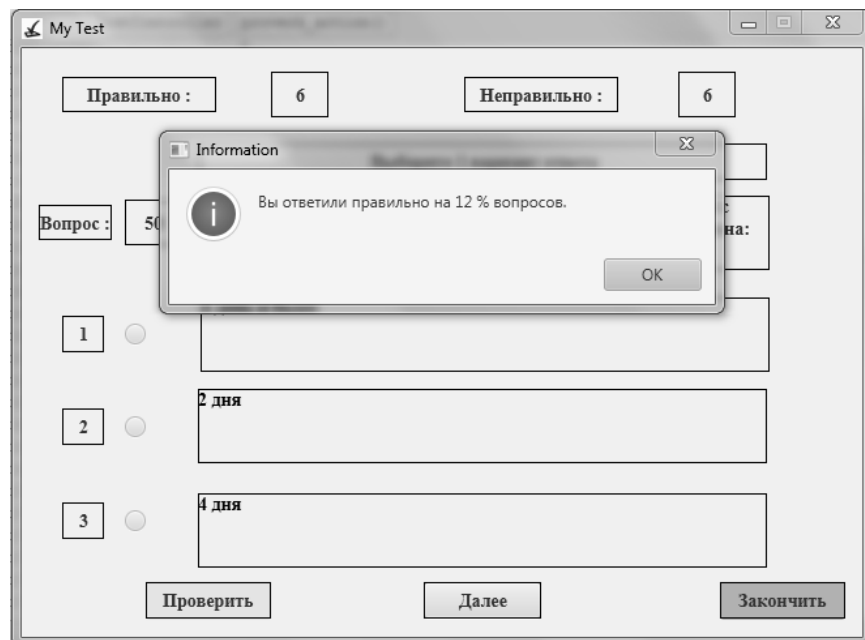


Рис 3. Окно с результатом

В ходе решения поставленной задачи, была разработана архитектура и компьютерная программа для тестирования работников по пожарной и

электробезопасности. Так же были собраны сами вопросы для тестов выбранные из разных источников и раскрывающие цель самой программы. Данная программа значительно облегчает контроль знаний у сотрудников и экономит время самих работодателей на данное мероприятие. Так же, данная программа не только осуществляет контроль знаний работников, но и может работать в обучающем режиме. Так как аналогов данной программы не было найдено, можно считать ее уникальной разработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалишин В. В. Актуальные проблемы пожарной безопасности и гражданской защиты в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-pozharной-bezopasnosti-i-grazhdanskoj-zaschity-v-ukraine>
2. Куценко Г. Ф. Электробезопасность. – Минск: Дизайн ПРО, 2006. -240 с.
3. Долин П. А. Основы техники безопасности в электрических установках. –М.: Энергия, 1979. -448 с.
4. Борисов Л. Г., Князевский Б. А., Кучерук С. М. Охрана труда в энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1985. -376 с.
5. Тимкин А. В. Основы пожарной безопасности. Учебное пособие. –Директ-Медиа, 2015. -267 с.
6. Бадагуев Б.Т. Пожарная безопасность на предприятии. –М.:Альфа-Пресс, 2012. -368 с.
7. Калиничева О. А. Основы электробезопасности в электроэнергетике. Учебное пособие. –Архангельск, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://narfu.ru/university/library/books/2263.pdf>.
8. Попов В. М. Пожарная безопасность образовательного учреждения. Учебное пособие. –М.:НГТУ, 2011. -91 с.
9. Гогиташвили Г. Г., Карчевский Е.-Т., Лапин В. М. Управление охраной труда и риском по международным стандартам. Учебное пособие. – К.:Знания, 2007. -367 с.

УДК 519.6; 537.8

Качественные модели сверхизлучения в инвертированных средах

А. В. Киричок, А. В. Мишин

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

Обговорується динаміка дворівневої системи поблизу порогу індукованого випромінювання, коли початкова інверсія населеностей дорівнює квадратному кореню від повної кількості станів. За перевищення цього порогу кількість квантів починає зростати експоненціально у часі. В роботі зроблено спробу пояснити природу цього порогу. Для цього було виділено спонтанну та індуковану складові у структурі випромінювання та проведено відповідну редукцію системи рівнянь. Використання якісних моделей в значній мірі прояснило деталі процесів формування імпульсу індукованого випромінювання та росту інтенсивності спонтанного випромінювання.

Ключові слова: *новий поріг індукованого випромінювання, імпульс індукованого випромінювання, квазікласична модель, випромінювання згустку заряджених часток.*

Обсуждается динамика двухуровневой системы вблизи порога индуцированного излучения, когда начальная инверсия заселенностей равна корню квадратному из полного числа состояний. При превышении этого порога число квантов начинает расти экспоненциально со временем. В работе сделана попытка пояснить природу этого порога. Для этого было выделено в структуре излучения спонтанной и индуцированной составляющих и проведена соответствующая редукция системы уравнений. Использование качественных моделей в значительной степени прояснило детали процессов формирования импульса индуцированного излучения и роста интенсивности спонтанного излучения.

Ключевые слова: *новый порог индуцированного излучения, импульс индуцированного излучения, квазиклассическая модель, излучение пучка заряженных частиц.*

The dynamics of the two-layer system near the threshold of stimulated emission, when the initial population inversion is equal to the square root of full number of states has been discussed. The number of quanta begins to grow exponentially when this threshold is exceeded. An effort to clarify the nature of this threshold has been made in the article. Therefore, spontaneous and induced constituents of an emission have been isolated and the corresponding reduction in the system of equations has been made. Using qualitative models has largely clarified the details of the stimulated emission pulse formation process and increase in the spontaneous emission intensity.

Key words: *new threshold of stimulated emission, momentum of stimulated emission, quasiclassical model, radiation beam of charged particles.*

1. Введение

Описание физических явлений с помощью систем уравнений в частных производных, выведенных на основе наблюдений и экспериментальных фактов часто скрывает от исследователя ряд важных явлений. Особенно в тех случаях, когда в данной области изменения переменных и для некоторых интервалов параметров исследователи не ожидают обнаружить аномалий и смены тенденций в динамике систем. Полезным для создания эффективных имитационных моделей является использование эвристических, основанных на эмпирических данных подходов к описанию процессов, внесение в известные универсальные уравнения и описания полезных изменений. Ибо по мнению А. Пуанкаре «главным образом уравнения нас должны учить тому, что можно и что

следует в них изменить». Ниже рассмотрим две качественные модели сверхизлучения, основанные на выделении важных характеристик, основанных на эмпирическом опыте и редукции традиционных систем уравнения для выделения динамики этих характеристик.

В первой модели двухуровневой квантовой системы [1] обсуждается выделение в структуре излучения спонтанной и индуцированной составляющих и соответствующей редукции системы уравнений. Спонтанным принято называть излучение осциллятора (или иного излучателя), не навязанное внешним полем на данной частоте. Индуцированным или вынужденным называют излучение, возникающее вследствие воздействия внешнего поля на источник излучения на той же самой частоте. Существовали трудности интерпретация индуцированного излучения как излучения когерентного. Ибо в квантовом описании, где в отличие от классического случая нельзя было ничего сказать о фазах полей, излучаемых отдельными атомами и молекулами, представление о когерентности излучения практически не используется. Тем не менее Ч. Таунс, опираясь на многочисленные экспериментальные факты полагал, что «...энергия, излучаемая молекулярными системами, имеет то же самое распределение поля и ту же самую частоту, что и индуцирующее излучение, а следовательно и постоянную (возможно нулевую) разность фаз» [2].

Во второй работе обсуждается излучение в среде пучка заряженных частиц, начальная функция распределения по скоростям которого в пространстве скоростей содержит инвертированный участок, в котором число частиц с ростом значения скорости увеличивается. В этом случае (см., например, [3]) возможно как спонтанное, так и индуцированное излучение резонансных волн среды. Резонансные условия здесь состоят в синхронизации скорости пучка и фазовой скорости коллективных возмущений среды.

Целью работы является построение и анализ качественных моделей двухуровневой системы и пучка заряженных частиц в среде с разделением спонтанного и индуцированного излучения.

2. Качественная модель описания двухуровневой системы.

Рассмотрим поведение инвертированной двухуровневой квантовой системы вблизи обнаруженного в работах [1] порога индуцированного излучения. Ниже этого порога излучение в пространственно однородных системах возможно только спонтанное. Согласно представлениям А. Эйнштейна [1], описание двухуровневой системы при наличии излучения на частоте перехода $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \hbar\omega_{12}$ следующее

$$\partial n_2 / \partial t = -(u_{21} + w_{21} \cdot N_k) \cdot n_2 + w_{12} \cdot N_k \cdot n_1, \quad (1)$$

$$\partial n_1 / \partial t = -w_{12} \cdot N_k \cdot n_1 + (u_{21} + w_{12} \cdot N_k) \cdot n_2,$$

причем полное число частиц системы на первом и на втором уровне постоянно $n_1 + n_2 = Const$, $u_{21} \cdot n_2$ - скорость изменения количества квантов второго возбужденного уровня за счет спонтанных процессов излучения. Скорость изменения количества квантов (частиц) на этих уровнях за счет

индуцированных процессов излучения $w_{21} \cdot N_k \cdot n_2$ и поглощения $w_{12} \cdot N_k \cdot n_1$. Здесь N_k - число квантов излучения на частоте перехода, для которого справедливо уравнение

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} = (u_{21} + w_{21} \cdot N_k) \cdot n_2 - (w_{12} \cdot N_k) \cdot n_1 \quad (2)$$

Перепишем систему уравнений (1)-(2) в виде

$$\partial n_2 / \partial t = -n_2 - \mu \cdot N_k, \quad (3)$$

$$\partial \mu / \partial t = -2n_2 - 2\mu \cdot N_k, \quad (4)$$

$$\partial N_k / \partial t = n_2 + \mu \cdot N_k \quad (5)$$

где $\tau = w_{21} \cdot t$, $u_{21} = w_{21} = w_{12}$. Ниже обсудим случай, когда инверсия $\mu = n_2 - n_1 \ll n_1, n_2$. Если начальное значение инверсии μ_0 оказывается больше или меньше порогового значения [4], равного

$$\mu_{TH2} = 2(N)^{1/2}, \quad (6)$$

в системе возможно появление индуцированное излучение, рост которого во времени приобретает экспоненциальный характер.

Можно, пренебрегая процессами стабилизации числа квантов, на качественном уровне предположить, что слагаемые в правых частях уравнений (2) пропорциональные N_k , отвечают индуцированным когерентным процессам, также как и число квантов N_k , записанное там же. Рационально представить число квантов как сумму индуцированной когерентной и спонтанной, некогерентной, составляющих $N_k = N_k^{(incoh)} + N_k^{(coh)}$ и записать уравнения (1)-(2) в виде

$$\partial n_2 / \partial \tau = -n_2 - \mu \cdot N_k^{(coh)} \quad (7)$$

$$\partial \mu / \partial \tau = -2n_2 - 2\mu \cdot N_k^{(coh)} \quad (8)$$

$$\partial N_k^{(incoh)} / \partial \tau = n_2 \quad (9)$$

$$\partial N_k^{(coh)} / \partial \tau = \mu \cdot N_k^{(coh)} \quad (10)$$

где $u_{21} = w_{21} = w_{12}$, $n_2 = (N + \mu) / 2$, а полное число частиц на двух уровнях $N = n_1 + n_2$.

Сравним характеры развития процесса описываемого уравнениями (11)-(13) (верхняя часть таблицы 1) и процесса, описываемого уравнениями (14)-(15) (нижняя часть таблицы 1).

<i>Таблица 1. Качественная и традиционная системы уравнений вблизи порога(6)</i>	
Качественная система уравнений	
$\partial M / \partial T = -N_0 - 2M \cdot N_c;$	(11)
$\partial N_{inc} / \partial T = N_0 - \theta \cdot N_{inc};$	(12)
$\partial N_c / \partial T = M \cdot N_c - \theta \cdot N_c.$	(13)
Традиционная система уравнений	

$$\partial M_1 / \partial T = -2n_{21} - 2M \cdot N_1; \quad (14)$$

$$\partial N_1 / \partial T = n_{21} + M_1 \cdot N_1 - \theta \cdot N_1. \quad (15)$$

где $N_{inc} = N_k^{(incoh)} / \mu_0$, $N_c = N_k^{(coh)} / \mu_0$, $M = \mu / \mu_0$, $M_1 = \mu_1 / \mu_0$, $T = w_{21} \cdot \mu_0 \cdot t = \mu_0 \cdot \tau$, $N_1 = N_k / \mu_0$, единственным удобным для анализа свободным параметром является $N_0 = N / \mu_0^2$. Для корректности сравнения будем считать, что общее число реальных состояний $N = n_1 + n_2 = 10^{12}$, а пороговая инверсия $N_0 = N / \mu_0^2$, $\mu_{0th} = \sqrt{N} = 10^6$. Переход к единой шкале времени будем оценивать согласно соотношению $T = \tau \cdot \mu_0$, где T - время в каждом отдельном случае. Начальные значения определим следующим образом $M(T=0) = M_1(T=0) = 1$, $N_{inc}(T=0) = N_{inc} / \mu_0 = 3 \cdot 10^4 / \mu_0$; $N_c(T=0) = N_c / \mu_0 = 3 \cdot 10^4 / \mu_0$; $N_1(T=0) = N_k / \mu_0 = 3 \cdot 10^4 / \mu_0$.

Поглощение энергии поля учитывается значением $\theta = \delta / \mu_0$.

В отсутствие поглощения энергии квантов согласно качественному описанию (11)-(13) после уменьшения амплитуды импульса когерентного излучения число квантов спонтанного излучения продолжает расти. В традиционной модели (14)-(15) процессы поглощения ограничивают рост полного числа квантов, и уровень излучения выходит на свое стационарное значение. Однако сравнивая динамику процессов можно понять, что после уменьшения амплитуды когерентного импульса основной вклад в полное число квантов дает спонтанный процесс. То есть, на временах, превышающих длительность когерентного импульса, доминирует некогерентное излучение.

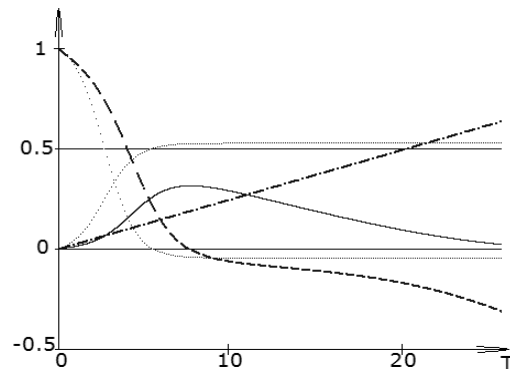


Рис.1. Поведение величин M_1 и N_1 (точки), M (пунктир), N_c и N_{inc} (сплошная и штрихпунктирная линии, соответственно) при отсутствии поглощения ($\theta = 0$) и при $N_0 = N / \mu_0^2 = 0.05$.

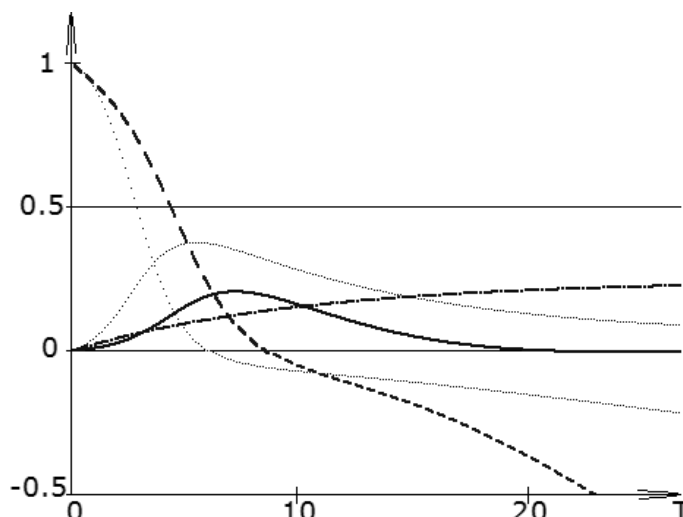


Рис.2. Поведення величин M_1 і N_1 (точки), M (пунктир), N_c і N_{inc} (сплошная і штрихпунктирна лінії, відповідно) при відсутності поглинання ($\delta = 2 \cdot 10^5$, $\theta = \delta / \mu_0 = 0.045$) і при $N_0 = N / \mu_0^2 = 0.05$.

Учет поглинання квантов поля подавляє процеси генерації, поэтому было выбраны сравнительно небольшие уровни потерь их энергии, то есть $\delta = 2 \cdot 10^5$ и $\delta = 4 \cdot 10^5$.

Характер процесса генерації сохраняет те же черты. Однако теперь поглинання ограничивает время существования генерації и отличия между двумя описаниями менее выражены. Следует обратить внимание на тот факт, что в случае фиксированного конечного уровня потерь или поглинання энергии квантов, размер когерентного импульса не меняется даже при значительном увеличении уровня инверсии заселенностей.

3. Название статьи Качественное описание излучения пучка заряженных частиц.

Рассмотрим процесс спонтанного излучения плазменных волн электронным пучком, движущимся со скоростью v в направлении оси OZ в холодной плазме. Ограничимся для простоты описания одномерным случаем. Для пучка частиц с функцией распределения

$$f_b = [n_{b0} / \sqrt{\pi} \cdot v_{Tb}] \cdot \exp\{-(v - v_{0b})^2 / v_{Tb}^2\} \quad (16)$$

(где n_{b0} - однородная в пространстве плотность электронов пучка, v_{0b} , $v_{Tb} = \sqrt{2T_b / m}$ - средняя и тепловая скорости пучка соответственно, при этом $v_{0b} \gg v_{Tb}$, T_b - температура пучка в энергетических единицах, m - масса покоя электрона), изменение плотности энергии поля в единице объема пучка в единицу времени за счет спонтанного излучения плазменных (ленгмюровских) колебаний (которое при отсутствии пространственной модуляции пучка имеет случайный характер), равно

$$\frac{\partial E_k^{(spon)}}{\partial t} = \int dk \int v \cdot f_k(v) \cdot F(k) \quad (17)$$

где сила радиационного торможения, приходящаяся на одну частицу пучка равна

$$F(k) = 4\pi \cdot ie^2 / [k\varepsilon(kv_{0b}, k)], \quad (18)$$

причем связь между плотностью энергии E_k и напряженностью электрического поля плазмонов E_k определяется соотношением

$$E_k = \frac{\partial \omega \varepsilon(\omega, k)}{\partial \omega} |E_k|^2 \approx \frac{\omega_{pe}^2}{4\pi \omega^2(k)} |E_k|^2, \quad \text{диэлектрическая проницаемость плазмы}$$

$$\varepsilon(\omega, k) = \varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + i\nu_{ei})}, \quad e - \text{заряд электрона, } n_{p0} - \text{плотность электронов}$$

плазмы, k и $\omega(k) = \omega_{pe} = \sqrt{4\pi e^2 n_{p0} / m}$ - волновое число и частота ленгмюровской волны. Можно показать, что с учетом всех приведенных соотношений, уравнение для изменения плотности энергии ленгмюровских колебаний при спонтанном излучении принимает вид

$$\frac{\partial E_k^{(spon)}}{\partial t} = 2\pi^2 e^2 \frac{\omega^2(k)}{k^3} f_b\left(\frac{\omega(k)}{k}\right). \quad (19)$$

Изменения функции распределения за счет спонтанных процессов можно представить как

$$\frac{\partial f_b(v)}{\partial t} = 2\pi^2 e^2 \frac{\omega(k)}{\hbar k^3} \left\{ f_b(v) \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k} + \frac{\hbar k}{m}} - f_b(v) \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k}} \right\} = \dots \quad (20)$$

$$\dots = 2\pi^2 e^2 \frac{\omega(k)}{k^2 \cdot m} \cdot \frac{\partial f_b(v)}{\partial v} \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k} + \frac{\hbar k}{m}}$$

Часто спонтанным излучением пучка пренебрегают по сравнению с вынужденным (индуцированным) излучением.

Вынужденное излучение происходит под воздействием поля внешнего по отношению к каждому излучателю. При этом происходит синхронизация фаз излучателей и излучение приобретает когерентный характер. Выражение для изменения энергии поля такого вынужденного когерентного излучения можно получить в рамках классического описания прямым вычислением или привлекая квантовые представления:

$$\frac{\partial E_k^{(ind)}}{\partial t} = 2\pi^2 e^2 \cdot \frac{\omega(k)}{k^3} \cdot E_k^{ind} \cdot \frac{k}{m} \frac{\partial f_b(v)}{\partial v} \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k}} = \gamma_L \cdot E_k^{ind}, \quad (21)$$

где $\gamma_L = (\sqrt{\pi}/2) \frac{\omega_b^2 \omega(k)}{k^3 v_{Tb}^3} \exp\left\{-\frac{[kv_{ob} - \omega(k)]^2}{k^2 v_{Tb}^2}\right\} [kv_{ob} - \omega(k)] -$ в случае

выбранной нами ранее функции распределения электронов пучка (1) известный [3] инкремент кинетической пучково-плазменной неустойчивости (неустойчивости пучка с большим разбросом по скоростям $(n_{b0}/n_{p0}) \ll (v_{Tb}^3/v_0^3)$) в отсутствии потерь энергии плазмонов. Изменения функции распределения за счет индуцированных процессов описываются известным уравнением квазилинейной теории:

$$\frac{\partial f_{b0}(\varepsilon)}{\partial t} = 2\pi^2 e^2 E_k^{ind} v \cdot \omega(k) \cdot \frac{\partial^2 f_{b0}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon(k)}. \quad (22)$$

где $\varepsilon = mv^2/2$, $\varepsilon(k) = m\omega^2(k)^2/2k^2$.

Рационально переписать уравнения для изменения квантов спонтанного и индуцированного излучения, соответственно $N_k^{spon} = E_k^{spon}/\hbar\omega(k)$ и $N_k^{ind} = E_k^{ind}/\hbar\omega(k)$, выбрав масштаб времени $2\pi^2 \cdot t \cdot e^2 \omega(k)/\hbar k^3 = \tau$, то есть

$$\frac{\partial N_k^{(spon)}}{\partial \tau} = f_b(v) \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k}} = f_b[\varepsilon(k)], \quad (23)$$

$$\frac{\partial N_k^{(ind)}}{\partial \tau} = N_k^{(ind)} \cdot \frac{\hbar k}{m} \frac{\partial f_b(v)}{\partial v} \Big|_{v=\frac{\omega(k)}{k}} = \hbar\omega \cdot N_k^{(ind)} \cdot \frac{\partial f_b(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \Big|_{v\varepsilon=\varepsilon(k)}, \quad (24)$$

Таким образом, в простой нормировке система уравнений, описывающая релаксацию пучка в условиях возбуждения ленгмюровских колебаний, может быть записана в виде

$$\partial n_s / \partial \tau = -n_s - \mu_0 \cdot (n_s - n_{s-1}) \cdot N_s^{(ind)} + \mu_0 \cdot (n_{s+1} - n_s) \cdot N_{s+1}^{(ind)} \quad (25)$$

$$\partial N_s^{(spon)} / \partial \tau = n_s, \quad (26)$$

$$\partial N_s^{(ind)} / \partial \tau = \mu_0 \cdot (n_s - n_{s-1}) \cdot N_s^{(ind)}, \quad (27)$$

где использованы следующие выражения, $N_s^{(spon)} = N_{ks}^{(spon)}/\mu_0$, $N_s^{(ind)} = N_{ks}^{(ind)}/\mu_0$, $N_{ks}^{ind} - N_{ks-1}^{ind} = \mu_0$. Обратим внимание на то, что уравнения используют разделение на спонтанное и индуцированное излучение.

Рассмотрим случай, когда с максимальным линейным инкрементом возбуждаются колебания в режиме генерации индуцированного излучения, при этом выделим только резонансный интервал скоростей пучка, $N_s^{(ind)} = N^{(ind)}$, $N^{(ind)}|_{\tau=0} = 0.1$, $1 < s < \Sigma = 100$, $N_s^{(spon)}|_{\tau=0} = 0$, $\mu_0 = 0.5$, $n_s|_{\tau=0} = 1 + \mu_0(s-1)$. Уравнения (27) сводятся к одному

$$\partial N^{(ind)} / \partial \tau = \mu_0 \cdot (n_\Sigma - n_1) \cdot N^{(ind)}, \quad (28)$$

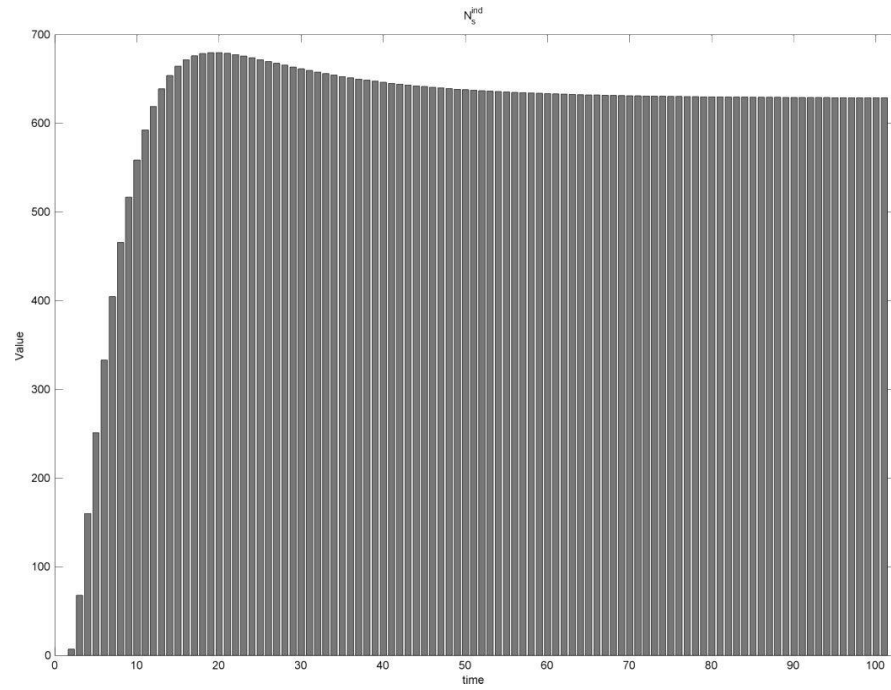


Рис. 3а). Поведення величини $N^{(ind)}$ в резонансному інтервалі.

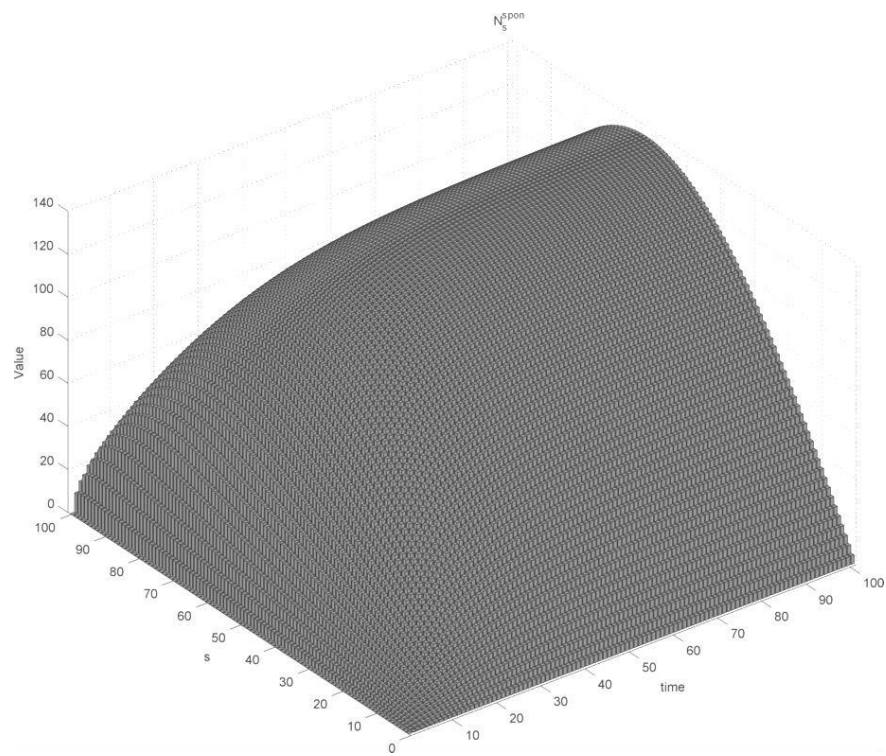


Рис. 3б). Поведення величини $N_s^{(spon)}$

На рис. 3а) показан рост квантов индуцированного излучения в резонансном интервале, на рис. 3б) можно видеть как изменяется величина спонтанного излучения.

На рис.4 показано изменение инверсии в результате излучения.

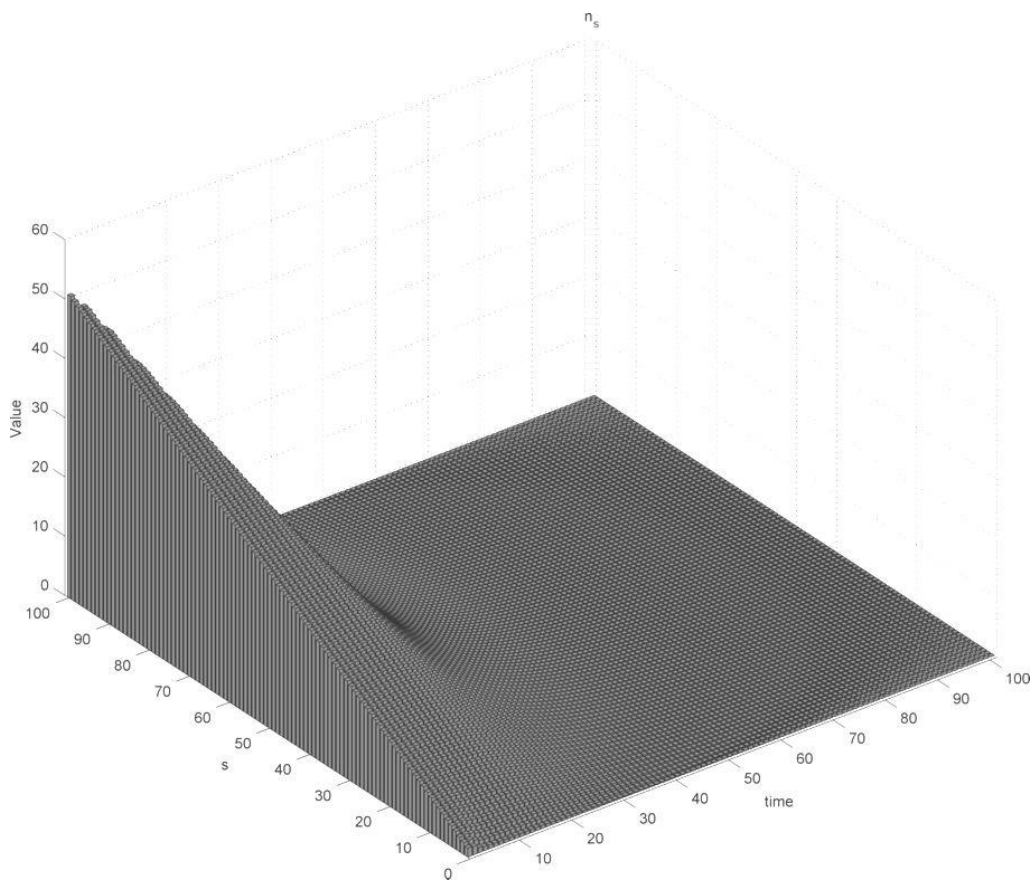


Рис.4. Поведение величины n_s

Представляет также интерес рассмотреть режим, когда учитывается также и нерезонансные области пучка в пространстве скоростей. Пусть резонансная область отвечает значениям $30 < s < 70$, а нерезонансные области $1 < s < 29$ и $71 < s < \Sigma = 100$.

$$n_s|_{\tau=0} = 1 + \mu_0(s-1), \quad \mu_0 = 0.9,$$

$$N_{30}^{(ind)} = N_{31}^{(ind)} = \dots = N_{70}^{(ind)} = N^{(ind)}, \quad N^{(ind)}|_{\tau=0} = 0.1, \quad N_s^{(spon)}|_{\tau=0} = 0,$$

$$N_1^{(ind)}|_{\tau=0} = \dots = N_{29}^{(ind)}|_{\tau=0} = 0.1, \quad N_{71}^{(ind)}|_{\tau=0} = \dots = N_{\Sigma}^{(ind)}|_{\tau=0} = 0.1.$$

Уравнения (27) для резонансных областей сводятся к одному

$$\partial N^{(ind)} / \partial \tau = \mu_0 \cdot (n_{70} - n_{30}) \cdot N^{(ind)}, \quad (29)$$

а для нерезонансных следует воспользоваться уравнениями (27).

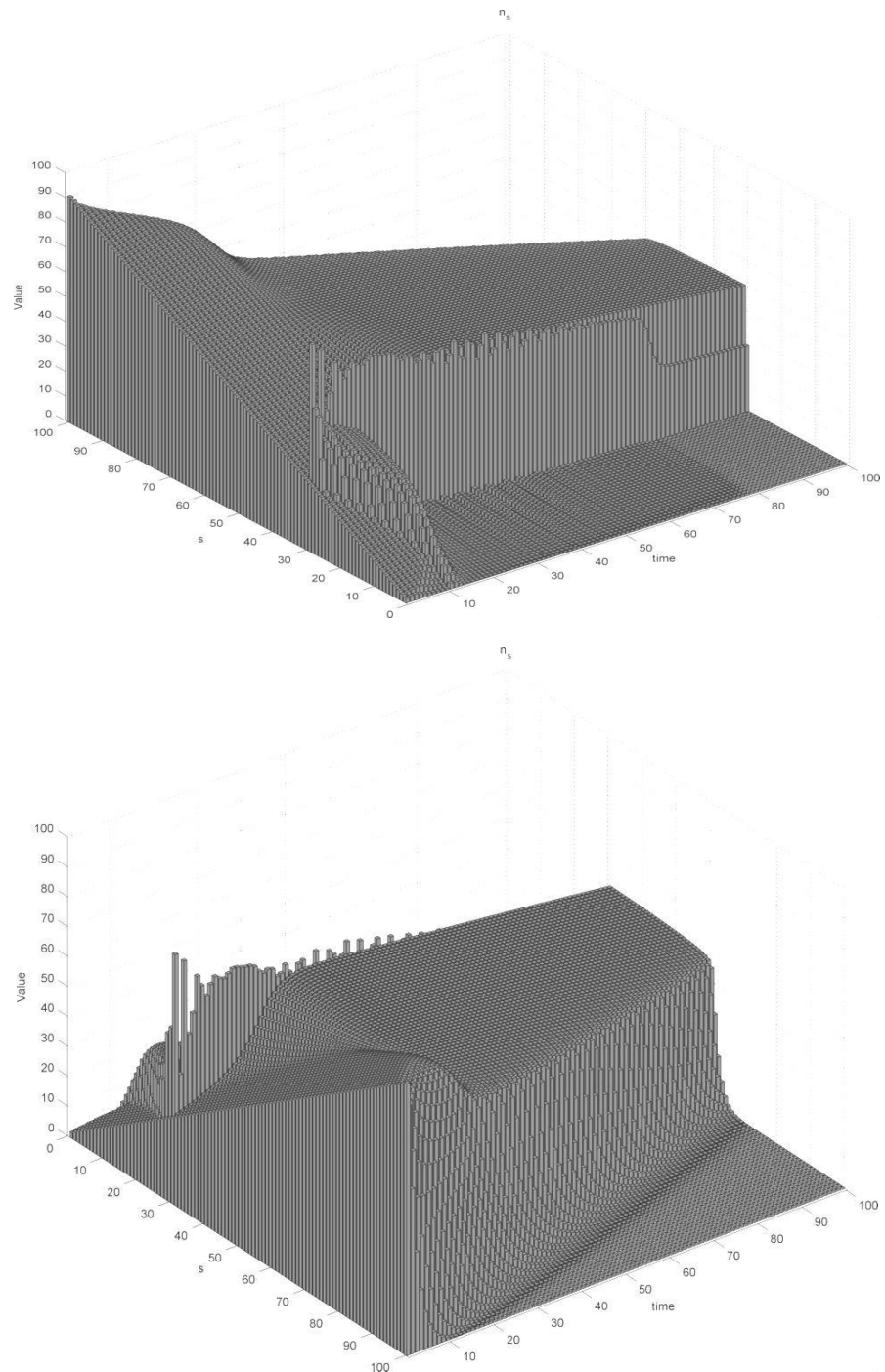


Рис.5. Поведение величины n_s с учетом нерезонансных областей пучка.

В этом случае индуцированный процесс формирует «плато» у функции распределения (см. рис.5), ширина и высота которого постепенно уменьшается из-за действия спонтанных процессов.

4. Выводы.

Обсуждаемый в первой модели двухуровневой системы порог когерентного излучения отвечает случаю, когда случайно распределенное по фазам спонтанное излучение сравнивается с излучением индуцированным. Последнее в большой степени когерентное излучение, или представляет собой несколько узких волновых пакетов когерентного излучения. При относительно небольших уровнях инверсии $\sqrt{N} \ll \mu_0 \ll N$ когерентное излучение всегда присутствует в виде достаточно короткого импульса с длительностью $\tau < (\mu_0 / N)$. На больших временах $\tau > (\mu_0 / N)$ доминирует некогерентное излучение. При учете поглощения, даже небольшого, длительность когерентного импульса практически не меняется при росте инверсии, по крайней мере, достаточно далеко от порога.

Разделение излучения на индуцированную и спонтанную часть также позволяет понять не только характер искажения функции распределения пучка заряженных частиц, распространяющегося в плазменной среде, но и причины его вызывающие.

Таким образом, использование качественных моделей, использующих разделение квантов поля по их происхождению проясняет детали процесса формирования импульса индуцированного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Einstein . Quantentheorie der Strahlung. // Mitteilungen d. Phys. Ges. Zurich, Nr. 18, (1916); Phys. Zs. Nr.18, p.121, (1917); перев.: К квантовой теории излучения. УФН, 1965, т. 86, в. 3, с.371-381.
2. Таунс Ч. Получение когерентного излучения с помощью атомов и молекул./УФН, 1966, том.88, в. 3 с.461-483.
3. Основы плазменной электроники / А. Н. Кондратенко, В. М. Куклин – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
4. Kuklin V.M., Zagorodny A.G. To realization condition of maser radiation/ XIV Khariton's Topical Scientific Readings "High-Power Pulsed Electrophysics" March 12-16, 2012. Sarov, Russia.

УДК 004.02

Parallel construction of decision trees

B.V. Parshentsev, E.G. Tolstoluzhskaya
V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

Decision trees are a well-established set of methods for classification, recognition and decision support in the machine learning, the identification, the data analysis and the situational management. The decision tree must be compact - it lessens expenses when answering questions. Moreover, compact trees have a better prognostic ability. In some applications, such as Data Mining, a dataset to be learned is very large. In those cases it is highly desirable to construct univariate decision trees within a reasonable period of time. This can be accomplished by parallelizing univariate decision tree algorithms.

Key words: *hypersingular integral equations, numerical solution, computer-based experiment, diffraction problem, parallelism, ID3, knot.*

Дерева прийняття рішень - хорошо зарекомендовавший себя набор методов классификации, распознавания и поддержки принятия решений в компьютерном обучении, идентификации, анализе данных, ситуационном управлении. Дерево решений должно быть компактным - это экономит затраты при ответе на вопросы; Кроме того, компактные деревья имеют лучшую прогностическую способность. В нескольких приложениях, в основном в том числе Data Mining, набор данных, который нужно изучить, очень велик. В этих случаях очень желательно построить одномерные деревья решений в разумные сроки. Это может быть достигнуто путем параллелизации одномерных алгоритмов дерева решений.

Ключевые слова: *гиперсингулярное интегральное уравнение, численное решение, компьютерный эксперимент, задача дифракции, параллельность, ID3, узел.*

Дерева рішень - це добре встановлений набір методів класифікації, визнання та підтримки прийняття рішень при машинному вивченні, ідентифікації, аналізу даних, ситуаційного управління. Дерево рішень має бути компактним - це економить витрати при відповіді на запитання; Крім того, компактні дерева мають кращу прогностичну здатність. У ряді додатків, в основному, включаючи Data Mining, набір даних, який потрібно вивчити, дуже великий. У цих випадках дуже бажано побудувати одномірні дерева рішень в розумний час. Це може бути досягнуто шляхом розпаралелювання одномірних алгоритмів дерева рішень.

Ключові слова: *гіперсингулярне інтегральне рівняння, чисельний розв'язок, комп'ютерний експеримент, задача дифракції, паралельність, ID3, вузол.*

1 Introduction

Regression trees and classifications, also known under a common name as decision trees, are data structures that allow interpreting data for study purposes. Because decision trees are so easy to interpret, they are among the most widely used data-mining methods in business analysis, medical decision-making, and policymaking. Often, a decision tree is created automatically, and an expert uses it to understand the key factors and then refines it to better match her beliefs. This process allows machines to assist experts and to clearly show the reasoning process so that individuals can judge the quality of the prediction. Decision trees have been used in this manner for such wide-ranging applications as customer profiling, financial risk analysis, assisted diagnosis, and traffic prediction. [1] Decision trees can be drawn by

hand or created with a graphics program or specialized software. Informally, decision trees are useful for focusing discussion when a group must make a decision. Programmatically, they can be used to assign monetary/time or other values to possible outcomes so that decisions can be automated. Classification is the task of learning a target function f that maps each attribute set x to one of the predefined class labels y . The target function is also known informally as a classification model. A classification model is useful for the following purposes. [2]

Each tree has three types of nodes. Root node that has no incoming edges and zero or more outgoing edges. Internal nodes, each of which has exactly one incoming edge and two or more outgoing edges. Leaf or terminal nodes, each of which has exactly one incoming edge and no outgoing edges. The aim is to obtain a classification tree of symbolic notation class and, by the use of regression trees, continuous values are returned. For a decision tree you need to provide sample data, so you need to pre-assemble the data. On the one hand, the data may be prepared by an expert, and on the other hand, the accumulation of the facts relating to this task may be envisaged. Various applications can be created on the base of the purely interpretable data. In practice, each element under consideration can be represented by a set of attributes against which the decision tree predicts an unknown attribute.

Tree solutions can be used as a component responsible for making decisions on the bank accounting. Each situation is represented as a set of attributes, so in each particular situation the decision tree can suggest the best way of doing things. Furthermore, regression trees could be used to evaluate the strengths of any object (or to predict the outcome, both positive and negative). Tree solutions are divided into two types. The application of classification trees leads to categorical responses, and the regression trees return continuous values. In each node decision-making provides verification of the condition determined on the variables of forecasting. The number of ribs corresponds to the number of possible verification results. The tree levels form a hierarchical structure. Sheet nodes return answers, either categorical or continuous. The simulation algorithm uses a sample of data for passing through the tree according to the results of each condition verification. The tree training algorithm acts on the basis of the recursive partition principle on non-overlapping sets based on the use of the most suitable variable for this, which leads to the receipt of subsets containing the minimum number of third-party inclusions.

The corresponding decision node is created in the tree, and the process continues recursively. The best way to improve training is to make the dataset more manageable by using additional verification kits. The classification model presented in the form decision tree is intuitive and simplifies the understanding of the problem being solved. The result of the work of algorithms for constructing decision trees, in contrast, for example, from neural networks, which are "black boxes", is easily interpreted by user. This property of decision trees is not only important when referring to defined class of the new object, but also useful in interpreting the model classification as a whole. The decision tree makes it possible to understand and explain why a particular object belongs to a particular class. The decision trees make it possible to extract rules from the database on a natural language. Example rule: If Age > 35 and Income > 200, then issue a loan. The decision trees make it possible to create classification models in those areas where it is difficult to formalize knowledge. The algorithm for

constructing the decision tree does not require the user to choose input attributes (independent variables). The input of the algorithm can be fed all existing attributes, the algorithm itself will choose the most significant among them, and only they will be used to build a tree. In comparison with the neural networks, for example, this greatly facilitates the user's work, because in the neural networks the number of input attributes affects the learning time significantly. The accuracy of models created with decision trees usage is comparable to other methods of constructing classification models (statistical methods, neural network). [3]. First introduced in 1960, the decision trees is one of the most effective methods of data mining; they are widely used in several disciplines. [4] An example of the medical use of the decision trees is the health diagnosis based on the symptoms, in which classes defined by the decision tree, can be either different clinical subtypes, or condition, or patients with a condition that should receive different treatment. [5]

2 ID3

The iterative algorithm of Dichotomiser 3 (ID3) is one of the most popular tree induction design solutions. It is not tolerant of missing values or noisy, and the value of attributes must come from an infinite fixed set. ID3 uses entropy to calculate the sample homogeneity, as well as for separation. Information coefficient G for each attribute A is calculated using the following equation: to the last root of the tree the highest rate of information gain is assigned. Then the new subtree is built recursively upon each value of the attribute bound to the root. ID3 (C4.5 and CART) builds a tree induction solutions in descending recursively divide and overcome the way through the space of possible decision trees using greedy strategy. The decision is taken at each step, which is done for the optimizations purposes. For each node, locate the test the condition of the best segment assigns a workout data. Features tree induction solutions in the case include ID3 the following:

1. Each node excluding the leaf of the tree corresponds to an input attribute, each arc to a possible value of that attribute
2. Entropy is used to determine how informative a particular input attribute is about the output class on a given dataset
3. The recursive algorithm [6]

To evaluate the information gain associated with a split of T based on attribute a_i , we must determine the total count of positive and negative examples as well as the number of positive and negative instances for each value of attribute a_i . The computational complexity of ID3 (for categorical attributes) at each node of the decision tree is $(jN_j jA_j)$, where N is the number of examples and A is the number of attributes examined at the node. ID3 time requirements indicate that the total cost of the algorithm is superquadratic as for the set of workouts size. Obviously, the use of continuous data largely coincides with the computational time required to build a decision tree. To accelerate the the examination of candidates (and corresponding frequency calculation amount), ID3 firstly sorts the training examples using a continuous attribute as the sort key. It is the sorting operation, which increases the computational requirements to $(N \log_2 N)$, that leads to potentially exorbitant CPU time for large training sets. There is the solution to the above problem is called peepholing; the basic idea is to discard a sufficient number of candidates for threshold values so that the computational expense of sorting is lessened. It is (approximately)

an intelligent sampling of the candidates that aims to create a small “window” of threshold values; this window is then sorted as usual. Empirical results have shown that peepholing produces significant improvements over the traditional ID3 algorithm for several large training sets, however there is no guarantee that this approach will perform with consistent accuracy over all possible domains.

The main advantage of ID3 is its simplicity. Due to this reason, ID3 algorithm is frequently used for teaching purposes. However, ID3 has several disadvantages:

1. ID3 does not guarantee an optimal solution; it can get stuck in local optimums because it uses a greedy strategy. To avoid local optimum, backtracking can be used during the search.
2. ID3 can overfit to the training data. To avoid overfitting, smaller decision trees should be preferred over larger ones. This algorithm usually produces small trees, but it does not always produce the smallest possible tree.
3. ID3 is designed for nominal attributes. Therefore, continuous data can be used only after converting them to nominal bins. ID3 is designed for nominal attributes. Therefore, continuous data can be used only after converting them to nominal bins.[6]

3 Parallel Tree

Panda et al. (2009) proposed a parallel implementation of tree induction with MapReduce framework. MapReduce is one of the most popular parallel programming frameworks for data mining. In this framework, programmers need to specify a map function which processes key/value pairs to emit a set of intermediate key/value pairs and a reduce function that aggregates all intermediate values associated with the same intermediate key. The MapReduce framework was pioneered by Google and then popularized by open-source Apache Hadoop project. While there are other parallel programming frameworks (such as CUDA and MPI), MapReduce has become the industry standard and implemented on cloud computing services such as Amazon EC2 and various companies such as Cloudera provide services to ease Hadoop deployment [6]. Among the classification methods, the ID3 is computationally inexpensive - at first glance, it may not seem appropriate to apply parallelism to get benefit at runtime. However, when applied to huge amounts of data, you can expect that the maximum size of the learning set will require non-trivial amounts of computation. In addition, you can use the total available memory of multiprocessors with distributed memory or workstation clusters to accommodate ever-increasing sets of training materials that may not be possible on individual machines. Model-driving parallelization strategy to tree construction seems to be the most natural strategy of assigning processing elements to nodes of the decision tree and reflects the “divide and conquer” nature of the algorithm. Although appropriate to many search strategies such as branch-and-bound, the limitations of this approach when applied to tree construction become apparent. It is difficult to partition the workload among available processors (as the actual workload is not known in advance) - if the least loaded processor will be chosen, the processor assigned the middle branch of the root of the tree will complete first and will be idle. Alternatively, a “master-worker” scheme for a task assignment, where the available processors are assigned to the task of determining the best attribute for splitting of a single node and then is returned to a “waiting pool” may exhibit excessively fine-grained parallelism. The overall computation time may be influenced by the overhead of the computation time or by the overhead of approaches.

The efficiency is limited by the fact that the bulk of the computational work is associated with the root of the decision tree, where the entire training set T as well as all m -attributes must be examined to determine the subsets represented in the immediate children. Attribute based decomposition is another strategy that associates m processing elements with each attribute in X so that the evaluation of gain for all m -attributes can proceed concurrently. Pearson evaluated the performance of a combination of the "master-worker" approach and attribute based decomposition to compensate for growing workloads at lower levels of the decision tree and the accompanying increase in the ratio of parallel overheads to the "useful" work. Pearson concluded that "none of the results show a speed reduction (in proportion) with the possible parallel computation" highlights the shortcomings of this strategy. A further limitation of this approach is the shared-memory model that must be assumed to allow global access to training examples by the individual tasks; this assumption severely limits the scalability of the algorithm (Fig. 1).

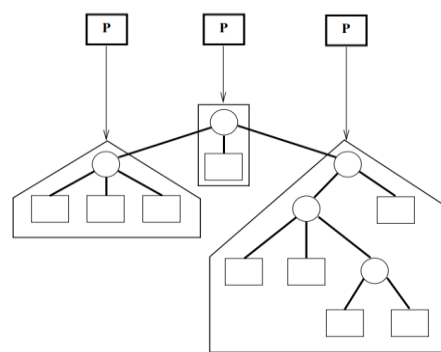


Figure 1. model-driven model.

An alternative method of parallelizing tree construction employs a data-parallel approach and is depicted in Fig. 2. [7]

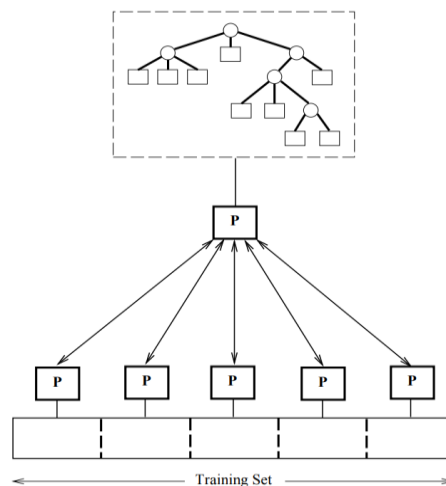


Figure 2 Data-parallel model.

The motivation behind this decomposition strategy arises from the observation that most trees construction algorithms rely on frequency statistics derived from the data itself. In particular, the fundamental operation in ID3-like algorithms is the counting of the attribute value/class membership frequencies of the training examples. Parallel Decision Trees is a strategy for dataparallel tree construction. The machine model employed assumes the availability of P processing elements (PE), each with associated local memory. The interprocessor communication primitives required are minimal: each PE must be able to send a contiguous block of data to its nearest neighbor; additionally, each PE must be able to send data to a distinguished "host" processor. This machine model is general enough so that the strategy may be employed on currently-available massively parallel systems as well as networks of workstations. Because the communication patterns involved are regular, with the bulk of transfers involving only nearest neighbor PEs, the additional overhead incurred due to inter-processor communication is kept to a minimum.

```

DparallelID3(Instances x, Feature fi)
  Send x and fi to each slave processor
  Sort x in each slave processor
  Receive possible split points from slave processor(s)
  Determine the minimum of them
  Send the minimum to the slave processor(s)
  Receive the frequency statistics from slave processor(s)
  Slave processor(s) update their iterator(s) if necessary
  Calculate information gain  $g_i$  for that split point from the gathered frequency statistics
  Compare  $g_i$  with  $bestgain$  and update if former is better
  Goto above to receive again possible split points
    
```

Figure 3. Parallelization (pseudocode)

As attributes are chosen for splitting criteria associated with internal nodes of the decision tree, the master broadcasts the selected criterion to worker processors, who use this information to "mask" training events that do not belong to the subset of cases that are examined at lower levels of the tree (Fig. 4).

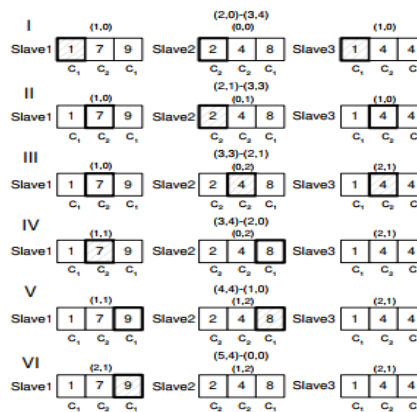


Figure 4. Parallelization example

Tree partitions the entire training set among the available PEs so that each processor contains within its local memory at most $[N/P]$ examples from T . This partitioning is static throughout tree construction and subsequent pruning. No examples are allocated to the "host" processor, which is instead responsible for:

- Receiving frequency statistics or gain calculations from the "worker" PEs and determining the best split.
- Notifying the PEs of the selected split at each internal node.
- Maintaining the data structures for the tree itself.

Conclusion

The ID3-like algorithms, induce, axis-parallel, decision trees, in which each test one attribute value is equivalent to a hyperplane parallel to the size attribute in object space. Recently, methods for induction of oblique decision tree, such as Oblique Classifier 1 (OC1) have been developed which have the potential of capturing a more general class of concepts more succinctly and accurately than their axis-parallel counterparts OC1 use ascent and randomization to identify inclined splits training data. Because OC1's search starts at an axis-parallel split that is subsequently perturbed into oblique orientations to find better partitions, the strategy outlined by tree can benefit algorithms such as OC1. ID3 is a non-incremental (or batch) inductive procedure; all training examples are required prior to construction of the classifier. Several modifications to ID3 have been proposed to provide for an incremental variant of the algorithm. ID5P tree is an example of the incremental method, which increases the decision tree frequency counter associated with each non-leaf node. Information needed for the construction of the original tree, is available in our parallel formulation. Thus, the "bootstrap" structure can benefit from parallel structure using PDT method, and the resulting tree can be modified as new examples are presented.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pang-Ning Tan, Vipin Kumar. Introduction to Data Mining. Introduction to Data Mining 1st Edition 2014 – 146p-154.
2. Hastie TJ, Tibshirani RJ, Friedman JH. The Elements of Statistical Learning: Data Mining Inference and Prediction. Second Edition. Springer; 2009.
3. Data Mining: учебное пособие /И.А. Чубукова.- 2-е изд., испр. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 100с
4. Hastie TJ, Tibshirani RJ, Friedman JH. The Elements of Statistical Learning: Data Mining Inference and Prediction. Second Edition. Springer; 2009. 74p.
5. Bate M. Learning Data Mining with R.2015. 79p
6. Lior R. Data Mining with Decision Trees: Theory and Applications. 2014 Dec. 79 p
7. Kesav P., Utpal B., David G., Alex N. Languages and Compilers for Parallel Computing. LCPC 1994 155-169 p.

УДК 519.6, 51-76

Эволюция сообществ стратегий при наличии источников

А. В. Приймак, В. В. Яновский

Харьковский национальный университет

имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61000, Харьков, Украина

Институт монокристаллов, Национальная

Академия Наук Украины, пр. Науки, 60, 61001 Харьков, Украина

Рассмотрена эволюция популяции стратегий, ограниченных только глубиной памяти, при наличии источников стратегий разной глубины памяти. Показано, что глубина памяти и сложность стратегий являются эволюционно выгодными. Установлены свойства стратегий, формирующих стационар. Показано, что во всех случаях агрессивность стратегий падает и на стационарной стадии все стратегии имеют нулевую агрессивность по отношению друг к другу. Это свойство можно использовать в качестве принципа отбора стратегий. Показана связь между агрессивностью и количеством очков на ход стратегии. Чем выше агрессивность, тем меньше очков эволюционных преимуществ на ход стратегии.

Ключевые слова: эволюция, популяция, стратегия, сложность, кооперация.

Розглянуто еволюцію популяції стратегій, обмежених тільки глибиною пам'яті, при наявності джерел стратегій різної глибини пам'яті. Показано, що глибина пам'яті і складність стратегій є еволюційно вигідними. Встановлено властивості стратегій, які формують стаціонар. Показано, що у всіх випадках агресивність стратегій падає і на стаціонарній стадії всі стратегії мають нульову агресивність по відношенню один до одної. Цю властивість можна використовувати в якості принципу відбору стратегій. Показано зв'язок між агресивністю і кількістю очок на хід стратегії. Чим вище агресивність, тим менше очок еволюційних переваг на хід стратегії.

Ключові слова: еволюція, популяція, стратегія, складність, кооперация.

The evolution of population of the strategies, limited only by the memory depth, in the presence of the sources of strategies of different memory depths has been considered. It has been shown that the memory depth and the complexity of strategies are evolutionarily beneficial. The properties of the strategies which form the stationary state have been established. It has been shown that the aggressiveness of the strategies falls in all cases and at the stationary stage all strategies have zero aggressiveness in relation to each other. This property can be used as the strategy selection principle. The relation between the aggressiveness and the number of points for a strategy move has been shown. The higher the aggressiveness, the fewer points of evolutionary advantage the strategy has.

Key words: evolution, population, strategy, complexity, cooperation.

1. Введение

Эволюция сложных биологических систем привлекает большое внимание, начиная с работы Ч. Дарвина [1]. Теория игр [2-4] обеспечивает надежное основание для изучения эволюции. Одним из важных направлений этих исследований является поиск механизмов возникновения сотрудничества или кооперации. Среди многих игровых моделей, которые используются для объяснения кооперативного поведения, особое место занимают игры, которые можно рассматривать как обобщение дилеммы заключенного [5-7]. Выбор матрицы выплат в этом случае определяется простым физическим

соображением. Кооперация всегда требует дополнительных затрат ресурсов по сравнению с отказом от кооперации. Склонность к экономии ресурсов или усилий накладывает ограничение на свойства матрицы выплат. Так, при каждом отдельном взаимодействии индивидуальный выигрыш при отказе от кооперации превышает выигрыш при согласии на кооперацию. Сток стратегий определяется условием отказа от применения худшей стратегии на каждом новом этапе процесса эволюции популяции или, другими словами, отказом от применения худших стратегий предыдущего поколения.

Развитие этого направления привело к открытию механизмов кооперативного поведения как в теории, так и экспериментальных наблюдениях [8]. Начиная с работы Новак и Мей [9], эволюционные игры были широко изучены в структурированных популяциях, в том числе на регулярных решетках [10-12] и сложных сетях [13-18]. В настоящее время обнаружен ряд общих, но конкретных механизмов, приводящих к кооперации в самых разнообразных системах (см. например [19]). Среди таких механизмов следует отметить: добровольное участие [20], наказания [21], сходство [22], неоднородная деятельность [23], социальное разнообразие [24, 25], динамические связи [26], асимметричное взаимодействие и граф перестановок [27], миграция [28-30], групповой фаворитизм [31], взаимозависимые связи [32]. Используя такой подход, можно выяснить появление множества разнообразных свойств у эволюционирующих популяций. Под эволюционными популяциями, следуя Дарвину, будем понимать множество объектов, которые подчиняются следующим принципам. Это 1) принцип наследственности, 2) принцип изменчивости и 3) естественного отбора.

2. Эволюция сообщества стратегий

Одним из важнейших свойств биологических объектов является память и, как следствие, сложное поведение или появление сложных стратегий поведения. В работе [33] рассмотрена эволюция сообщества всех стратегий с ограниченной глубиной памяти $k \leq 2$ в рамках задачи Коши. Сток стратегий в таких сообществах обеспечивает их конкуренция и исчезновение проигравшей стратегии. Увеличение глубины памяти сталкивается с огромными вычислительными сложностями из-за сверхэкспоненциального роста численности всех возможных стратегий с глубиной памяти k . Это создает непреодолимые вычислительные трудности (см. обсуждение в [33]). С другой стороны численность носителей стратегий конечна и всегда существует глубина памяти k_c , при которой число возможных стратегий превышает число их носителей. В этой ситуации постановка задачи Коши об эволюции всех возможных стратегий невозможна для такого сообщества. Поэтому в этом случае сообщество нужно рассматривать как открытое для новых стратегий, отсутствующих на начальной стадии эволюции. Фактически в этом процессе легко увидеть реализацию принципа изменчивости теории Дарвина. С точки зрения статистической физики в обществе присутствует сток стратегий и их источник. Примерами таких физических систем может служить сильная турбулентность в жидкости (см., например, [34, 35]). В этих условиях возникают

стационарные неравновесные распределения стратегий. Эволюция таких сообществ, естественно, существенно отличается от рассмотренных в [33] в постановке задачи Коши.

На каждом этапе эволюции проигравшая стратегия не передается следующему поколению. Взамен исчезнувшей стратегии в общество вбрасывается новая стратегия. Другими словами, моделируется неравновесная ситуация с источниками и стоками стратегий. Источник вбрасывает стратегии, глубина памяти которых отличается от глубины памяти исходного сообщества стратегий. Нас будут интересовать две основные характеристики стратегий - глубина памяти и сложность стратегий и соответствующие характеристики сообщества стратегий. Поэтому будем использовать коллективные переменные для огрубленного описания сообществ.

Жизнь в популяции и ее эволюция определяется характером взаимодействия объектов популяции. Наиболее простой случай это их парное взаимодействие. Будем предполагать, что объект в процессе жизни не меняет стратегию и взаимодействует в соответствии с итерированной игрой по дилемме заключенного с каждой стратегией популяции, включая себя. Другими словами, рассматривается одночастичное приближение взаимодействия стратегий - без учета числа носителей стратегии. Дополнительное преимущество такого выбора связано с возможностью сравнивать результаты с результатами задачи Коши, полученные в работе [33].

Для того, чтобы установить результат парного взаимодействия стратегий, определим матрицу выплат. Дилемма заключенного двух игроков состоит в том, что каждый игрок может выбрать между сотрудничеством (1) или отказом (0). В работе мы используем значения матрицы выплат Аксельрода M_1 [36] - в зависимости от стратегии соперника выбранный игрок получает $a_{11} = 3$, если оба сотрудничают; $a_{22} = 1$ - если оба отказываются; $a_{12} = 0$ - если выбранный сотрудничает и противник отказывается; и $a_{21} = 5$ - если выбранный отказывается, а противник сотрудничает. Матричные элементы, соответствующие дилемме заключенного, ограничены неравенствами $a_{21} > a_{11} > a_{22} > a_{12}$ и $2a_{11} > a_{21} + a_{12}$.

Число взаимодействий двух стратегий в одном поколении выберем одинаковым $n = 100$. Это оптимальное значение уже достаточно для нечувствительности результатов эволюции к первому ходу, как показано в [33].

Источник стратегий моделирует изменчивость стратегий, например, в результате мутаций. При этом могут существенно отличаться свойства исходных стратегий сообщества от свойств вбрасываемых стратегий. Важными являются два принципиально различных случая. Во-первых вбрасываемые стратегии могут иметь большую глубину памяти, чем сообщество. В этом случае вбрасываются и более сложные стратегии. Во-вторых, вбрасываемые стратегии могут иметь меньшую глубину памяти, чем стратегии сообщества. В этом случае в сообщество вбрасываются более примитивные стратегии. Основной интерес представляют свойства эволюции сообществ в этих случаях. Начнем со

случая, когда глубина памяти вбрасываемых стратегий больше глубины памяти общества на начальном этапе эволюции.

3. Сообщество стратегий с нулевой и единичной памятью и источником стратегий с глубиной памяти 2

Пусть начальное состояние сообщества стратегий образуют все стратегии с глубиной памяти $k \leq 1$. Число таких стратегий 104. После проведения этапа эволюции проигравшая стратегия (набравшая наименьшую сумму очков) удаляется и на следующий этап не допускается. В оставшееся сообщество вбрасывается случайная стратегия с глубиной памяти 2. Все оставшиеся стратегии и вброшенная снова вступают в соревнование с начальными нулевыми очками эволюционных преимуществ. Эти стратегии можно рассматривать как потомки предыдущего поколения с мутирующей новой стратегией. Далее процесс повторяется до выхода в стационар.

В рассматриваемом случае при численном моделировании стационар достигается на 2590 стадии эволюции. Разумеется, время выхода в стационар в разных реализациях может отличаться из-за использования случайного вбрасывания стратегий. Характерное время выхода в стационар порядка нескольких тысяч поколений. В стационаре присутствуют 104 стратегии с учетом различий в первом ходе. Все эти стратегии имеют нулевую агрессивность по отношению друг к другу и набирают одинаковое число очков (31200.0) на стационарном этапе эволюции. Это свойство совпадает с эволюцией сообществ стратегий и при отсутствии источников стратегий (см.[33]).

Кроме этого, стационар формируют стратегии с большей глубиной памяти и максимальной или близкой к ней сложностью. На рис.1 приведена численность стратегий N от глубины памяти M и сложности C в стационаре.

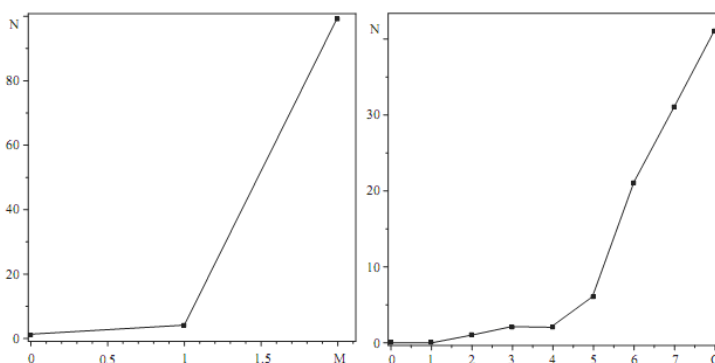


Рис.1. Число стратегий N в стационаре с определенной глубиной памяти M - слева и число стратегий N определенной сложностью C - справа. Линии нанесены для удобства ориентации и физического смысла не имеют

Легко заметить, что в стационаре основная часть стратегий имеет максимальную глубину памяти и максимальную сложность. Малая часть стратегий это 4.8% имеют глубину памяти меньше максимальной и 45.2% оставшихся в стационаре имеют сложность меньше максимальной. При этом примитивные стратегии со сложностью 0, 1 вовсе отсутствуют в стационаре.

Другими словами, общество стратегий захватывают сложные стратегии с максимальной глубиной памяти.

Обсудим теперь как происходит выход в стационар. Основные характеристики, которые представляют интерес, должны быть связаны с глубиной памяти и сложностью стратегий. Слежение за всеми стратегиями бессмысленно из-за большого числа возможных стратегий. Поэтому используем коллективные переменные - численность стратегий с определенной глубиной памяти и численности стратегий определенной сложности. Эти переменные содержат наиболее детальную информацию о поведении глубины памяти и сложности в обществе стратегий при эволюции. Численное моделирование эволюции позволяет определить изменение числа стратегий с определенной глубиной памяти (рис.2).

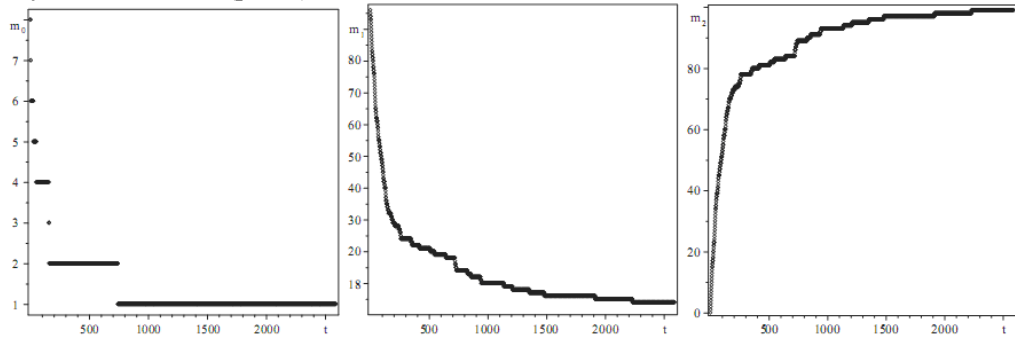


Рис.2. Изменение со временем численности стратегий общества с глубиной памяти 0 (слева), 1 (центр) и 2 (справа)

Хорошо заметно монотонное уменьшение численности стратегий с глубиной памяти 0 (левая кривая) и с глубиной памяти 1 (центральная кривая) на рис.2. До стационара доживает одна стратегия с нулевой глубиной памяти (1)01 и 4 с глубиной памяти 1 (в этой реализации это стратегии (1)(11)0111, (1)(01)0111, (1)(11)0011 и (1)(01)0011). Монотонно увеличивается только численность стратегий с глубиной памяти 2 (правая кривая).

Другой важной информацией уже о сложности стратегий сообщества служат численности стратегий определенной сложности. Их поведение при эволюции показано на рис.3.

Видно, что численность стратегий малой сложности (0, 1, 2, 3, 4) убывает со временем, а увеличивается только численность стратегий со сложностью 6,7 и 8. Численность стратегий граничной сложности 5 осциллирует с возрастанием при приближении к стационару. Примитивные стратегии сложности 0 и 1 не доживают до стационарного состояния. Только одна стратегия сложности 2 - (1)01 («око за око») доживает до стационара, две стратегии сложности 3 - (1)(11)0011, (1)(01)0011 и две сложности 4 - (1)(11)0111, (1)(01)0111.

Перейдем теперь к обсуждению средних характеристик стратегий сообщества. Начнем с поведения средней глубины памяти сообщества со временем (рис.4). Среднее значение глубины памяти легко определить по

$$\overline{M} = \frac{0 \cdot m_0(t) + 1 \cdot m_1(t) + 2 \cdot m_2(t)}{m_0(t) + m_1(t) + m_2(t)}.$$

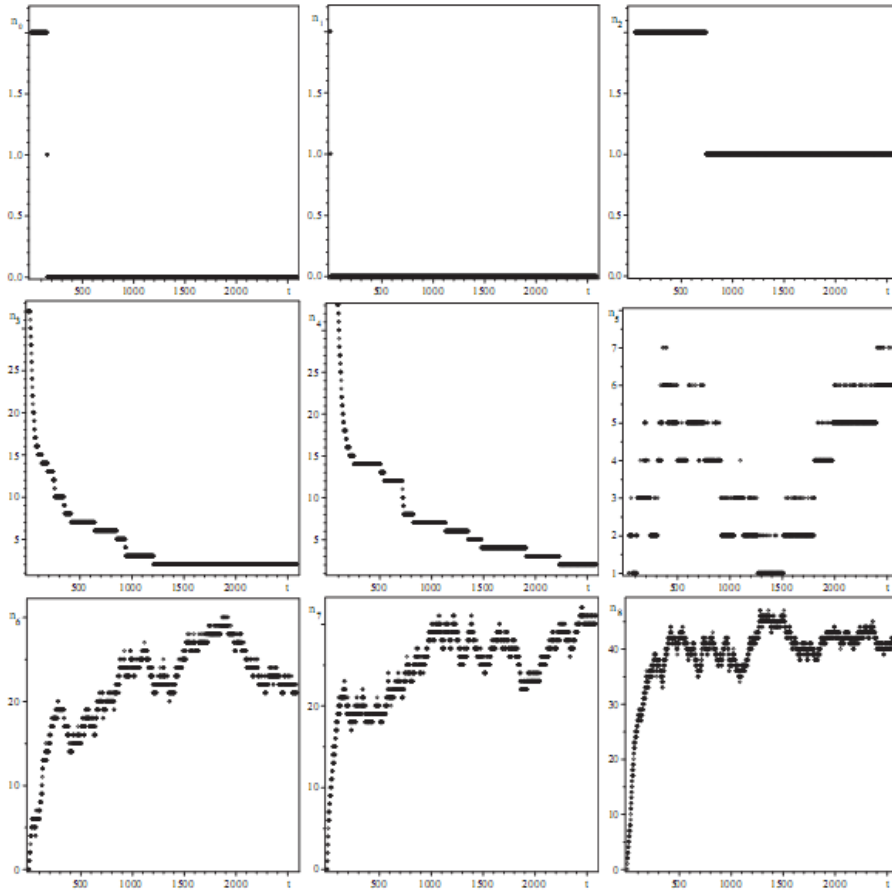


Рис.3. Изменение со временем численности стратегий общества со сложностью θ ($n_0(t)$) и со сложностью i графики $n_i(t)$ соответственно с $i = 1, 2, \dots, 8$

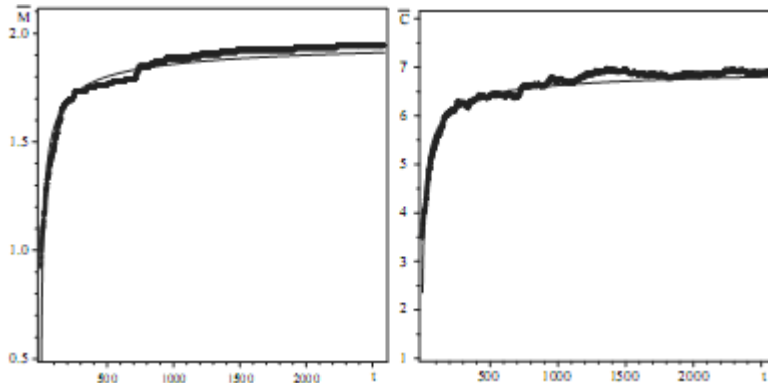


Рис.4. Слева изменение средней глубины памяти общества со временем (точки) и эмпирическая кривая $\bar{M} = 2 - 2/\sqrt{t/5+1}$ (тонкая кривая). Справа изменение средней сложности стратегий общества со временем (точки), соответствующая корневому закону выхода в стационар $\bar{C} = 7.1 - 5/\sqrt{t/9+1}$ (тонкая кривая)

Легко заметить, что средняя глубина памяти нарастает со временем и достигает в стационаре максимального значения, близкого к 2 ($\bar{M} \approx 1.9$). Возможно, что если увеличить время наблюдения на порядок, то будет достигнуто максимальное значение 2. Характер выхода в стационар имеет степенной характер, близкий к $\bar{M} = 2 - \frac{2}{\sqrt{t/5+1}}$, совпадение зависимостей можно даже улучшить, подбирая постоянные.

Вычисление средней сложности сообщества стратегий также легко выполнить, используя численность стратегий определенной сложности $n_i(t)$

$$\text{согласно } \bar{C}(t) = \frac{\sum_{i=0}^8 i n_i(t)}{\sum_{i=0}^8 n_i}.$$

Средняя сложность также монотонно нарастает, выходя асимптотически на плато, соответствующее средней сложности $\bar{C} \approx 7.1$. Это достаточно близкое значение к максимально возможной сложности 8. Анализируя эти данные, можно заметить удовлетворительное совпадение закона релаксации средней сложности к феноменологическому корневому закону (см. рис.4)

$$\bar{C}(t) = 7.1 - \frac{5}{\sqrt{t/9+1}}.$$

Следует отметить, что случайное вбрасывание стратегий дает относительно малые флуктуации средней глубины памяти и средней сложности.

Еще одна важная характеристика сообществ, которая анализируется в этой работе, это агрессивность стратегий. Под агрессивностью будем понимать долю отказов стратегии от кооперации. Разумеется, можно попытаться ввести коллективные переменные для описания этой характеристики. Однако, агрессивность принимает дробные значения, что затрудняет их введение. Поэтому в этой работе ограничимся описанием поведения средней агрессивности сообщества стратегий. Видно, что средняя агрессивность убывает со временем (см. рис.5). Исключение составляет короткий начальный участок, величина которого близка к периоду исчезновения примитивных стратегий.

Важно отметить, что стационар формируют стратегии, не проявляющие агрессивность по отношению друг к другу (агрессивность нулевая). Возможно это можно сформулировать в качестве главного эволюционного принципа отбора стратегий. Характер спадания, который можно установить по численным данным, не достаточно ярко выражен, и по-видимому близок к линейному.

Наконец, перейдем к обсуждению набора стратегиями очков эволюционных преимуществ в среднем на одном ходе стратегии на определенном этапе эволюции. Эта характеристика дает возможность сравнивать эффективность взаимодействия стратегий. Количество очков эволюционных преимуществ, получаемых стратегией в среднем на ход, возрастает со временем (см. рис.5). Другими словами, взаимодействие стратегий становится все более выгодным.

Существует универсальная связь между агрессивностью и числом очков, набранных на одном ходе стратегии:

$$\bar{A}(t) = \sqrt{\lambda \cdot (\bar{P}_{max} - \bar{P}(t))} - a. \quad (1)$$

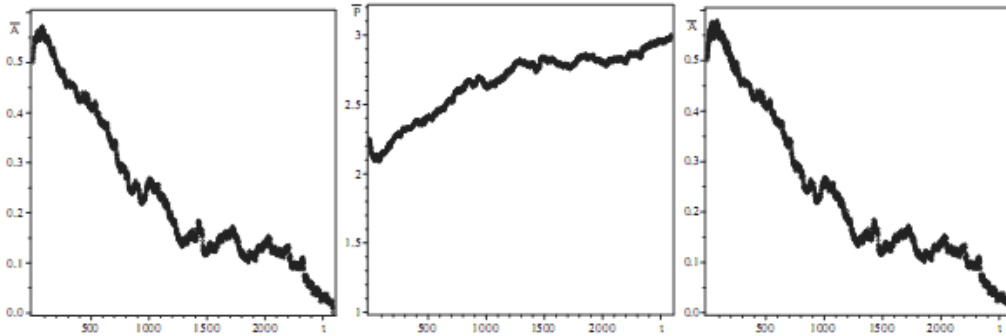


Рис.5. Слева изменение средней агрессивности стратегий общества со временем. В центре изменение со временем числа очков на ход стратегии общества в среднем. Справа сравнение средней агрессивности, полученной численным моделированием (квадратики), с соотношением (1) (крестики)

Значения постоянных во всех случаях выбираются одинаковыми $\bar{P}_{max} = 3$, $\lambda = 5.3/8$ и $a = 0.2$. Результат сравнения средней агрессивности с закономерностью (1) приведен на рис.5. Отличия трудно заметить из-за практически полного совпадения точек. Универсальная закономерность (1) выполняется не только в постановке задачи Коши, но и в неравновесных случаях с источником стратегий.

В заключение раздела обсудим доминирующие стратегии на каждом этапе эволюции. Под доминирующими стратегиями будем понимать побеждающие стратегии в каждом поколении. Разумеется, имена или правила стратегий являются слишком детальной информацией и малоинформативной. Нас будут интересовать такие свойства побеждающих стратегий, как глубина памяти и сложность. На рис.6 показаны глубина памяти и сложность побеждающих стратегий на всех этапах эволюции.

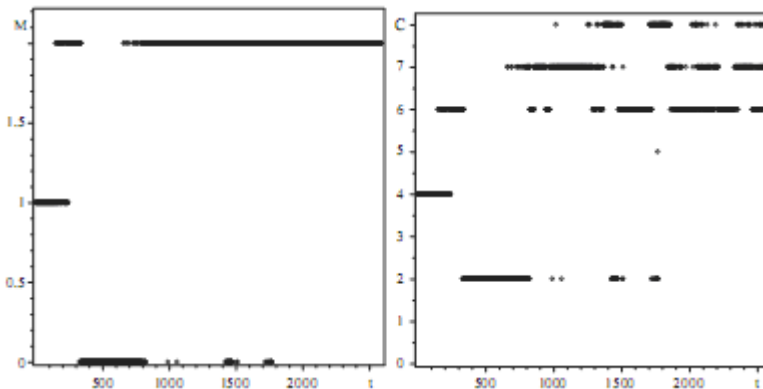


Рис.6. Слева показана глубина памяти, справа - сложность победивших стратегий на соответствующем этапе эволюции

По мере еволюції сообщества в нем начинают доминировать стратегии с большой глубиной памяти и сложные стратегии. Однако, на начальной стадии эволюции присутствовали периоды доминирования стратегий без памяти и малой сложности 2. Единичные этапы доминирования таких стратегий встречаются вплоть до 1771 поколения, что составляет 68% времени выхода в стационар. Следует ожидать, что и в других сообществах стратегий с большей глубиной памяти доминирование примитивных стратегий может наблюдаться на значительных периодах эволюции.

4. Сообщество стратегий с единичной памятью и источником стратегий с глубиной памяти 2

Перейдем теперь к сообществу стратегий, из которых исключены примитивные стратегии без памяти и присутствует источник стратегий с глубиной памяти 2. На начальной стадии в «сообществе» присутствуют все стратегии с единичной памятью. Это достаточно близкая ситуация к рассмотренной выше и основной интерес представляет влияние примитивных стратегий на эволюцию сообществ.

В рассматриваемом случае стационар достигается на 2656 стадии эволюции - немного позже, чем при наличии в сообществе стратегий с нулевой глубиной памяти. В стационаре присутствуют 96 стратегий, с учетом различий в первом ходе. Все эти стратегии имеют нулевую агрессивность по отношению к друг другу и набирают одинаковое число очков (28800.0) на стационарном этапе.

На стационарной стадии выживают стратегии с большей глубиной памяти и сложные. На рис.7 приведена численность стратегий N в стационаре от глубины памяти M и сложности C .

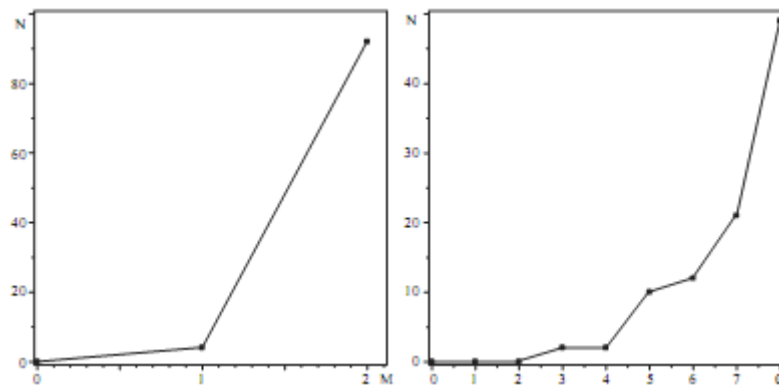


Рис.7. Число стратегий N в стационаре с определенной глубиной памяти M слева и число стратегий N определенной сложности C справа

Легко заметить, что в стационаре основная часть стратегий имеет максимальную глубину памяти и максимальную сложность. В нем присутствуют только 4 стратегии с 1 глубиной памяти, пара которых имеет сложность 3 (это стратегии (1)(01)0011 и (1)(11)0011), а вторая пара (1)(01)0111 и (1)(11)0111 - сложность 4. Только 4.2% стратегий имеют глубину памяти меньше

максимальной и 52% - сложность меньше максимальной. Общество захватывают сложные стратегии с максимальной глубиной памяти.

Обсудим теперь выход в стационар. На рис.8 приведены зависимости от времени численности стратегий с глубиной памяти 1 - $m_1(t)$ и с глубиной памяти 2 - $m_2(t)$. Нетрудно заметить, что численность стратегий $m_1(t)$ убывает со временем, а $m_2(t)$ увеличивается. Интересно отметить отсутствие значительных флуктуаций их численности, несмотря на наличие случайного источника. Характер поведения $m_1(t), m_2(t)$ близок к предыдущему случаю.

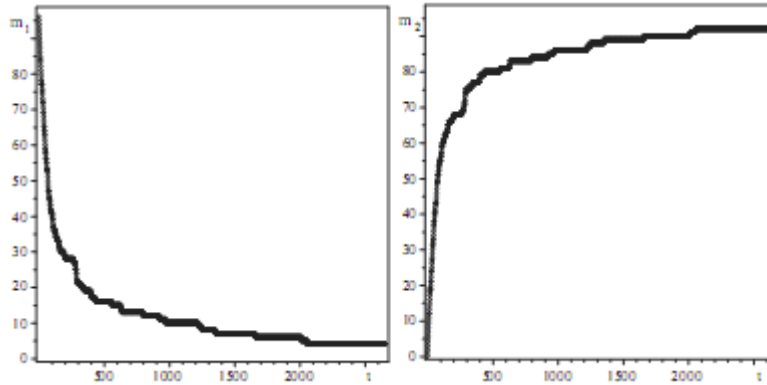


Рис.8. Изменение со временем численности стратегий общества с глубиной памяти 1 (слева) и 2 (справа)

Стратегии со сложностью 0,1,2 в сообществе отсутствуют (рис.9). Как и в предыдущем случае численность стратегий сложности ниже 5 убывает, а выше - увеличивается с заметными осцилляциями. Численность сложности 5 является граничной, отделяя качественно разные режимы. Осцилляции численности, естественно, наиболее заметны в случае малой численности стратегий – для них случайное вбрасывание стратегий оказывает существенное влияние. Поэтому относительная амплитуда флуктуаций меньше у $n_8(t)$, чем у $n_7(t)$ и $n_6(t)$. Максимальная амплитуда осцилляций достигается у величины граничной численности $n_5(t)$. Амплитуда соответствующих осцилляций порядка $\sqrt{n_i(t)}$, где $i = 5, 6, \dots, 8$. С увеличением численности относительная амплитуда убывает $\sim \frac{1}{\sqrt{n_i(t)}}$ в соответствии с обычными статистическими законами.

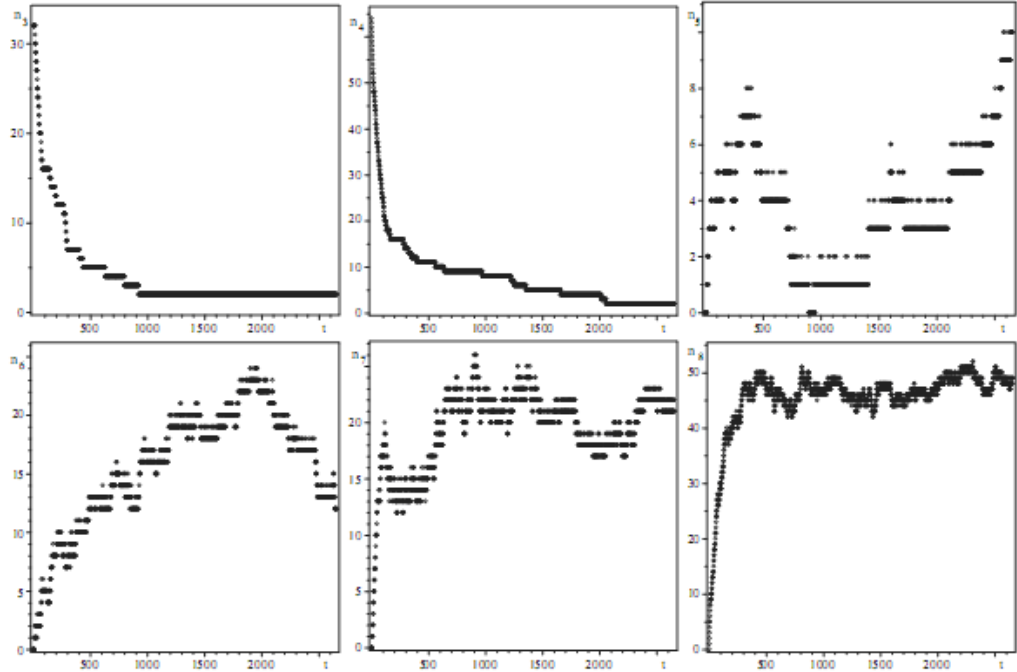


Рис.9. Изменение со временем численности стратегий общества со сложностью 3 ($n_3(t)$) и со сложностью $i = 4...8$ - графики $n_i(t)$

Также наблюдается монотонное увеличение средней глубины памяти и сложности (рис.10). Ранее обнаруженные корневые законы выхода в стационар $\bar{M} = 2 - 2/\sqrt{t/5+1}$ и $\bar{C} = 7.2 - 5/\sqrt{t/9+1}$ хорошо согласуются и с этим случаем.

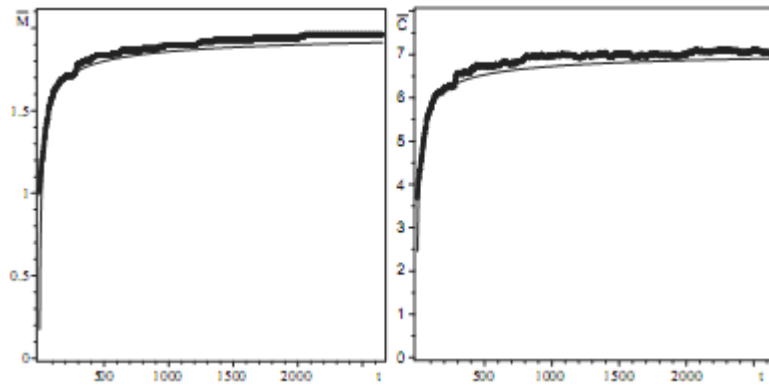


Рис.10. Слева изменение средней глубины памяти общества со временем (точки) и эмпирическая кривая $\bar{M} = 2 - 2/\sqrt{t/5+1}$ (тонкая кривая). Справа изменение средней сложности стратегий общества со временем (точки), соответствующая корневому закону выхода в стационар $\bar{C} = 7.2 - 5/\sqrt{t/9+1}$ (тонкая кривая)

Характер изменения средней агрессивности общества сохраняется и в этом случае (рис.11). Средняя агрессивность уменьшается со временем. Стационарные формируют стратегии, которые имеют нулевую агрессивность по отношению к друг другу. В соответствии с универсальной связью (1) среднее число очков эволюционных преимуществ возрастает со временем.

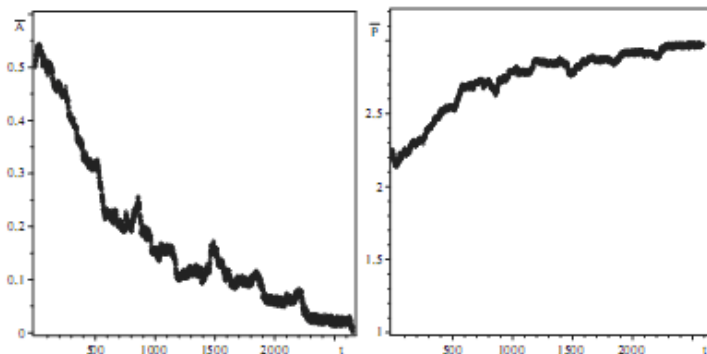


Рис.11. Слева изменение средней агрессивности стратегий общества со временем. Справа изменение со временем числа очков на ход стратегии общества в среднем

Таким образом, все зависимости качественно сохраняются, а возникающие отличия сводятся к небольшим количественным изменениям.

Следовательно, в процессе эволюции общество захватывают сложные стратегии с большой сложностью и максимальной глубиной памяти. Все стационарные стратегии имеют нулевую агрессивность по отношению друг к другу. Более того, эти закономерности справедливы для всех обществ, когда вбрасываются стратегии большей сложности, чем присутствовали изначально. Были рассмотрены, кроме описанных в настоящей работе, случаи общества с глубиной памяти 0 и источником стратегий с глубиной 1 и отдельно глубиной 2.

Поэтому рассмотрим случай, когда вбрасываются стратегии меньшей глубины памяти, чем были исходно в обществе.

5. Сообщество стратегий с единичной памятью и источником стратегий с глубиной памяти 0

В этом случае характерное время выхода в стационар составляет 583 этапа. В стационаре остается 96 стратегий (с учетом различий в первом ходе или число носителей стратегий).

Видно, что распределение стратегий по глубине памяти и сложности (рис.12) качественно меняется по сравнению с предыдущими случаями. Максимальная численность стратегий с нулевой памятью, но стратегии и с единичной глубиной памяти присутствуют в стационаре. Численность по сложности также имеет существенные отличия - присутствует максимум численности при сложности стратегий 2. Заметим, что это значение сложности соответствует максимальной сложности среди вбрасываемых стратегий. Собственно, эти стратегии и доминируют в стационаре. Можно предположить, что максимум численности в задачах со вбрасыванием стратегий достигается на вбрасываемых стратегиях с максимальной сложностью. Это правило выполняется во всех рассмотренных

случаях. Прimitивные стратегии 0-ой сложности исчезают из стационара как и в предыдущих случаях. Выживает небольшое количество и максимально сложных стратегий (5.2%) (см. рис.12) несмотря на большой численный перевес и вбрасывание примитивных стратегий. Примерно столько же стратегий с максимальной памятью (8.3%) остается в стационаре. Другими словами, даже в такой неблагоприятной ситуации сложность стратегии позволяет выжить и проникнуть в стационарное состояние общества. Все стационарные стратегии имеют 0 агрессивность по отношению к друг другу. Правило нулевой агрессивности выполняется во всех рассмотренных случаях как при отсутствии источника, так и при наличии источника новых стратегий.

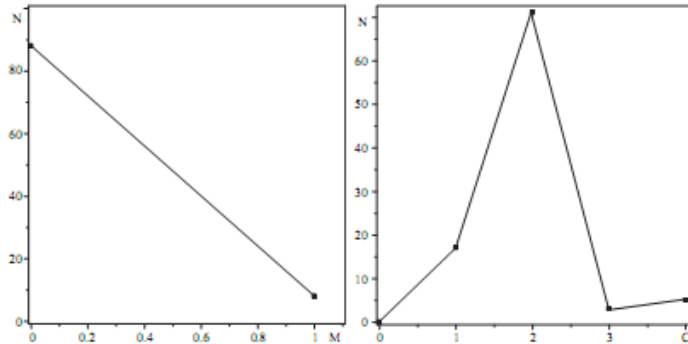


Рис.12. Число стратегий N в стационаре с определенной глубиной памяти M слева и число стратегий N определенной сложности C справа

Перейдем к эволюции стратегий со временем. Период вымирания самой агрессивной стратегии (0)0000 занимает 319 этапов и составляет 54.7% времени выхода в стационар. Изменение численности стратегий по глубине памяти приведено на рис.13. Качественное отличие от предыдущих случаев состоит в увеличении численности стратегий с нулевой глубиной памяти и уменьшении численности стратегий с большей глубиной памяти.

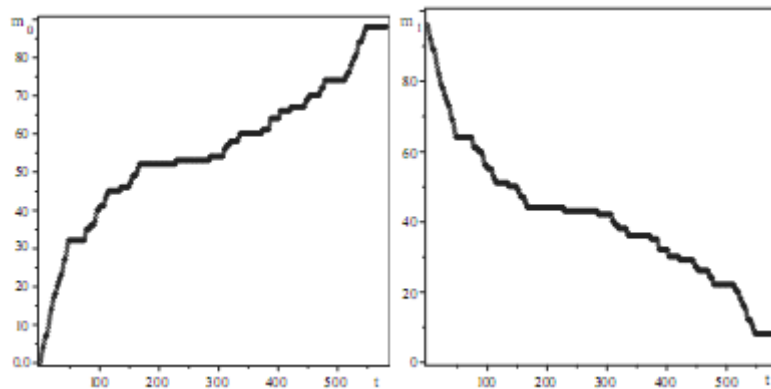


Рис.13. Изменение численностей стратегий со временем с глубиной памяти 0 (слева) и с глубиной памяти 1 (справа)

Характер зависимостей численности стратегий определенной сложности достаточно нетривиален (см. рис.14). Видно, что на начальном этапе численность стратегий с нулевой сложностью возрастала, но довольно быстро их численность уменьшилась до нуля и такие стратегии не вышли в стационарный режим. Стратегии со сложностью 1 на начальных этапах отсутствовали, но стали увеличивать свою численность начиная примерно с половины времени выхода в стационар. Численность стратегий со сложностью 2 монотонно возрастала на протяжении всего времени эволюции. Стратегии более высокой сложности уменьшали свою численность на протяжении всего времени выхода в стационар. Однако, их численность выходит на конечное не нулевое значение в стационаре.

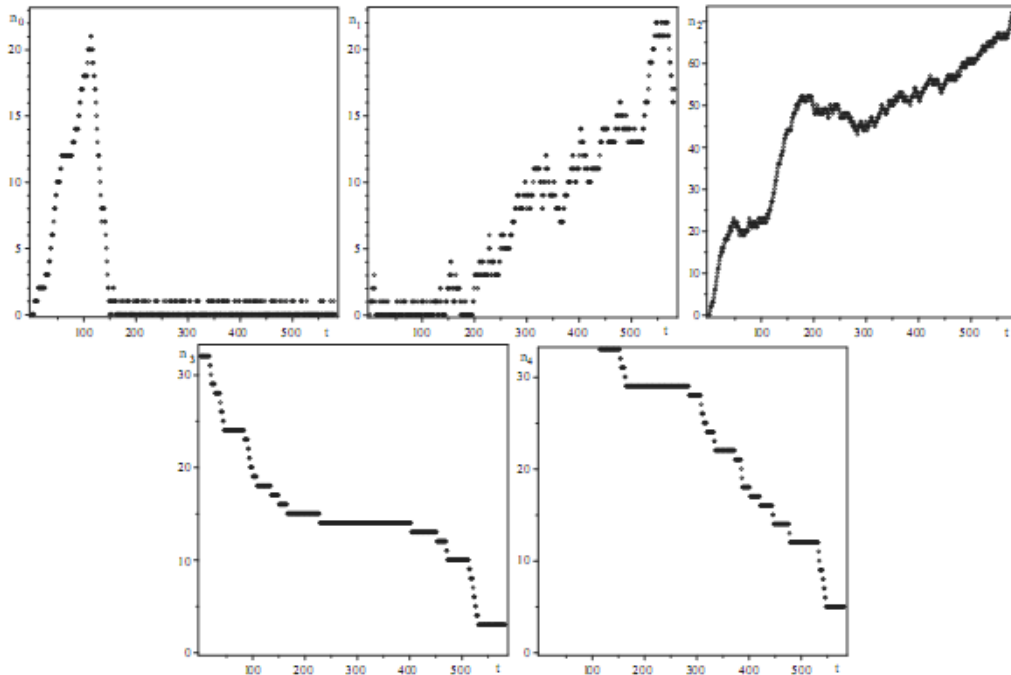


Рис.14. Показано изменение со временем численностей стратегий с определенной сложностью в обществе на разных этапах эволюции. Сложность 0 - $n_0(t)$, сложность 1 - $n_1(t)$, сложность 2 - $n_2(t)$, сложность 3 - $n_3(t)$ и сложность 4 - $n_4(t)$

Средняя глубина памяти и средняя сложность общества спадают со временем (рис.15).

Интересно отметить, что изменение агрессивности общества (рис.16) качественно сохраняется как и при эволюции общества без источника новых стратегий. Эта зависимость имеет максимум на начальных этапах эволюции и монотонное (возможно линейное) спадание до 0 перед выходом в стационар. Видна качественная зависимость числа очков в среднем на один ход и агрессивности. Универсальная связь (1) между агрессивностью и числом очков на ход стратегии хорошо выполняется и в этом случае.

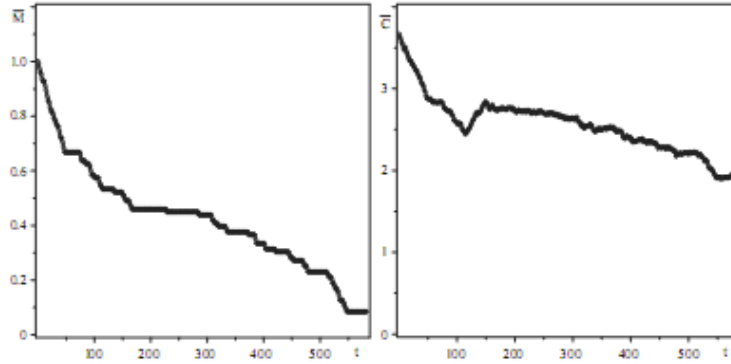


Рис.15. Слева средняя глубина памяти общества от времени. Справа средняя сложность в обществе на разных этапах эволюции

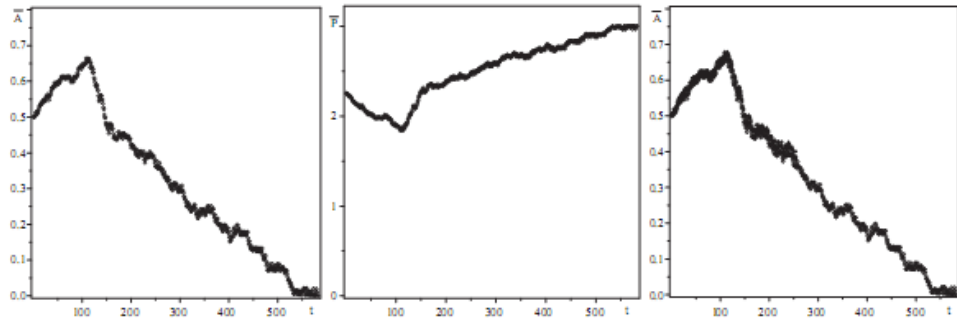


Рис.16. Слева средняя агрессивность общества на разных этапах эволюции. В центре число очков на ход стратегии в среднем на разных этапах эволюции. Справа сравнение средней агрессивности с агрессивностью, построенной согласно соотношению (1)

Доминирование стратегий с максимальной глубиной памяти и максимальной сложностью перемежается периодами доминирования стратегий с нулевой глубиной памяти и меньшей сложностью (рис.17). При приближении к стационару доминируют стратегии с максимально возможной глубиной памяти и с близкой к максимуму сложностью. Периоды доминирования стратегий минимальной сложности 0 отсутствуют, а единственный случай доминирования стратегии сложности 1 на последнем этапе скорее исключение из правил.

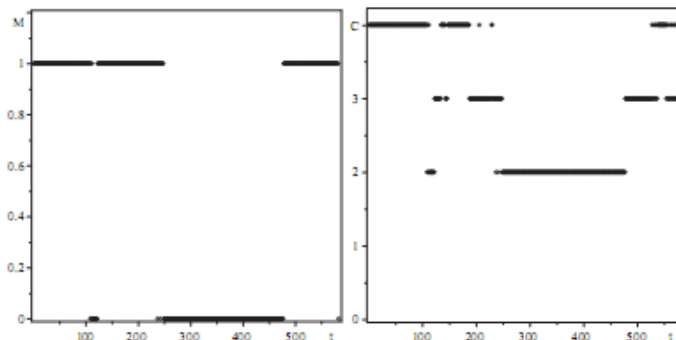


Рис.17. Слева глубина памяти победившей стратегии, справа сложность

6. Выводы

При наличии источников и стоков стратегий глубина памяти и сложность стратегий - эволюционно выгодные свойства. Максимум численности стратегий в задачах с источником достигается на максимальной сложности вбрасываемых стратегий. Это справедливо как при наличии источников, так и при их отсутствии. Во всех случаях агрессивность стратегий падает и на стационарной стадии достигает нулевого значения. Возможно, это универсальное свойство можно использовать в качестве основного принципа отбора стратегий при эволюции. Существует универсальная связь (1) между агрессивностью и количеством очков на ход стратегии. Чем выше агрессивность, тем меньше очков эволюционных преимуществ на ход стратегии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ch. Darwin. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life // John Murray, London. – 1859. - 502pp.
2. Weibull J. W. Evolutionary game theory. – MIT press, 1997.
3. Nowak M. A. Evolutionary dynamics. – Harvard University Press, 2006.
4. Claussen J. C. Discrete stochastic processes, replicator and Fokker-Planck equations of coevolutionary dynamics in finite and infinite populations //arXiv preprint arXiv:0803.2443. – 2008.
5. Traulsen A., Claussen J. C., Hauert C. Coevolutionary dynamics: from finite to infinite populations //Ph. review letters. – 2005. – Т. 95. – №. 23. – С. 238701.
6. Nowak M. A., May R. M. The spatial dilemmas of evolution //International Journal of bifurcation and chaos. – 1993. – Т. 3. – №. 01. – С. 35-78.
7. Nowak M., Sigmund K. A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner's Dilemma game //Nature. – 1993. – Т. 364. – №. 6432. – С. 56-58.
8. Brandt H., Hauert C., Sigmund K. Punishment and reputation in spatial public goods games //Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences. – 2003. – Т. 270. – №. 1519. – С. 1099-1104.
9. Nowak M. A., May R. M. Evolutionary games and spatial chaos //Nature. – 1992. – Т. 359. – №. 6398. – С. 826-829.
10. Szabó G., Hauert C. Phase transitions and volunteering in spatial public goods games //Physical review letters. – 2002. – Т. 89. – №. 11. – С. 118101.
11. Perc M. Chaos promotes cooperation in the spatial prisoner's dilemma game //EPL (Europhysics Letters). – 2006. – Т. 75. – №. 6. – С. 841.
12. Perc M., Szolnoki A., Szabó G. Restricted connections among distinguished players support cooperation //Ph. Review E. – 2008. – Т. 78. – №. 6. – С. 066101.
13. Szabó G., Fath G. Evolutionary games on graphs //Physics reports. – 2007. – Т. 446. – №. 4. – С. 97-216.
14. Ohtsuki H. et al. A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social networks //Nature. – 2006. – Т. 441. – №. 7092. – С. 502-505.
15. Perc M. Evolution of cooperation on scale-free networks subject to error and attack //New Journal of Physics. – 2009. – Т. 11. – №. 3. – С. 033027.
16. Poncela J., Gómez-Gardenes J., Moreno Y. Cooperation in scale-free networks with limited associative capacities //Ph. Rev. – 2011. – Т. 83. – №. 5. – С. 057101.

17. Gómez-Gardeñes J. et al. Evolutionary games defined at the network mesoscale: The public goods game //Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2011. – Т. 21. – №. 1. – С. 016113.
18. Yang H. X., Wu Z. X., Du W. B. Evolutionary games on scale-free networks with tunable degree distribution //EPL. – 2012. – Т. 99. – №. 1. – С. 10006.
19. Nowak M., Highfield R. Supercooperators: Altruism, evolution, and why we need each other to succeed. – Simon and Schuster, 2011.
20. Szabó G., Hauert C. Evolutionary prisoner's dilemma games with voluntary participation //Physical Review E. – 2002. – Т. 66. – №. 6. – С. 062903.
21. Hauert C. et al. Via freedom to coercion: the emergence of costly punishment //science. – 2007. – Т. 316. – №. 5833. – С. 1905-1907.
22. Traulsen A., Claussen J. C. Similarity-based cooperation and spatial segregation //Physical Review E. – 2004. – Т. 70. – №. 4. – С. 046128.
23. Szolnoki A., Szabó G. Cooperation enhanced by inhomogeneous activity of teaching for evolutionary Prisoner's Dilemma games //EPL (Europhysics Letters). – 2007. – Т. 77. – №. 3. – С. 30004.
24. Perc M., Szolnoki A. Social diversity and promotion of cooperation in the spatial prisoner's dilemma game //Phys. Review E. – 2008. – Т. 77. – №. 1. – С. 011904.
25. Yang H. X. et al. Diversity-optimized cooperation on complex networks //Physical Review E. – 2009. – Т. 79. – №. 5. – С. 056107.
26. Pacheco J. M., Traulsen A., Nowak M. A. Coevolution of strategy and structure in complex networks with dynamical linking //Physical review letters. – 2006. – Т. 97. – №. 25. – С. 258103.
27. Ohtsuki H., Nowak M. A., Pacheco J. M. Breaking the symmetry between interaction and replacement in evolutionary dynamics on graphs //Physical review letters. – 2007. – Т. 98. – №. 10. – С. 108106.
28. Meloni S. et al. Effects of mobility in a population of prisoner's dilemma players //Physical Review E. – 2009. – Т. 79. – №. 6. – С. 067101.
29. Jiang L. L. et al. Role of adaptive migration in promoting cooperation in spatial games //Physical Review E. – 2010. – Т. 81. – №. 3. – С. 036108.
30. Fu F., Nowak M. A. Global migration can lead to stronger spatial selection than local migration //Jour. of stat. physics. – 2013. – Т. 151. – №. 3-4. – С. 637-653.
31. Fu F. et al. Evolution of in-group favoritism //Sc. reports. – 2012. – Т. 2. – С. 460.
32. Wang Z., Szolnoki A., Perc M. Optimal interdependence between networks for the evolution of cooperation //Scientific reports. – 2013. – Т. 3.
33. В.М.Куклин, А.В.Приймак, В.В.Яновский. Влияние памяти на эволюцию популяций // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». - Т. 29. – 2016. - С.41-66.
34. Захаров В. Е. Колмогоровские спектры в задачах слабой турбулентности //Основы физики плазмы. – 1984. – Т. 2. – С. 48-79.
35. Кадомцев Б. Б., Конторович В. М. Теория турбулентности в гидродинамике и плазме //Иzv. вузов. Радиофизика. – 1974. – Т. 17. – С. 509-540.
36. Axelrod R. The evolution of cooperation. – 1984.

CONTENTS

▪ S. O. Aksonchikov, I. V. Yemelianova, K. D. Markova, I. I. Svatovskiy	5
Regression analysis of cyber attacks development trends	
▪ B. O. Bliznyuk, L. V. Vasilyeva, I. D. Strelnikov, D. S. Tkachuk	14
Modern methods of natural language processing	
G. Bulanchuk, A. Ostapenko	27
Modeling of the viscous fluid flow around rotating circular cylinders with the lattice Boltzmann method at moderate Reynolds numbers	
▪ A. I. Vaisburd, T. G. Vikhtynska, K. E. Nemchenko	38
The inverse Radon transform that does not contain the singular filtration	
▪ L. V. Vasilieva, A. V. Perederin	44
Computer program for testing workers in fire and electrical safety	
▪ A. V. Kirichok, O. V. Mishyn.	50
The qualitative models of superradiance in the integrated environments	
▪ B. V. Parshentsev, E. G. Tolstoluzhskaya	61
Parallel construction of decision trees	
▪ A. V. Pryimak, V. V. Yanovsky.	68
The evolution of strategies communities in the presence of sources	
CONTENTS	85

Наукове видання

Вісник Харківського національного університету

Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології.
Автоматизовані системи управління»

Випуск 36

Збірник наукових праць

Українською, російською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання О. О. Афанасьєва

Підписано до друку 25.12.2017 р.
Формат 70×108/16. Папір офсетний. Друк ризограф.
Ум. друк. арк. – 6,4.
Обл.– вид. арк. – 5,5.
Наклад 100 пр. Зам. №

61022, м. Харків, майдан Свободи, 4
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна.
Видавництво

Надруковано: ХНУ імені В. Н. Каразіна
61022 м. Харків, майдан Свободи, 4,
тел.: 362-01-52
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3367 від 13.01.09