

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАДИНА ГЕТЬМАНА**

**Навчально-науковий інститут
«Інститут інформаційних технологій в економіці»**

Кафедра системного аналізу та кібербезпеки

ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНА ПРОГРАМА «СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ»

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Спеціальність 124 «Системний аналіз»

Форма навчання: очна(денна)

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**на тему: Динаміка розповсюдження епідемій: моделі та сценарії в
моделюванні складних систем**

здобувача Петриченко Анни Вячеславівни

(підпис)

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. Гладка Ю.А.

(підпис)

**Робота допущена до захисту перед екзаменаційною
комісією з атестації здобувачів вищої освіти (ЕК)**

Завідувач кафедри: д.ф.-м.н., проф. Джалладова І.А.

(підпис)

Київ 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИНА ГЕТЬМАНА**

Навчально-науковий інститут «Інститут інформаційних технологій в економіці»

Кафедра системного аналізу та кібербезпеки

**ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНА ПРОГРАМА «СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ»
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 124 «СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ»**

ПОГОДЖЕНО

Керівник проєктної групи (гарант)
освітньо-професійної програми

_____ Галіцин В.К.
(підпис)

_____ 20__ р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри системного аналізу
та кібербезпеки

_____ Джалладова І.А.
(підпис)

_____ 20__ р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

**здобувачу вищої освіти Петриченко Анні Вячеславівні
денної форми навчання**

на підготовку кваліфікаційної бакалаврської роботи

**на тему: «Динаміка розповсюдження епідемій: моделі та сценарії в
моделюванні складних систем»**

Тему затверджено наказом ректора Університету від «__» _____ 20__ р. № _____

Кваліфікаційна бакалаврська робота виконується на матеріалах зарубіжних та вітчизняних наукових джерел, зокрема навчальних посібників, статей, наукових журналів, сучасних інтернет джерел та статистичних даних.

План кваліфікаційної бакалаврської роботи

Розділ 1	Епідемії, моделі та їх аналіз.
Розділ 2	Методологія моделювання та аналізу епідемій.
Розділ 3	Моделювання прогнозу поширення епідемії COVID-19 та аналіз стратегії боротьби з епідеміями.
Об'єкт дослідження	Динаміка розповсюдження інфекційних захворювань.
Предмет дослідження	Розповсюдження COVID-19 в обраному регіоні та комп'ютерне моделювання епідеміологічної динаміки.
Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи	Дослідити динаміку розповсюдження епідемій за допомогою моделювання складних систем, реалізувати модель SIRD у програмному середовищі Python для дослідження поширення епідемії COVID-19 з урахуванням різних факторів.

Конкретні завдання, які здобувач повинен виконати для досягнення поставленої мети:

У розділі 1

Зібрати інформацію про наймасштабніші та найвідоміші епідемії, проаналізувати їх наслідки для суспільства. Дослідити та порівняти різні математичні моделі (SIR, SIRV, SEIR, SIRD) для вивчення епідемій, виявити ключові параметри.

У розділі 2

Обґрунтувати вибір моделі SIRD для дослідження COVID-19. Зібрати статистичні дані про COVID-19 та визначити початкові параметри для моделювання. Вибрати програмні інструменти для моделювання (Python, відповідні бібліотеки) та описати процес їх налаштування.

У розділі 3

Реалізувати модель SIRD в Python та перевірити її правильність. Використати модель для прогнозування епідемії в Умані. Порівняти та проаналізувати результати моделювання з статистичними даними. Застосувати модель до інших регіонів, проаналізувати результати. Проаналізувати ефективність різних стратегій боротьби з епідемією.

Завдання підготував

науковий керівник

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__р.

Завдання одержав

здобувач

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Динаміка розповсюдження епідемій: Моделі та Сценарії в Моделюванні Складних Систем» складається з переліка умовних позначень та скорочень, вступу, основної частини, що містить 3 розділи, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 57 сторінок. Робота містить 28 рисунків. Список використаних джерел включає 33 джерела.

Об'єктом дослідження є динаміка розповсюдження інфекційних захворювань.

Предметом дослідження є розповсюдження COVID-19 в обраному регіоні та комп'ютерне моделювання епідеміологічної динаміки.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи – дослідити динаміку розповсюдження епідемій за допомогою моделювання складних систем, реалізувати модель SIRD у програмному середовищі Python для дослідження поширення епідемії COVID-19 з урахуванням різних факторів.

В роботі проведено аналіз:

- наймасштабніших епідемій та їх наслідків для суспільства;
- математичних моделі для вивчення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань;
- апробації створеної моделі для різних регіонів та світу в цілому;
- порівняння різних стратегій боротьби з епідемією;

Здатність передбачати розповсюдження захворювань дозволить уникнути або зменшити економічні втрати, пов'язані зі спалахами епідемій, дозволить краще розподіляти ресурси для боротьби з ним

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена модель дослідження динаміки розповсюдження захворювання в популяції дозволить отримати більш точні та корисні прогнози у розвиток стратегій управління та контролю епідемій

Рік виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи 2024.

Рік захисту роботи 2024.

Ключові слова: математична модель, епідемії, динаміка розповсюдження, стратегії управління, модель SIRD, аналіз, реалізація, COVID-19.

ВІДГУК
на кваліфікаційну бакалаврську роботу
студентки Петриченко Анни Вячеславівни
групи ІА-401 на тему: "Динаміка розповсюдження епідемій: моделі та
сценарії в моделюванні складних систем"

Актуальність теми. В сучасному світі слова епідемія та пандемія — це часто вживаний термін. За допомогою вивчення характеру розповсюдження захворювань можна передбачити наслідки та вплив епідемій, запобігти швидкому поширенню, підготувати суспільство до всіх можливих сценаріїв. Саме дослідженню динаміки розповсюдження епідемій за допомогою моделювання складних систем, реалізації моделі SIRD у програмному середовищі Python для дослідження поширення епідемії COVID-19 з урахуванням різних факторів була присвячена ця робота.

Повнота розкриття теми. Зміст дипломної роботи відповідає темі. Усі питання розкриті повністю.

Теоретичною основою дослідження є сучасні джерела інформації, використання яких дозволило розкрити всі питання дипломної роботи в повному обсязі.

Практична значущість роботи: полягає у розробці ефективних стратегій контролю та запобігання поширенню епідемій у суспільстві.

Самостійність виконання роботи: студент показав здатність самостійно працювати з науково-технічною літературою, визначати вектор дослідження, знаходити та обробляти інформацію, роботу написано грамотною українською мовою, належно оформлено. Робота виконана на сучасному рівні.

Якість оформлення, загальна та спеціальна грамотність. Оформлення роботи відповідає всім вимогам, що висуваються до кваліфікаційних бакалаврських робіт в КНЕУ ім. В. Гетьмана.

Загальна оцінка роботи та висновок щодо рекомендації до захисту в ЕК: вважаю, що дипломна робота виконана на належному рівні, вона задовольняє усі вимоги до випускних кваліфікаційних робіт бакалавра і заслуговує на оцінку «відмінно», а її автор Петриченко Анна Вячеславівна присвоєння ступіня бакалавра зі спеціальності «Системний аналіз».

Керівник дипломної роботи
доцент кафедри системного аналізу
та кібербезпеки ПТЕ
Гладка Ю. А.
7 червня 2024 р.



РЕЦЕНЗІЯ
на кваліфікаційну бакалаврську роботу
здобувача вищої освіти
студентки Петриченко Анни Вячеславівни ІА-401
на тему: « Динаміка розповсюдження епідемій: моделі та
сценарії в моделюванні складних систем»

Актуальність теми. Дипломна робота на тему "Динаміка розповсюдження епідемій: моделі та сценарії в моделюванні складних систем" є надзвичайно актуальною, особливо в умовах сучасних глобальних викликів. Протягом останніх десятиліть світ зіткнувся з численними епідеміями та пандеміями, такими як SARS, MERS, грип H1N1, Ебола, а найновішою і найбільш значущою стала пандемія COVID-19. Ці події продемонстрували вразливість глобальної спільноти до нових інфекційних загроз та підкреслили необхідність ефективних інструментів для моделювання і прогнозування поширення інфекцій. Моделювання динаміки епідемій є ключовим інструментом для розуміння та контролю поширення інфекційних захворювань, що має велике значення для суспільного здоров'я.

Значення результатів для науки та практики.

Практичне значення роботи. Здатність передбачати розповсюдження захворювань дозволить уникнути або зменшити економічні втрати, пов'язані зі спалахами епідемій, дозволить краще розподіляти ресурси для боротьби з ними.

Результати здійснених у дипломному проєкті досліджень можуть бути використані для: розробці ефективних стратегій контролю та запобігання поширенню епідемій у суспільстві.

Зауваження до змісту та оформлення роботи.

Робота оформлена згідно з вимогами до наукових робіт. Всі використані джерела коректно цитовані та включені в список літератури. Графіки, діаграми та інші ілюстративні матеріали виконані чітко та інформативно.

Висновки.

Тема роботи є актуальною, робота логічно структурована та відповідає високим вимогам, що пред'являються до наукових досліджень такого рівня. Автор продемонстрував високий рівень знань, навичок аналізу та моделювання, а також здатність до самостійного наукового дослідження.

Рекомендую оцінити роботу на «/відмінно/90» та присвоїти автору кваліфікацію «бакалавр» за спеціальністю 124 «Системний аналіз»

Рецензент:

доцент кафедри цифрової економіки
і системного аналізу, к.т.н., доцент,
Державний торговельно-економічний
університет
Геселева Н.В.



Зміст

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ЕПІДЕМІЇ, МОДЕЛІ ТА ЇХ АНАЛІЗ	6
1.1 Аналіз відомих епідемій та їх вплив на суспільство	6
1.2 Математичні моделі для вивчення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ЕПІДЕМІЙ ...	21
2.1 Вибір та обґрунтування математичної моделі для дослідження динаміки епідемії COVID-19	21
2.2 Збір даних та ініціалізація параметрів моделі SIRD	23
2.3 Опис використаних інструментів для реалізації моделі SIRD	25
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУ ПОШИРЕННЯ ЕПІДЕМІЇ COVID-19 ТА АНАЛІЗ СТРАТЕГІЇ БОРОТЬБИ З ЕПІДЕМІЯМИ.....	30
3.1 Реалізація моделі SIRD в програмному середовищі Python	30
3.2 Моделювання початку епідемії COVID-19 в місті Умань.....	34
3.3 Порівняння отриманих результатів з реальними статистичними даними	39
3.4 Апробація моделі SIRD в інших регіонах	46
3.5.Порівняння різних стратегій боротьби з епідемією	50
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54
ДОДАТОК А.....	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

SIR — Susceptible-Infectious-Recovered

SIRV — Susceptible-Infectious-Recovered-Vaccinated

SIRD — Susceptible-Infectious-Recovered- Deceased

SIER — Susceptible-Infectious-Exposed -Recovered

ВСТУП

В сучасному світі слово епідемія та пандемія — це часто вживаний термін. Людство за ці тисячоліття пережило численну кількість епідемій та різноманітних захворювань. Глобальне потепління, мутація вірусів та бактерій, війни і соціальні потрясіння, зростання кількості населення та міграція, резистентність до антибіотиків — це численні фактори, що сприяють їхньому виникненню. "Хвороба Х" — це щось на кшталт напрямку роботи, щоб спонукати вчених протидіяти невідомим інфекційним загрозам. Тобто помічати нові та досліджувати старі інфекції, які можуть мутувати чи в інший спосіб стати потужнішими.

Covid-19 у цьому списку теж був — ще у 2018 році. Частково завдяки тому, що вчені готувалися, успішну вакцину проти коронавірусу вдалося розробити рекордними темпами - лише за 326 днів. Ще у розпал пандемії Covid-19 у світі лунали авторитетні голоси, які помітили, що часовий проміжок між новими пандеміями меншає, а тому не виключено, що через кілька років світ може спіткати нова смертоносна пандемія.

Актуальність теми, зумовлена аналізом динаміки розповсюджень епідемій, що дає знання та інформацію для боротьби та протидії майбутнім епідеміям. Саме за допомогою вивчення характеру розповсюдження захворювань можна передбачити наслідки та вплив епідемій, запобігти швидкому поширенню, підготувати суспільство до всіх можливих сценаріїв.

Успішна апробація моделі спонукала перевірити її дієвість на світі в цілому.

Мета роботи — дослідити динаміку розповсюдження епідемій за допомогою моделювання складних систем, розробити модель для дослідження поширення епідемії COVID-19 з урахуванням різних факторів, порівняти стратегії боротьби з епідеміями.

Мета роботи передбачає виконання ряду завдань. Проаналізувати наймасштабніші епідемії, що пережило людство, описати математичні моделі для

вивчення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань. Обрати та обґрунтувати математичну модель для дослідження динаміки епідемії COVID-19, зібрати дані та визначити параметри моделі SIRD, створити модель прогнозування динаміки поширення COVID-19 в місті Умань використовуючи програмне середовище Python. Для оцінки точності та ефективності моделі SIRD провести порівняння прогнозованих результатів з реальними статистичними даними, щодо динаміки епідемії COVID-19, взятими в уманському районному відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України", за період з березня по грудень 2020 року. Апробувати створену модель на інших регіонах.

РОЗДІЛ 1

ЕПІДЕМІЇ, МОДЕЛІ ТА ЇХ АНАЛІЗ

1.1 Аналіз відомих епідемій та їх вплив на суспільство

За свою історію людство пережило досить значну кількість пандемій, що охоплювали великі частини земної кулі та приносили великі втрати, забираючи життя мільйонів людей. Від "чорної смерті" до іспанського грипу від пандемії холери та різкого зростання пандемії ВІЛ/СНІДу до нашого сьогодення — життя після пандемії Covid-19. Кожна з них була складним та здавалося б не можливим викликом, який врешті-решт, завдяки намаганням побороти невидимого ворога, стимулював прогрес. Ці епідемії залишили довготривалий вплив на політику охорони здоров'я, соціальні структури та світову економіку

У даному розділі розгляну найбільш смертоносні із них.

Чума – це зоонозна природно-осередкова бактеріальна інфекційна хвороба, яка характеризується гарячкою, тяжкою інтоксикацією, геморагічним синдромом ураження легень, лімфатичної системи з утворенням бубонів, нерідким септичним перебігом і високою летальністю. Смертність при бубонній формі чуми сягала 95%, при легеневій – 98–99%. [3]

На діаграмі візуалізовано три наймасштабні пандемії, що забрали мільйони життів у різні періоди. (Рисунок 1.1);



Рисунок 1.1 — Статистика смертей від пандемії чуми

Джерело: розроблено автором за даними [2]

Чума Антоніна (також відома як Чума Галена) — пандемія невідомої інфекційної хвороби, яка вирувала упродовж 165—180 років на теренах Римської імперії та країнах Близького Сходу та забрала життя у 5 мільйонів жителів. Науковці достеменно не знають, яка хвороба спричинила цю ймовірно першу пандемію в історії людства, хоча припускають, що це могла бути віспа чи кір. [4]

Чума Юстиніана (англ. plague of Justinian) — перша за переліком пандемія чуми, що розпочалася 541 року у Східній Римській імперії за часів правління імператора Юстиніана I, яка й названа його ім'ям. Згідно з літописом, імператор також перехворів нею у 543 році. Джерела свідчать, що пандемія забрала життя четвертої частини Східного Середземномор'я, тобто близько 25 мільйонів. У розпал епідемії в Константинополі щодня вмирало 5000 людей. [5]

«Чорна смерть» (Black death; лат. Atra mors) — відома як велика чума, яка почалася зі Східного Китаю та прокотилася по Азії, Європі, частині Африки у середині XIV сторіччя (1346—1353 роки). Походження хвороби пов'язують з

бактерією *Yersinia pestis*, яка передається від гризунів до людей через вірусний вектор - комара або блоху.

Точних цифр як про загальну чисельність населення у Середньовіччі, так і щодо смертності від «Чорної смерті» і наступних епідемій, не існує, хоча збереглися багато кількісних оцінок сучасників стосовно втрат окремих регіонів і міст, що дозволяє оцінити приблизну кількість жертв епідемії, яка оцінюється від 75 до 200 млн осіб.

Дана пандемія вважається переломним моментом в історії середньовічної Європи. В той час чума була не новою хворобою для Європи, проте її масштаб був шокуючим—це близько 25 мільйонів людей, або третини населення континенту. (Рисунок 1.2); У той час медицина була не достатньо розвиненою та базувалася на творах античних авторів, а лікарі часто не оглядали хворих. Не допомагали ані лікарі, ані ліки.[5] Економічні та соціальні наслідки чуми були величезними, спричинивши нестачу робочої сили, інфляцію та соціальні потрясіння.



Рисунок 1. 2 — Оцінка смертності населення в наслідок чуми в період з 1347 по 1351 роки

Джерело: розроблено автором за даними [1]

У Європі найбільше постраждали великі портові міста та мегаполіси. У 1346 році чума була занесена до Криму та поширилася південно-західною Європою

після прибуття італійських галер до Сицилії, Генуї, Венеції та Марселя на початку 1347 року. Вважається, що Венеція, Флоренція та Сієна втратили до двох третин свого населення. під час піку епідемії, тоді як Лондон, який постраждав у 1348 році, втратив щонайменше половину свого населення. Потім чума поширилася західною Європою та прибула до Німеччини та Скандинавії в 1348 році, а до 1351 року поширилися вздовж балтійського узбережжя, і через Польщу дісталась України.[5] Вона особливо лютувала у Переяславі, де, за переписами, знищила все населення. Деякі райони Європи десятиліттями залишалися недоторканими чумою. Наприклад, чума не прибула до Ісландії до 1402 року, однак вона охопила острів із руйнівним ефектом, спричинивши падіння населення зі 120 000 до 40 000 протягом двох років.[1]

Легенда про монахів з монастиря Евершем стала відомою як "Легенда про живих монахів". Згідно з цією легендою, коли Чорна смерть досягла Англії у середині XIV століття, всі монахи монастиря обіцяли, що вони не залишать своїх посад і не будуть покидати монастир ні за яких обставин.

Під час пандемії чуми, монахи Евершема продовжували виконувати свої релігійні обов'язки та надавали допомогу хворим. За легендою, вони пережили епідемію без зазначених випадків смерті серед монахів монастиря.

Грип (англ. influenza, фр. grippe) — гостра вірусна інфекційна хвороба з періодичним епідемічним чи навіть пандемічним поширенням. Іспанський грип та COVID-19 - це дві різні пандемії, які відбулися в проміжку 100 років та вплинули на світ в цілому.

Іспанський грип - це найвідоміша пандемія грипу в історії, що сколихнула світ у 1918-1919 роках. Офіційно, цей вірус був відомий як грип типу А (H1N1). Однак, згідно з новітніми дослідженнями, ймовірно, що він походить від птахів та пристосувався для передачі людині. Мікроскопічний вбивця за чотири місяці облетів усю земну кулю, інфікував 500 мільйонів людей, що становило 33% всього населення світу, та забравши життя від 50 до 100 мільйонів людей. Особливість його полягала в тому, що він вражав молодих та здорових людей, віком від 20 до 40

років. Смертність від грипу перевищила втрати на всіх фронтах Першої світової війни.[11]

Через іспанку багато людей померли від пневмонії та інших респіраторних захворювань. Деякі люди померли в той же день, коли захворіли.

Свою назву смертоносний грип отримав завдяки газетам Іспанії, яка була нейтральною у Першій світовій війні, та активно поширювала інформацію на шпальтах газет про нову хворобу. (Рисунок 1.3);[12]



Рисунок 1. 3 — Вирізка з газети Мадриду за 28.03.1918 [12]

Оскільки Іспанський грип вирував у роки Першої світової війни, то обидві ці події взаємодіяли між собою, впливаючи на подальший хід історії.

Умови Першої світової війни, такі як масові зібрання військових та цивільних населення, недостатня санітарія та навантажені медичні системи, сприяли швидкому поширенню Іспанського грипу. Солдати, що брали участь у війні, поширили вірус на різні континенти, що було причиною глобальної пандемії.

Також грип вплинув і на перебіг війни, ослабивши деякі армії та нації. Наприклад, вірус спричинив значні втрати серед військових сил Центральних держав, таких як Німеччина та Австро-Угорщина.[10] Крім того, пандемія

викликала політичні наслідки у різних країнах, сприяючи, зокрема, поширенню більш демократичних ідеалів.

Іспанський грип також стимулював медичні дослідження та покращення медичної практики. Він підкреслив важливість глобального співробітництва у боротьбі зі захворюваннями та підготовці до масштабних медичних криз.

Здавалося б 21 століття, розвинена медицина, охорона здоров'я та різноманітні технології, але ніхто не очікував, що світ зможе охопити нова велика та смертоносна епідемія. COVID-19 — це офіційна назва коронавірусної хвороби, яка викликається коронавірусом SARS-CoV-2, який раніше не був виявлений у людей. У всьому світі зареєстровано понад 680 мільйонів підтверджених випадків, і хвороба забрала понад 6,8 мільйонів життів. (Рисунок 1.4) та (Рисунок 1.5);

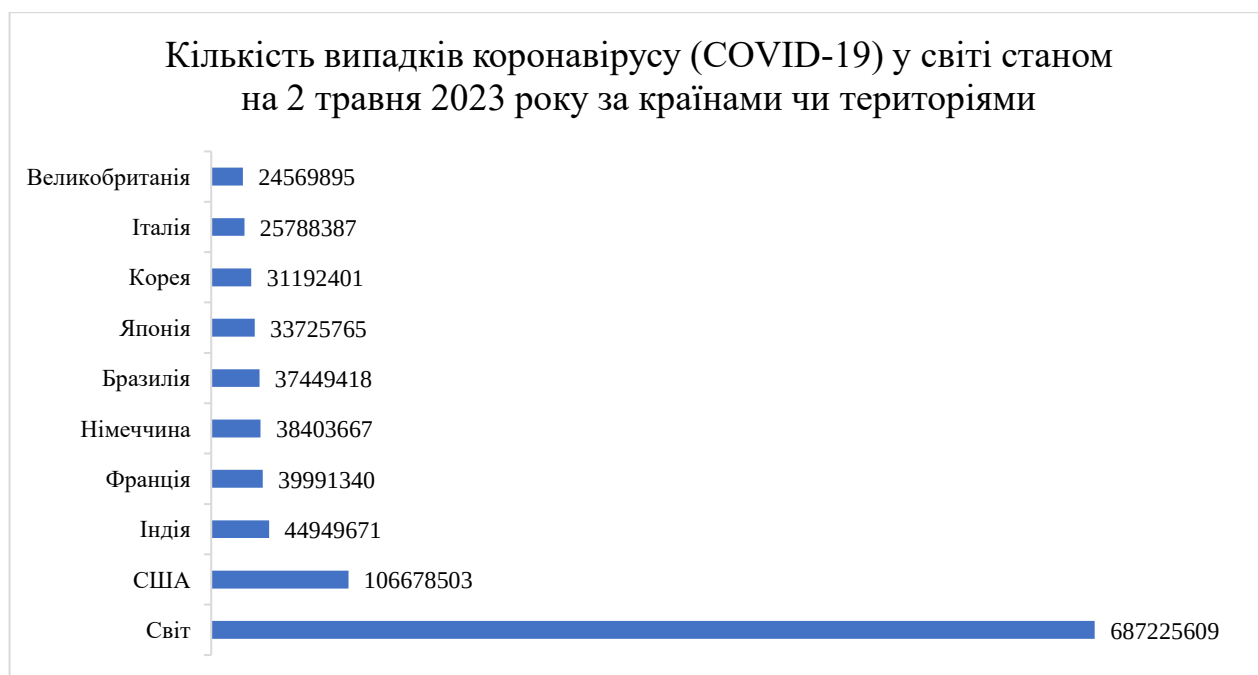


Рисунок 1.4 – Кількість випадків коронавірусу (COVID-19) у світі станом на 2 травня 2023 року за країнами чи територіями

Джерело розроблено автором за даними [8]



Рисунок 1.5 — Кількість смертей від нового коронавірусу (COVID-19) у всьому світі станом на 2 травня 2023 року за країнами та територіями.

Джерело: розроблено автором за даними [12]

Пандемія поставила системи охорони здоров'я під серйозний тиск, але регулятори схвалили безпечні методи лікування, а країни успішно впровадили програми вакцинації. Незважаючи на те, що COVID-19 все ще поширюється у всьому світі, кількість нових випадків вірусу значно зменшилася з початку 2023 року. Через величезну кількість людей, які вже інфіковані, і високий рівень поширеності вакцини у багатьох країнах COVID-19 не становить такої небезпеки, як це було з 2020 по 2022 рік. Багато країн скасували всі обмеження, які були введені для запобігання поширенню хвороби, і багато країн більше не точний спосіб реєстрації нових випадків.

В останні роки технології та інновації відіграють все більшу роль у реагуванні на епідемії. Аналітика даних і штучний інтелект використовуються для прогнозування і стримування спалахів, що дозволяє медичним працівникам реагувати швидше і ефективніше. Розробка вакцин і противірусної терапії також має вирішальне значення для профілактики і лікування спалахів, як це видно на приклад і нещодавньої розробки вакцини проти COVID-19. Нарешті, державно-

приватне партнерство відіграє важливу роль у фінансуванні та реалізації ініціатив з реагування на пандемію, забезпечуючи швидку розробку та поширення нових технологій і заходів.

Можна зробити висновок, що епідемії та пандемії мають значний вплив на людство та залишили після себе великі наслідки. З кожною наступною епідемією людство стикалося все з складнішими випробуваннями та боротьбою з новими невідомими хворобами. В наш час епідемії також завдають серйозних наслідків на всі сфери життя. Від пандемій страждає всесвітня економіка, соціальні структури та населення. Фактори, що сприяють поширенню епідемій та боротьбі з ними, з кожним разом змінюються, тож технології та інновації відіграють все більш важливу роль у боротьбі з епідеміями. Оскільки ми продовжуємо стикатися з новими і новітніми інфекційними захворюваннями, важливо вчитися на минулих спалахах і інвестувати в розробку нових інструментів і стратегій для їх профілактики та контролю.

1.2 Математичні моделі для вивчення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань

В останні роки неймовірні зусилля в усьому світі прискорили розвиток глобальних мереж епіднадзора для реагування на нові та повторювані пандемії інфекційних захворювань. Вчені з таких галузей, як медицина, молекулярна біологія, інформатика та прикладна математика, зібралися разом, щоб швидко оцінити потенційні надзвичайні ситуації. Для досягнення цієї мети математичні моделі відіграють важливу роль у зусиллях щодо прогнозування, оцінки та контролю потенційних спалахів. Щоб краще зрозуміти та змодельовати динаміку інфекції, слід проаналізувати та поглиблено вивчити вплив багатьох змінних, від рівня мікрохазяїн-патоген до взаємодій хазяїн-хазяїн, а також

екологічні, соціальні, економічні та демографічні фактори, поширені в усьому світі.

Компартментні моделі є основою моделювання, яку часто застосовують для математичного моделювання інфекційних захворювань.

Модель SIR є, мабуть, першою, що спадає на думку, коли йдеться про поширення інфекційних захворювань. Вона була представлена Кермаком і Маккендріком у 1927 році для опису еволюції відносних пропорцій трьох непересічних класів, які змінюються з часом t . [14] Ця математична модель описує, як хвороба поширюється серед населення. Модель SIR моделює динаміку поширення хвороби, враховуючи, що рух людей із вразливого до інфікованого стану та з інфікованого стану до «стану одужання» визначається деякими константами. Ці константи є фундаментом, на якому будується модель SIR. Порядок літер зазвичай показує схеми потоків між відділеннями; наприклад, SIES означає чутливий, інфекційний, підданий впливу та знову чутливий. Моделі найчастіше виконуються зі звичайними диференціальними рівняннями (які є детермінованими), але також можуть використовуватися зі стохастичною (випадковою) структурою, яка є більш реалістичною, але набагато складнішою для аналізу. Кожне рівняння описує індивідуумів у різному стані: чутливі (S), інфіковані (I) та резистентні (R). [16]



Рисунок 1. 6 — Схема моделі SIR

Джерело: розроблено автором за даними [15]

У правій частині рівняння є один або два члени двох видів: джерела (додатні члени) і поглиначі (від’ємні члени).

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\beta IS}{N}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta IS}{N} - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (1.1),$$

$de ds/dt$ — це швидкість зміни чутливості з часом;

dI/dt — швидкість зміни інфікованих з часом;

dR/dt — швидкість зміни одужавших з часом;

S — кількість вразливих осіб до вірусу;

N — кількість населення;

I — кількість інфікованих;

R — кількість одужавших;

β — швидкість інфікування;

γ — швидкість одужання.[16]

Дане рівняння стверджує, що кількість вразливих людей до вірусу з часом зменшиться на основі рівня контактів β , кількості вразливих, кількості інфікованих і загальної кількості населення (N). В рівнянні можемо бачити наявність від'ємного знаку, він дає розуміння, яка частка людей буде втрачена з категорії вразливих. Частка людей, які втрачаються з категорії вразливих, буде додана до категорії інфікованих, отже присутність додатнього знаку в рівнянні інфікованих. Варто зазначити, що «одужавші» люди належать до категорії інфікованих, а кількість «одужавших» людей базується на коефіцієнті одужання, помноженому на кількість інфікованих ($\gamma \cdot I$). Ті, що одужали, будуть втратою для інфікованих людей, тому необхідно відняти кількість одужавших із кількості інфікованих. Одужавші люди будуть додаватися до категорії одужавших осіб, отже, додатній знак для даної категорії. Помноживши обидві частини на dt , ми отримаємо :

$$dS = S_{new} - S_{old} = \frac{-\beta IS}{N} dt$$

$$dI = I_{new} - I_{old} = \left(\frac{\beta IS}{N} - \gamma I \right) dt$$

$$dR = R_{new} - R_{old} = \gamma I dt \quad (1.2),$$

де dS — швидкість зміни, тобто різниця між старим і новим сприйнятливими (S новий та S старий)

dI — швидкість зміни між старими та новими інфікованими;

dR — швидкість зміни між старими та новими одужавшими;

S — кількість вразливих осіб;

N — кількість населення;

I — кількість інфікованих;

R — кількість одужавших;

β — швидкість інфікування;

γ — швидкість одужання.[16]

Кількість вразливих до вірусу, інфікованих і тих хто одужав на наступний день, можна змодельовати, перемістивши старі числа вразливих, інфікованих і тих хто одужали на іншу сторону рівняння. Кількість інфікованих людей за день залежить від рівня контакту β та рівня одужання γ .

Розглянемо модель SIR. (Рисунок 1.7);

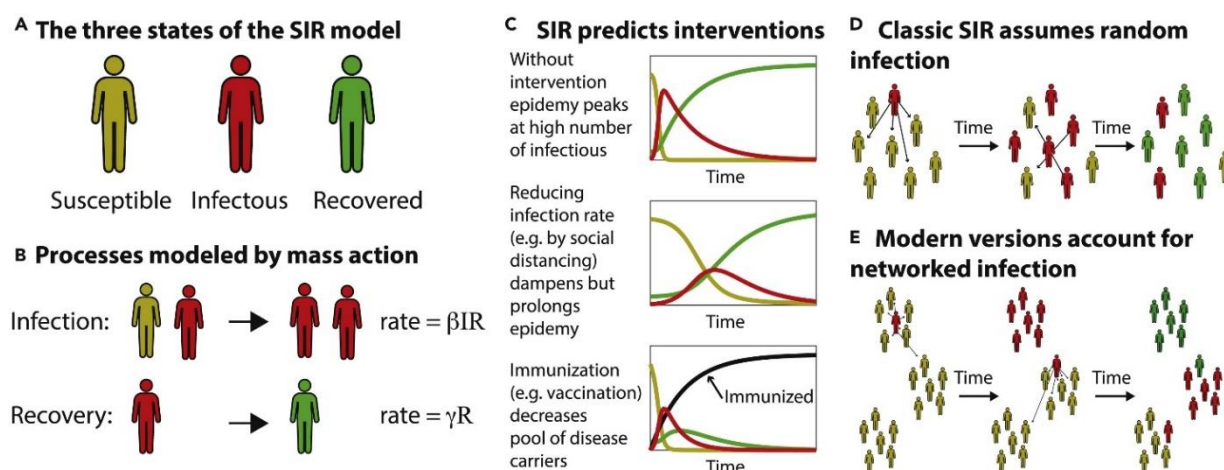


Рисунок 1. 7 — Модель SIR [16]

(А) У своїй класичній формі модель SIR розглядає осіб у трьох станах: вразливі, інфіковані та ті, що одужали.

(В) Перехід індивідів між станами, і ці переходи станів моделюють процеси зараження та одужання. Їх динаміка передбачає кінетику дії маси.

(С) Незважаючи на свою простоту, модель може бути використана для вивчення сценаріїв реального світу, таких як спалахи, і порівняння результатів втручання для уповільнення епідемії, таких як соціальне дистанціювання. Варіант моделі, що включає додатковий стан («імунізований») і новий процес імунізації,

який перетворює людей у новий стан, можна використовувати для прогнозування того, як кампанія вакцинації може сприяти зупинці поширення.

(D) Класичне припущення про масові дії передбачає, що зустрічі в популяції є випадковими.

(E) Розширення моделі SIR включає просторову структуру та інші уточнення для підвищення реалістичності моделі та точності прогнозів. [16]

Наступними можна розглянути моделі SIRV та SIRD. Дані моделі були отримані з моделі SIR, до них належать модель SEIR, модель SIRV, модель SIRD тощо.

Модель SEIR моделює захворювання на основі чотирьох категорій: S чутливі, E піддаються (люди, які контактують з інфікованими людьми та піддаються впливу інфекції), I заражені та одужавші. Багато хвороб мають латентну фазу, під час якої людина інфікована, але ще не заразна. Цю затримку між зараженням та інфекційним станом можна включити в модель SIR, додавши латентну/заражену популяцію, E, і дозволивши інфікованим (але ще не заразним) особам перейти з S на E та з E на I. Дану модель можна представити за допомогою такої системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta IS}{N} \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta IS}{N} - \sigma E \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I \quad (1.3),\end{aligned}$$

де $N=R+E+S+I$ — це загальна кількість населення;

dS/dt — це швидкість зміни чутливості з часом;

dE/dt — швидкість зміни кількості осіб, що знаходяться в інкубаційному періоді в момент часу;

dI/dt — швидкість зміни інфікованих з часом;

dR/dt — швидкість зміни одужавших з часом;

$S(t)$ — кількість вразливих до захворювання в момент часу t ;

$E(t)$ — кількість підданих впливу (латентних) в момент часу t ;

$I(t)$ — кількість інфікованих в момент часу t ;

$R(t)$ — кількість одужалих в момент часу t ;

β — швидкість передачі інфекції (контактна швидкість);

σ — швидкість переходу від стану підданого впливу до стану інфікованого;

γ — швидкість одужання (або швидкість вилучення з групи інфікованих). [17]

Оскільки латентність затримує початок періоду зараження особи, вторинне поширення від інфікованої особи відбудеться пізніше порівняно з моделлю SIR, яка не має латентності. Тому включення більш тривалого латентного періоду призведе до уповільнення початкового зростання спалаху. Однак, оскільки модель не включає смертність, базове репродуктивне число, $R_0 = \beta/\gamma$, не змінюється.[18]

Модель SIRV є епідемічною моделлю, яка представляє поширення інфекційних захворювань враховуючи чотири основні параметри : вразливі, інфіковані, одужавші та вакциновані.[19] Вона є розширеною моделлю SIR, оскільки кількісно враховує вплив кампаній вакцинації на динаміку поширення спалахів епідемії. Ця модель використовує таку систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta(t)IS}{N} - v(t)S \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta(t)IS}{N} - \gamma(t)I \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma(t)I \\ \frac{dV}{dt} &= v(t)S \quad (I. 4),\end{aligned}$$

де β, γ, v це показники інфікування, одужання та вакцинації;

dS/dt — це швидкість зміни чутливості з часом;

dI/dt — швидкість зміни інфікованих з часом;

dR/dt — швидкість зміни одужавших з часом;

dV/dt — швидкість зміни кількості вакцинованих осіб з часом;

$S(t)$ — кількість вразливих до захворювання в момент часу t ;

$I(t)$ — кількість інфікованих в момент часу t ;

$R(t)$ — кількість одужалих в момент часу t ;

$V(t)$ — кількість вакцинованих в момент часу t . [20]

Модель SIRD яка розшифровується як «вразливий-інфікований-одужав-померлий». Дана модель розрізняє «одужали» (мається на увазі конкретно осіб, які пережили хворобу і тепер мають імунітет) та померлих .[21] Модель SIRD має напіваналітичні рішення, засновані на методі чотирьох частин. (Рисунок 1.8);

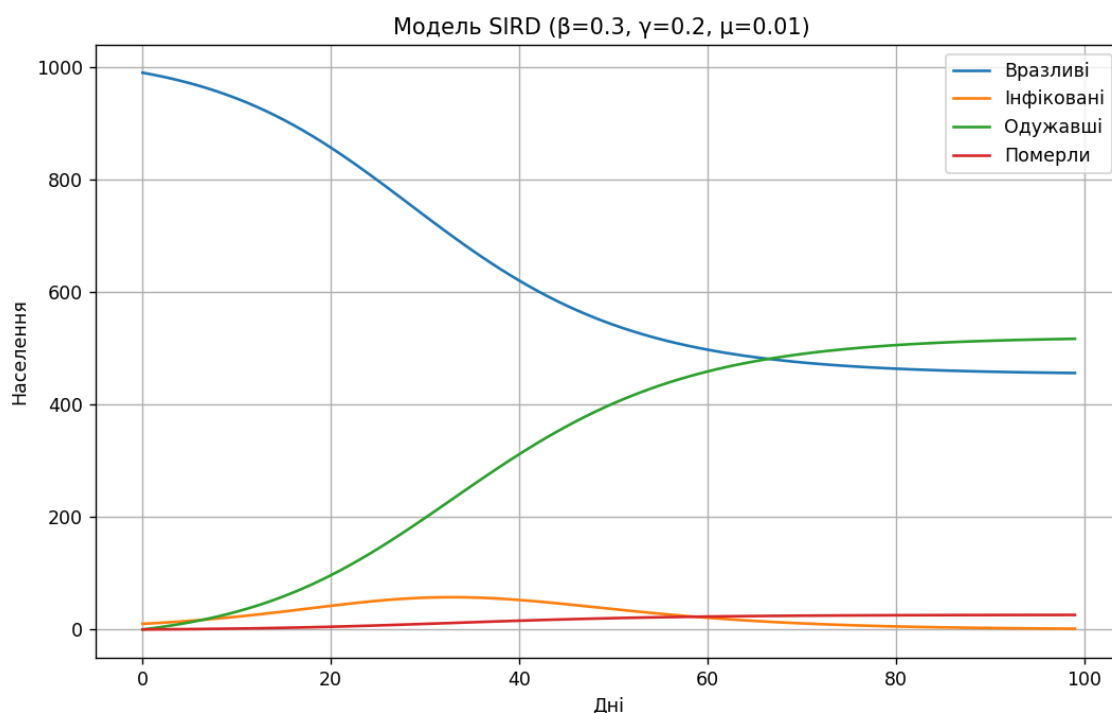


Рисунок 1.8 — Візуалізація моделі SIRD (β, γ, μ — це показники зараження, одужання та смертності.)

Джерело: розроблено автором

Висновки за Розділом 1

Проаналізувавши найвідоміші епідемії, такі як Чорна смерть, іспанський грип та COVID-19, можна зробити висновок, що вони мали значний вплив на суспільство, змінюючи демографічну структуру, економічні системи та соціальні норми. Проте, у більшості випадків, вони ставлять нові виклики перед медициною та сприяють її активному розвитку.

Математичні моделі є критичним інструментом для розуміння та передбачення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань. Вони допомагають у прогнозуванні спалахів, оцінці ефективності заходів з контролю та

управління епідеміями. Сучасні математичні моделі дають чіткий сценарій розвитку тої чи іншої епідемії враховуючи різноманітні фактори та параметри, такі як щільність населення, вакцинація населення, наявність інкубаційного періоду у захворювання, кількість контактів, здатність імунітету боротися із захворюванням, запровадження карантину тощо.

Даний розділ підкреслює важливість інтегрованого підходу до вивчення епідемій, який поєднує історичний аналіз, соціальні науки та математичне моделювання для ефективного реагування на спалахи інфекційних захворювань.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ЕПІДЕМІЙ

2.1 Вибір та обґрунтування математичної моделі для дослідження динаміки епідемії COVID-19

У розділі 1 подано огляд математичних моделей, що використовуються у прогнозуванні розвитку інфекційних захворювань. Для дослідження динаміки епідемії можна використовувати різноманітні математичні моделі які будуються на моделі SIR.

В даній роботі я хотіла б дослідити динаміку поширення епідемії COVID-19 на певній території, за визначених параметрів та факторів. За основу для побудови моделі, використаю модель SIRD «вразливий-інфекційний-одужав-померлий».

Модель SIRD (Susceptible-Infected-Recovered-Dead) є епідеміологічною моделлю, яка використовується для опису динаміки поширення інфекційних захворювань у популяції. Ця модель базується на поділі населення на чотири категорії, які більш детально розглянуті в наступному пункті.

Модель описує систему диференціальних рівнянь, яка враховує переходи між цими станами.

Система диференціальних рівнянь для моделі SIRD виглядає так:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\beta IS}{N}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta IS}{N} - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

$$\frac{dD}{dt} = \mu I \quad (2.1),$$

де $S(t) + I(t) + R(t) + D(t) = N$ загальна чисельність населення, яка визнана сталою;
 dS/dt — це швидкість зміни чутливості з часом;

dI/dt — швидкість зміни інфікованих з часом;

dR/dt — швидкість зміни одужавших з часом;

dD/dt — швидкість зміни кількості померлих осіб з часом;

$S(t)$ — кількість вразливих до захворювання в момент часу t ;

$I(t)$ — кількість інфікованих в момент часу t ;

$R(t)$ — кількість одужалих в момент часу t ;

$D(t)$ — кількість померлих в момент часу t ;

β — швидкість передачі інфекції (контактна швидкість);

γ — швидкість одужання (або швидкість вилучення з групи інфікованих);

μ — швидкість смертності (частка інфікованих, які помирають).[22]

Наведу роз'яснення до кожного з рівнянь:

Перше рівняння описує S , що є кількістю вразливих осіб, які зменшуються через інфікування. Швидкість зменшення продуктивності цього коефіцієнта інфікування, вразливих та інфікованих осіб, поділена на загальну чисельність населення.

У другому рівнянні коефіцієнт I — це кількість інфікованих осіб, що збільшується через нові випадки інфікування та зменшується через одужання і смертність.

Третє рівняння для коефіцієнта R — це кількість осіб які одужали, ускладнюється внаслідок одужання інфікованих.

І в четвертому рівнянні кількість померлих осіб збільшується внаслідок смертності серед інфікованих — це коефіцієнт D .

Отже дана модель дасть змогу прогнозувати розвиток епідемії, оцінювати наявність ресурсів для її контролю та приймати рішення щодо заходів протидії поширенню інфекції.

Я використаю дану модель для дослідження динаміки зростання захворюваності на COVID-19 в місті Умань у період з березня по грудень 2020 року.

Чому саме Умань? Обґрунтую вибір.

Умань- це місто розташоване в самому серці України, що могло вплинути на динаміку розповсюдження COVID-19, як і низка інших факторів. Давайте їх проаналізуємо детальніше:

1. *Географічне розташування.* Умань — місто у Черкаській області, розташоване на перетині кількох важливих автомобільних шляхів, що робить її зручною для транспортних маршрутів та сполучень з іншими регіонами країни. Таке розташування збільшує мобільність населення та полегшувало міжміське і міжрегіональне поширення вірусу.
2. *Паломництво.* Один з ключових факторів, який міг вплинути на динаміку COVID-19 в Умані, це щорічне паломництво хасидів. Під час святкування Рош га-Шана до Умані приїжджають тисячі паломників з різних країн. Велике скупчення людей на невеликій території підвищує ризик швидкого поширення вірусу. Наприклад, у 2020 році через пандемію було багато обмежень і заходів безпеки для контролю кількості паломників та дотримання санітарних норм.
3. *Туристичне місто.* Умань є важливим туристичним центром України завдяки своєму історичному, культурному та релігійному значенню. Місто приваблює туристів з різних куточків світу, пропонуючи різноманітні пам'ятки та заходи. Відвідувачі можуть насолодитися красою дендропарку "Софіївка", доторкнутися до духовних традицій хасидизму, відвідати музеї та історичні пам'ятки.

Таким чином, розташування Умані, її значення як релігійного центру, інфраструктура та заходи боротьби з пандемією мали комплексний вплив на динаміку поширення COVID-19. Велике скупчення людей, активний транспортний рух та медичні ресурси були ключовими факторами, які визначали рівень поширення вірусу в місті.

2.2 Збір даних та ініціалізація параметрів моделі SIRD

Давайте розглянемо визначення параметрів моделі SIRD та їх використання в контексті моделювання динаміки поширення COVID-19 в місті Умань.

Параметр S (Susceptible) — це кількість осіб, які є вразливими до зараження, крім тих, хто вже захворів або отримав імунітет. На початку епідемії параметр S

чисельно дорівнює кількості населення міста, країни тощо. В місті Умань кількість населення на час початку епідемії COVID-19 становив 82 603 особи. Даний параметр задається константою в моделі.

Параметр I (Infected) — це кількість осіб, які заразилися вірусом і можуть передавати його іншим. Він представляє кількість вже інфікованих осіб в місті, країні, тощо. Початкову кількість інфікованих осіб можна дізнатися із статистичних даних COVID-19 отриманих в Уманській міській санітарно-епідеміологічній станції. [32]

Параметр R (Recovered) — це кількість осіб, які одужали від хвороби та отримали імунітет до вірусу COVID-19. На початку епідемії параметр R дорівнює 0, адже для одужання потрібен час, в середньому період одужання від вірусу COVID-19 становить 14-21 день, це залежить від штаму вірусу, стану здоров'я та віку людини. Для міста Умань даний параметр я буду брати із статистичних даних.

Параметр D (Deceased) визначає кількість осіб, які померли від хвороби. На початку пандемії він дорівнює 0. Інформацію про кількість померлих осіб для подальшого аналізу візьмемо також із статистичних даних.

Окрім вже розглянутих параметрів, модель SIRD має також коефіцієнти β , γ , μ :

β (β) — це коефіцієнт контактів, який визначає швидкість поширення інфекції. Він залежить від рівня контактів між вразливими та інфікованими особами.

γ (γ) — це коефіцієнт одужання, що визначає швидкість, з якою інфіковані особи одужують та отримують імунітет.

μ (μ) коефіцієнт смертності, що визначає частку інфікованих осіб, які померли від хвороби.

В моделі SIRD для моделювання динаміки поширення COVID-19 в місті Умань параметри β, γ, μ потрібно встановити або оцінити. Щоб визначити дані коефіцієнти, потрібно проаналізувати епідеміологічні дані, літературні дані або звернутися до експертної оцінки.

Додатковими параметрами для опису моделі в даному дослідженні є параметр N — кількість населення міста де проводиться аналіз динаміки зараження епідемією. А також параметр t або $days$ — період або кількість днів під час яких проводиться моделювання та аналіз поширення епідемії.

Після встановлення всіх цих параметрів та ефективності різних громадських заходів для контролю захворювання в місті Умань, можна використовувати модель SIRD для прогнозування динаміки поширення COVID-19.

2.3 Опис використаних інструментів для реалізації моделі SIRD

Для моделювання складної системи SIRD в даній роботі я буду використовувати мову програмування Python та її бібліотеки для математичного аналізу, а також PyQ6 для створення інтерфейсу.

Головним інструментом для створення та реалізації моделі SIRD в даній роботі є мова програмування Python. Це високорівнева мова, яка дозволяє легко реалізовувати складні алгоритми та обробляти дані.[23] У цьому дослідженні Python є середовищем для аналізу динаміки поширення епідемії та використовується для визначення моделі, обробки введених даних, взаємодії з графічним інтерфейсом користувача та візуалізації результатів.

Однією з використаних в моделюванні бібліотек є NumPy. Вона вважається основою для наукових бібліотек даних, таких як Torch, OpenCV, XGBoost, SciKit-Learn, Pandas і SciPy, і забезпечує реалізацію структури даних під назвою N-Dimensional array.[24]

Ця платформа містить багатовимірні об'єкти в масивах і пакет із інструментами інтеграції для впровадження Python. Простіше кажучи, NumPy — це суміш C і Python, яка використовується як альтернатива традиційному програмуванню MATLAB. Дані у формі чисел розглядаються як масиви для багатовимірних функцій і операцій перегрупування. Це широко використовуваний інструмент у сфері Data Science. Серед багатьох бібліотек Python NumPy є однією з

найбільш використовуваних. Це пояснюється тим, що багато методів для аналізу даних потребують великих таблиць і матриць, а також складних обчислень для отримання цінної інформації з даних. Вона спрощує цей процес за допомогою різноманітних математичних функцій. [25]

Ще одним інструментом для створення моделі є бібліотека SciPy, яка призначена для наукових обчислень та включає в себе різноманітні функції для розв'язання математичних задач. SciPy є розширенням Numpy (Numerical Python), і тому забезпечує надзвичайно швидко та ефективно обробку даних. Вона надає багато функцій для різноманітних обчислювальних задач, таких як інтегрування, оптимізація, апроксимація, обробка сигналів, розв'язання диференціальних рівнянь та багато іншого. У коді SciPy використовується для розв'язання диференціальних рівнянь за допомогою методу odeint. Крім того, SciPy працює з іншими інструментами, такими як Matplotlib для візуалізації даних. Загалом усі ці інструменти працюють разом, що дозволяє проаналізувати дані, отримати результати та зробити висновки. [26]

Pandas є важливим інструментом для аналізу даних і широко використовується в наукових дослідженнях, фінансах, аналізі соціальних мереж, машинному навчанні та багатьох інших областях. Дана бібліотека дозволяє легко завантажувати, обробляти і аналізувати дані з різних джерел, таких як CSV-файли, бази даних SQL, Excel-файли. До її можливостей належить також: індексація, фільтрація та сортування даних, робота з різними групами даних, їх об'єднання та обробка пропущених даних. Також є методи для роботи з даними типу дата і час. [27]

Наступним інструментом є Matplotlib — це бібліотека Python для візуалізації даних, яка дозволяє створювати різноманітні графіки та діаграми. У моделюванні Matplotlib використовується для побудови графіків. Приклад візуалізації за допомогою бібліотеки Matplotlib зображено на «Рисунку 2.1».

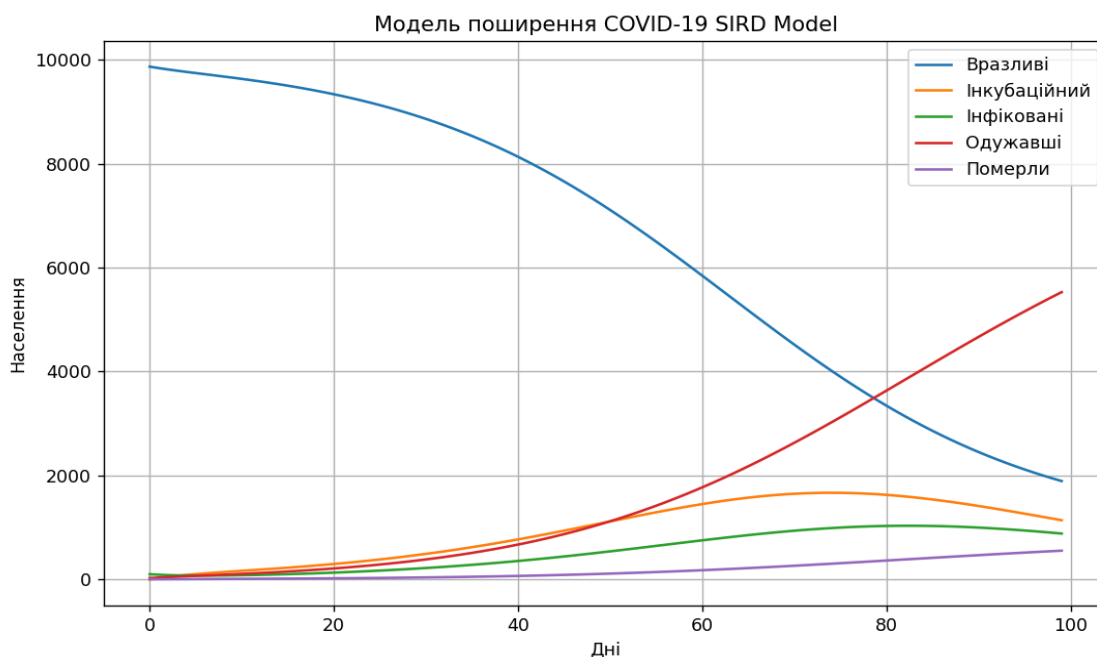
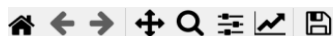


Рисунок 2. 1 — Візуалізація моделі SIRD за допомогою бібліотеки Matplotlib

Джерело: розроблено автором

Для створення інтерфейсу майбутньої програми я використала PyQt6.

PyQt6 — це набір заснованих інструментів для створення графічного інтерфейсу користувача (GUI). PyQt6 реалізований як набір модулів Python. Це багато платформний інструментарій, який працює на всіх основних операційних системах, включаючи Unix, Windows і Mac OS. Дана оболонка — це міст, який плавно інтегрує надійну структуру між платформами Qt C++ із гнучкою мовою програмування Python, слугуючи потужним модулем GUI. Qt виходить за рамки простого інструментарію GUI. Він включає в себе широкий спектр функцій, пропонуючи абстракції для таких елементів, як мережеві сокети, потоки, Unicode, SQL, бази даних, SVG, OpenGL і XML. У програмному коді я використала PyQt6 для створення віконної програми зі зручним інтерфейсом, можливістю введення параметрів та відображення результатів моделювання. (Рисунок 2.2); [28]

Рисунок 2.2 — Приклад реалізації інтерфейсу за допомогою PyQt6

Джерело: розроблено автором

Висновки за Розділом 2

Для дослідження динаміки поширення COVID-19 у місті Умань, було обрано математичну модель SIRD. Даний вибір ґрунтується на здатності моделі точно описувати основні стани населення під час епідемії, а саме: схильні до інфікування (S), інфіковані (I), ті, що одужали (R), та ті, що померли (D). Модель SIRD є розширенням базової моделі SIR і враховує летальні випадки. Завдяки своїй простоті та ефективності, вона дозволяє здійснювати прогнози щодо розвитку епідемії та оцінювати ефективність різних заходів контролю та обмежень.

Для успішної ініціалізації моделі SIRD було зібрано актуальні дані щодо епідемії COVID-19 в місті Умань, які включають кількість нових випадків інфікування, одужань та смертей за період від березня по грудень 2020 року. Джерелами даних стали офіційні звіти Уманської міської санітарно-епідеміологічної станції. Для визначення параметрів моделі, таких як коефіцієнт інфікування, коефіцієнт одужання та коефіцієнт смертності, використовувалися

статистичні методи та методи машинного навчання. Визначені параметри були використані для налаштування початкових умов моделі та подальшого прогнозування динаміки епідемії. [32]

Для реалізації моделі SIRD були використані такі інструменти, як Python та відповідні бібліотеки: NumPy, SciPy, Pandas та Matplotlib. Python був обраний завдяки своїй простоті, популярності та потужним інструментам для обробки даних і наукових обчислень. NumPy та SciPy використовувались для чисельного розв'язання диференціальних рівнянь, що лежать в основі моделі SIRD. Pandas була використана для обробки та аналізу зібраних даних, а Matplotlib — для візуалізації результатів моделювання. Цей набір інструментів забезпечив ефективну реалізацію та аналіз моделі, що дозволило отримати точні та надійні прогнози щодо поширення COVID-19.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУ ПОШИРЕННЯ ЕПІДЕМІЇ COVID-19 ТА АНАЛІЗ СТРАТЕГІЇ БОРОТЬБИ З ЕПІДЕМІЯМИ

3.1 Реалізація моделі SIRD в програмному середовищі Python

Для побудови та реалізації моделі поширення епідемії COVID-19, застосуємо засоби мови програмування Python та реалізуємо код в середовищі для PyCharm Community. У Розділі 2, було описано, що модель задається системою нелінійних диференціальних рівнянь. Обчислення даних рівнянь буде виконуватися за допомогою функції `odeint` яка належить бібліотеці `scipy.integrate`.

Розглянемо метод побудови моделі SIRD, яку будемо використовувати для аналізу динаміки поширення епідемії COVID-19 в місті Умань.

Розпочнемо наше моделювання із встановлення потрібних бібліотек, призначення та функції яких описано в Розділі 2. До вашої уваги фрагмент коду, що демонструє імпорт потрібних пакетів для моделювання.

```
import sys
from PyQt6.QtWidgets import QApplication, QWidget, QLabel,
QLineEdit, QPushButton, QSlider, QGridLayout
from PyQt6.QtCore import Qt
from scipy.integrate import odeint
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
```

Наступним кроком визначимо параметри моделі β , γ , μ . Існує декілька варіантів для їх визначення. А саме — на основі статистичних даних, наприклад проаналізувати наявні дослідження в даній області, та скориставшись вже визначеними параметри, подати їх у вигляді сталих безпосередньо в коді.

Ще одним способом є створити інтерфейс з можливістю самостійно вводити параметри. Останній варіант задання параметрів є універсальним та дає змогу виконувати аналіз в різних містах, країнах тощо.

На «Рисунку 3.1» можемо побачити реалізацію інтерфейсу, де параметри β, γ, μ задаються за допомогою повзунка.

Рисунок 3. 1 — Вибір коефіцієнтів за допомогою повзунка

Джерело: розроблене автором

Наступним етапом моделювання є визначення початкових умов — це населення досліджуваної області (N), кількість вразливих до вірусу (S_0), інфікованих (I_0), одужавших (R_0) та померлих (D_0) осіб, а також період для моделювання — кількість днів (T).

Після ведення початкових умов, задамо, у програмі, рівняння для моделі SIRD. Система диференціальних рівнянь описує зміну кількості людей у кожній категорії з часом.

```
def sird_model(y, t, N, beta, gamma, mu):
    S, I, R, D = y
    dSdt = -beta * S * I / N
    dIdt = beta * S * I / N - gamma * I - mu * I
    dRdt = gamma * I
    dDdt = mu * I
    return dSdt, dIdt, dRdt, dDdt
```

Для реалізації обчислення системи диференціальних рівнянь використаємо функцію **odeint** з бібліотеки **scipy**, функціонал якої детально описаний в Розділі 2.

```
solution = odeint(self.sird_model, y0, t, args=(beta, gamma,
delta, population_size))
return solution
```

Результат графічної візуалізації моделі виведемо за допомогою бібліотеки Matplotlib:

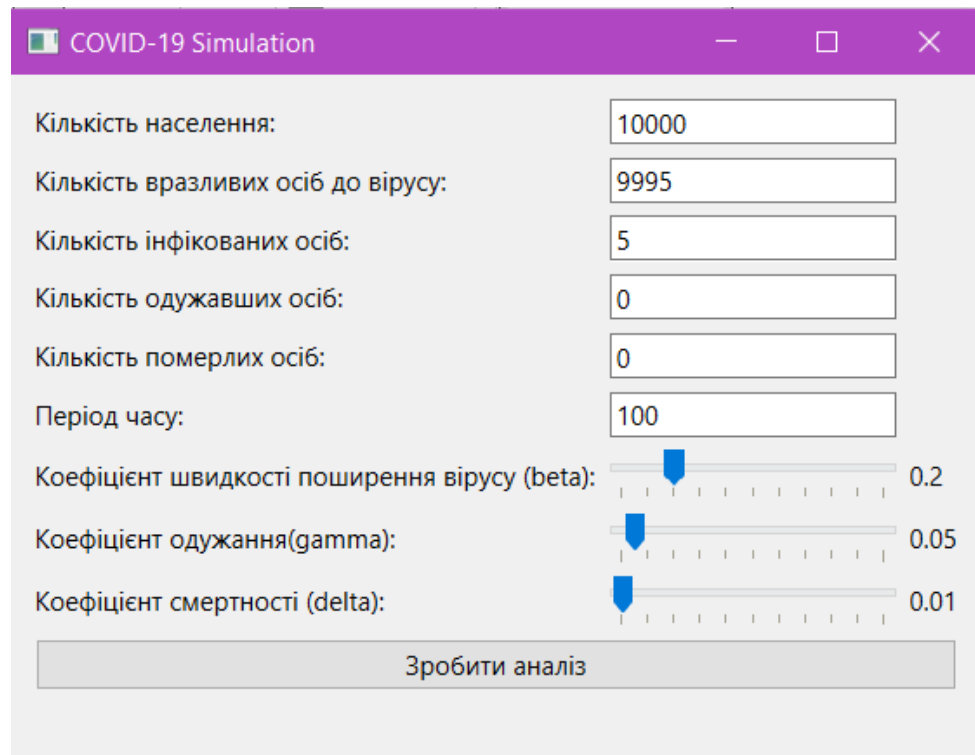
```
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t, S, label='Вразливі')
plt.plot(t, I, label='Інфіковані')
plt.plot(t, R, label='Одужавші')
plt.plot(t, D, label='Померли')
plt.xlabel('Дні')
plt.ylabel('Населення')
plt.title('Модель поширення COVID-19 (SIRD Model)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Після виконання всіх етапів, можемо перейти до візуалізації моделі.

Для прикладу візьмемо довільні дані та введемо їх у вікно інтерфейсу програми:

- кількість населення досліджуваної області;
- кількість вразливих осіб до вірусу;
- кількість інфікованих осіб;
- кількість осіб, які одужали;
- кількість померлих осіб;
- період часу.

Доцільно визначити коефіцієнти швидкості поширення вірусу (β), одужання (γ) та смертності (δ). Після введення усіх даних, натискаємо кнопку «Зробити аналіз». (Рисунок 3.2);



COVID-19 Simulation

Кількість населення: 10000

Кількість вразливих осіб до вірусу: 9995

Кількість інфікованих осіб: 5

Кількість одужавших осіб: 0

Кількість померлих осіб: 0

Період часу: 100

Коефіцієнт швидкості поширення вірусу (beta): 0.2

Коефіцієнт одужання (gamma): 0.05

Коефіцієнт смертності (delta): 0.01

Зробити аналіз

Рисунок 3.2 — Візуалізація інтерфейсу

Джерело: розроблено автором

Результат моделювання подається у вигляді графіка, що є зручним для спостереження змін у динаміці. (Рисунок 3.3);

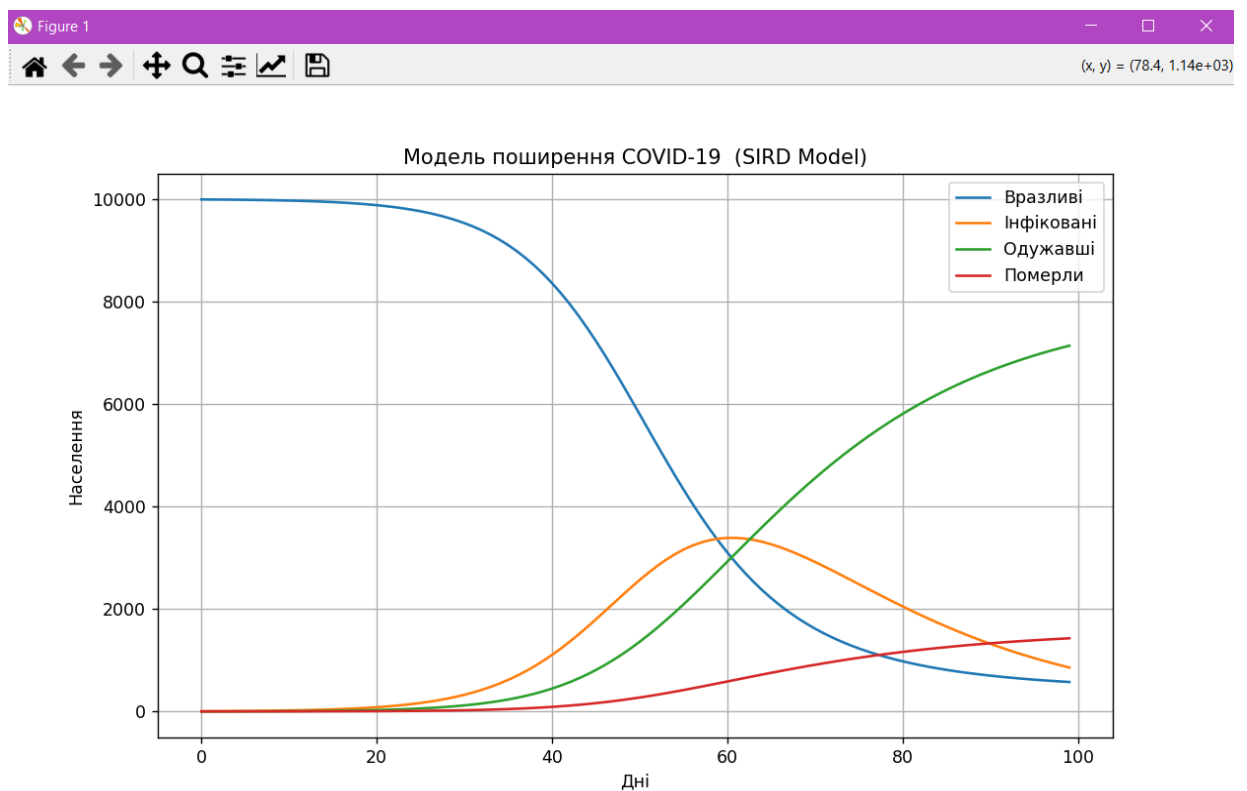


Рисунок 3. 3 — Результат моделювання моделі SIRD

Джерело: розроблено автором

3.2 Моделювання початку епідемії COVID-19 в місті Умань

У даному пункті, пропоную, проаналізувати поширення COVID-19 у місті Умань за допомогою моделі SIRD (Susceptible-Infectious-Recovered-Deceased). Використовуючи мову програмування Python та реалізацію моделі SIRD, описану в попередньому пункті Розділу 3, спрогнозую динаміку розповсюдження вірусу для оцінки ефективності медичних і соціальних заходів проти поширення вірусу.

Розпочнемо процес моделювання початку епідемії COVID-19 в місті Умань.

Населення міста Умань становить 82 603 осіб (станом на 1 січня 2020 р.). Площа міста — 41 км². Густота населення — 1 988,4 осіб/км².

Початкова кількість вразливих осіб (S_0) = 82 597.

Початкова кількість інфікованих осіб (I_0) = 6.

Початкова кількість вилікуваних осіб (R_0) = 0.

Початкова кількість померлих осіб (D_0) = 0.

Час (t) в днях, пропоную здійснити прогноз поширення вірусу на 275 днів.

Далі нам потрібно визначити показники бета, гама та дельта для даного регіону. Інтерфейс програми надає можливість змінювати параметри повзунком та розглядати різні сценарії поширення епідемії. Однак, для точної побудови моделі поширення вірусу, пропоную знайти ці параметри, використовуючи статистичні дані взяті в уманському районному відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України", за період з березня по грудень 2020 року. [32]

Обчислення параметрів виконаємо у середовищі PyCharm Community мови програмування Python. Створимо коротеньку програму на основі статистичних даних для оцінки параметрів. Введемо початкові значення та статистичні дані.

```
# Введення статистичних даних
# Дні
t_data = np.array([0, 31, 61, 92, 122, 153, 184, 214, 245, 275])
# Інфіковані
I_data = np.array([6, 12, 0, 0, 3, 19, 169, 896, 1300, 805])
# Одужавші
R_data = np.array([0, 6, 11, 0, 3, 19, 167, 885, 1288, 793])
# Померлі
D_data = np.array([0, 1, 0, 0, 0, 0, 2, 11, 12, 12])

# Визначення початкової кількості населення
```

Далі задаємо формулу для розв'язку диференціальних рівнянь моделі SIRD.

```
def sird_model(y, t, N, beta, gamma, mu):
    S, I, R, D = y
    dSdt = -beta * S * I / N
    dIdt = beta * S * I / N - gamma * I - mu * I
    dRdt = gamma * I
    dDdt = mu * I
    return dSdt, dIdt, dRdt, dDdt

def sird_model_fit(t, beta, gamma, mu):
    S0 = N - I_data[0] # Початкова кількість сприйнятливих
    I0 = I_data[0]
    R0 = 0
    D0 = 0
    y0 = S0, I0, R0, D0

    result = odeint(sird_model, y0, t, args=(N, beta, gamma, mu))
    return result[:, 1], result[:, 2], result[:, 3]

# Повертаємо тільки I, R, D
```

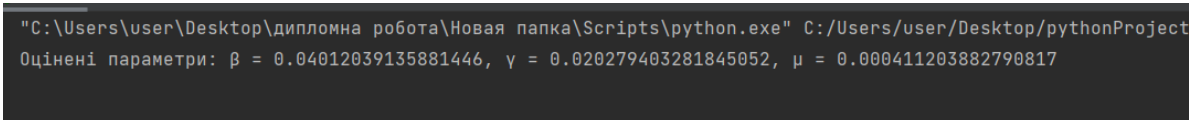
Наступним кроком оцінюємо та підбираємо параметри, виходячи із статистичних даних. За допомогою функції `print` виведемо оцінені параметри на екран.

```
# Підгонка параметрів
popt, pcov = curve_fit(combined_data, np.tile(t_data, 3),
    combined_data_points, p0=initial_guess, bounds=bounds)
beta_fit, gamma_fit, mu_fit = poprt
return beta_fit, gamma_fit, mu_fit

# Виклик функції підгонки
beta_fit, gamma_fit, mu_fit = fit_sird(t_data, I_data, R_data, D_data)

print(f'Оцінені параметри:  $\beta$  = {beta_fit},  $\gamma$  = {gamma_fit},  $\mu$  = {mu_fit}')
```

Результат оцінки параметрів β — швидкість зараження, γ — одужання та μ — смертності. На «Рисунку 3.3» можемо побачити, що $\beta = 0,04$; $\gamma = 0,02$; $\mu = 0,0004$.



```
"C:\Users\user\Desktop\дипломна робота\Новая папка\Scripts\python.exe" C:/Users/user/Desktop/pythonProject
Оцінені параметри:  $\beta = 0.04012039135881446$ ,  $\gamma = 0.020279403281845052$ ,  $\mu = 0.000411203882790817$ 
```

Рисунок 3. 4 — Результат оцінки параметрів

Джерело: розроблено автором

Для моделювання COVID-19 в місті Умань оцінене значення $\beta = 0.04$ — означає, що при контакті з інфікованою особою, вразлива особа має 4% ймовірності заразитися. Це значення характеризує високий рівень зараження вірусом, що сприяє швидкому поширенню інфекції у випадку відсутності заходів з контролю та запобігання.

Параметр $\gamma = 0.02$ — вказує на те, що кожен інфікований має 2% ймовірності одужати впродовж одного дня. Це значення дозволяє оцінити середній час перебування в стані інфекції перед одужанням.

Оцінений параметр $\delta = 0.0004$ дає нам інформацію, що кожен інфікований має 0.04% ймовірності померти від інфекції впродовж одного дня. Хоча показник здається низьким, у масштабах великої популяції це може призвести до значної кількості смертей.

Після оцінки параметрів та визначення всіх початкових умов, можемо розпочати моделювання динаміки поширення епідемії COVID-19 в місті Умань.

Для цього запустимо нашу програму та введемо ці дані в раніше створений інтерфейс програми.

Використовуючи повзунок задаємо визначені параметри та запускаємо програму, натиснувши кнопку «Зробити аналіз». Демонстрацію інтерфейсу зображено на «Рисунку 3.5».

COVID-19 Simulation

Кількість населення: 82603

Кількість вразливих осіб до вірусу: 82597

Кількість інфікованих осіб: 6

Кількість одужавших осіб: 0

Кількість померлих осіб: 0

Період часу (дні): 275

Коефіцієнт швидкості поширення вірусу (beta): 0.04

Коефіцієнт одужання (gamma): 0.02

Швидкість смертності (delta): 0.0004

Зробити аналіз

Рисунок 3. 5 — Інтерфейс для моделювання поширення COVID-19 в м. Умань

Джерело: розроблено автором за статистичними даними [32]

Для моделей червоним кольором позначимо кількість інфікованих осіб, зеленим — кількість одужавших та чорним — кількість осіб, які померли від вірусу. Моделювання динаміки поширення COVID-19 в місті Умань зображено на «Рисунку 3.6» .

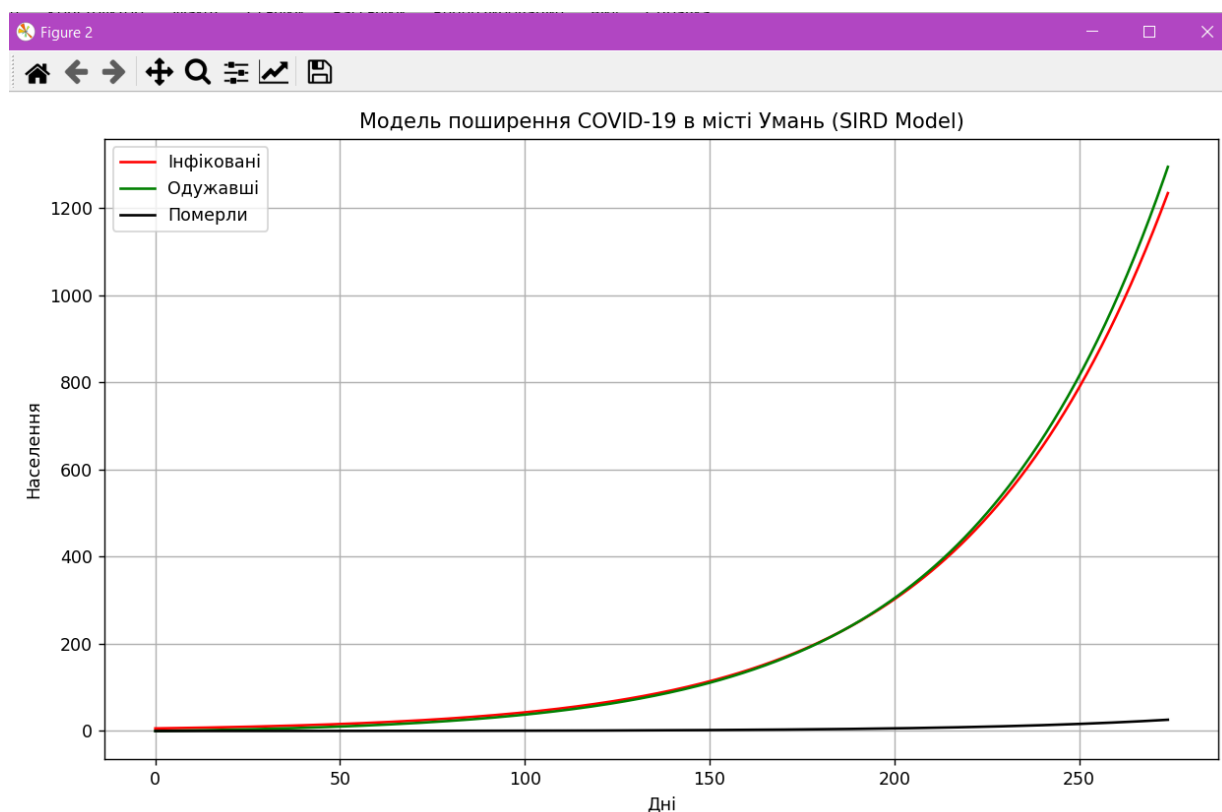


Рисунок 3. 6 — Моделювання динаміки поширення COVID-19 в місті Умань

Джерело: розроблено автором

Згідно моделювання, пік захворюваності припадає приблизно на 250 день епідемії.

На графіку представлено результати динаміки трьох ключових показників: кількості інфікованих, одужавших та померлих осіб протягом заданого періоду часу. Горизонтальна вісь X позначає час у днях, протягом якого спостерігається епідемія, а вертикальна вісь Y відображає кількість осіб у відповідних категоріях (інфіковані, одужавші, померлі).

Далі пропоную детальніше проаналізувати та описати змодельовані криві.

Червона крива демонструє кількість осіб, що інфіковані вірусом COVID-19. На початку спостереження кількість інфікованих осіб зростає повільно, але з часом відбувається експоненціальне зростання, яке вказує на швидке поширення вірусу серед населення.

Зелена крива відображає кількість осіб, які одужали від інфекції. Ця крива також експоненціальна, щодо зростання, показуючи, що з часом все більше людей одужують.

Чорна крива демонструє кількість смертельних випадків внаслідок COVID-19. Хоча ця крива зростає набагато повільніше порівняно з іншими, вона все ж показує поступове збільшення кількості смертей у міру поширення епідемії.

Поширення епідемії можна поділити на три етапи. Розпочнемо аналіз із початку епідемії і десь приблизно до 50-го дня. Графік показує, що кількість інфікованих, одужавших і померлих осіб є незначною. Це відповідає періоду, коли вірус тільки починає поширюватися.

Далі ми можемо побачити період другого етапу— середина епідемії, яка починається приблизно на 100-й день. Тут спостерігається прискорене зростання кількості інфікованих і одужавших осіб, що свідчить про те, що вірус швидко поширюється, однак незважаючи на це багато людей починають одужувати.

Третім етапом є період ближчий до 250-го дня, де кількість одужавших перевищує кількість інфікованих, що свідчить про ефективність заходів лікування та можливе наближення до контролю над епідемією. Кількість померлих продовжує зростати, але значно повільніше.

Побудова модель SIRD наочно демонструє динаміку епідемії COVID-19 в місті Умань на основі вказаних початкових умов та параметрів. Вона може слугувати важливим інструментом для оцінки ефективності медичних і соціальних заходів проти поширення вірусу.

3.3 Порівняння отриманих результатів з реальними статистичними даними

Людство не застраховане від спалахів нових епідемій викликаних інфекційними захворюваннями, через непередбачуваність та численні фактори, що сприяють їхньому виникненню. Глобальне потепління, мутація вірусів та бактерій, війни і соціальні потрясіння, зростання кількості населення та міграція, резистентність до антибіотиків і це далеко не весь перелік. "Хвороба X" – це щось на кшталт напрямку роботи, щоб спонукати вчених протидіяти невідомим

інфекційним загрозам. Тобто помічати нові та досліджувати старі інфекції, які можуть мутувати чи в інший спосіб стати потужнішими.[33]

Керуючись метою даної роботи, було створено модель прогнозування динаміки поширення вірусних захворювань. Для оцінки точності та ефективності моделі SIRD проведено порівняння прогнозованих результатів з реальними статистичними даними, щодо динаміки епідемії COVID-19, взятими в уманському районному відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України", за період з березня по грудень 2020 року. [32]

Для порівняння прогнозованих та реальних даних використаємо графіки згенеровані створеною моделлю та статистичні показники.

На діаграмі показано динаміку випадків захворювання по нарастаючій за період з березня по грудень 2020 року. (Рисунок 3.7);



Рисунок 3. 7 — Динаміка випадків захворювання в м. Умань в період з березня по грудень 2020 року

Джерело: розроблено за даними уманського районного відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України"[32]

На графіку ми можемо побачити початок пандемії COVID-19 та її динаміку розвитку, яку можна розділити на три головних етапи.

Перший етап — початок пандемії, що припав на період з березня по серпень 2020 року. Спостерігаємо повільне зростання кількості захворювань серед населення міста, до серпня щомісячна кількість випадків інфікування збільшується з 6 до 40 осіб. Повільний розвиток пандемії зумовлений успішним введенням карантинних обмежень, дотриманням всіх карантинних норм в умовах поширення небезпечного вірусу.

Другий період — це вересень 2020 року, де почалося значне зростання кількості випадків з 40 до 209 осіб. В цей період відбулося послаблення карантинних обмежень, зумовлене початком навчального року. Також різкий зріст захворюваності є результатом масового паломництва вірян, які приїхали з різних куточків світу, на святкування Рош га-Шана до міста Умань.

Третім етапом — є період з жовтня по грудень 2020 року. Тут можемо спостерігати вибухове зростання кількості нових випадків інфікованих. У жовтні кількість хворих збільшується до 1105, у листопаді до 2405, а в грудні досягає 3210.

Колосальне збільшення інфікованих в цей період є наслідком послаблення карантинних обмежень, паломництвом, появою нових, більш заразних, штамів вірусу та сезонним періодом захворюваності серед населення.

Порівнюючи статистичні дані з побудованою моделлю, можемо зробити висновок, що модель SIRD з мінімальною похибкою демонструє динаміку пандемії в місті Умань у 2020 році [32]. Вона демонструє кількість випадків інфікування серед населення, яка змінювалася протягом року, а також періоди найбільшого зростання захворюваності. (Рисунок 3.8);

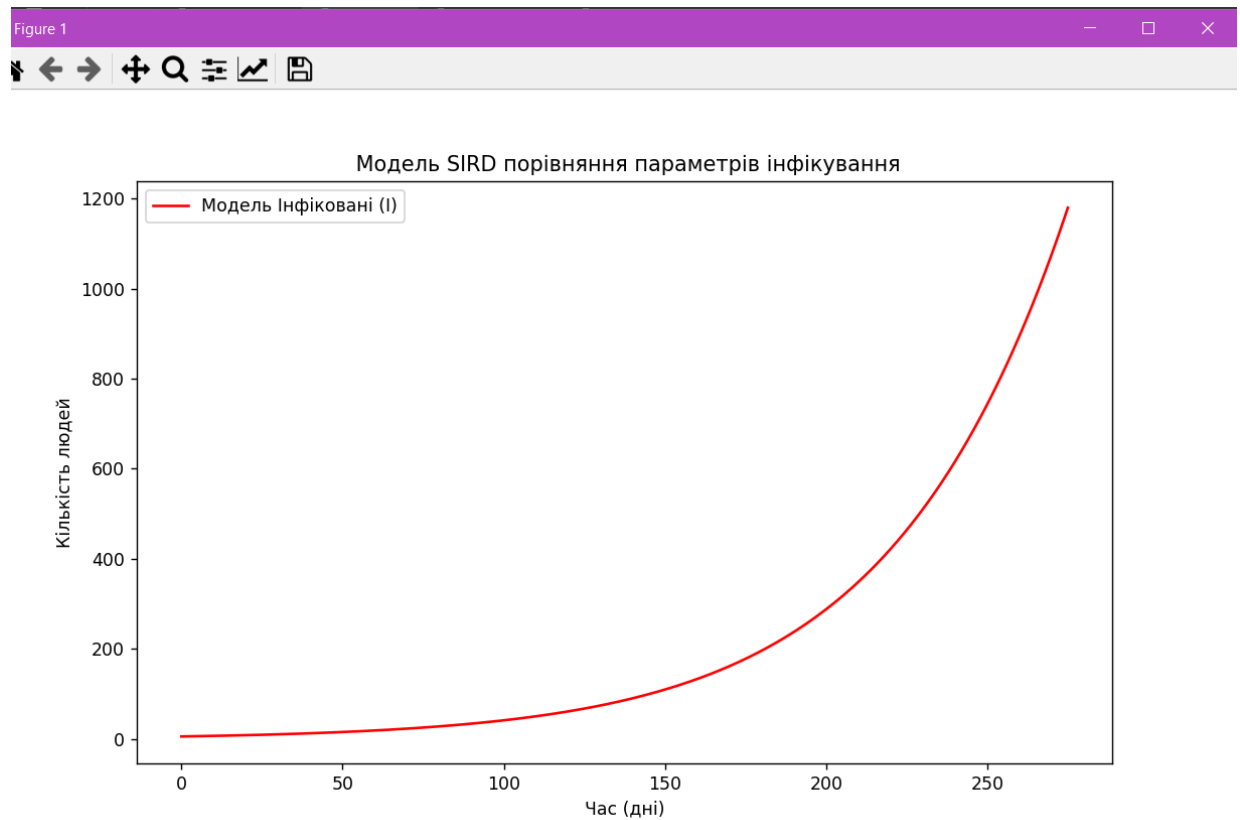


Рисунок 3. 8 — Модель SIRD порівняння параметрів інфікування

Джерело: розроблено автором

Наступним кроком порівняємо статистичні дані, щодо динаміки смертельних випадків під час пандемії COVID-19 в місті Умань, в період з березня 2020 по грудень 2020 року. Діаграма зображена на «Рисунок 3.9» показує динаміку летальних випадків від COVID-19.



Рисунок 3.9 — Динаміка летальних випадків в м. Умань в період з березня по грудень 2020 року

Джерело: розроблено за даними уманського районного відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України"[32]

Кількість появи летальних випадків також можна розділити на три етапи. Перший етап — мінімальна смертність від вірусу — протягом періоду зафіксовано лише 1 летальний випадок, і це число не змінюється до серпня. Це є результатом ефективних медичних заходів та обмежень, які знизили ризик захворюваності та важкого перебігу хвороби, забезпечивши низьку смертність.

Другим етапом є — період у вересні, де можемо спостерігати незначне збільшення кількості летальних випадків — до 3 осіб, що свідчить про збільшення кількості інфікованих, в тому числі людей вразливих до ускладнень.

Третій період характеризується значним збільшення кількості летальних випадків. У жовтні кількість загиблих збільшується до 14, у листопаді до 26, а у грудні досягає 38 осіб.

Зростання летальних випадків з вересня по грудень 2020 вказує на послаблення карантинних обмежень, збільшення кількості важких випадків або можливу появу нових штамів вірусу.

Порівнюючи статистичні дані та згенеровані моделлю SIRD, зробимо висновок. Графік моделі SIRD, зображений на «Рисунку 3.10», з незначною похибкою демонструє динаміку летальних випадків у місті Умань у 2020 році [32].

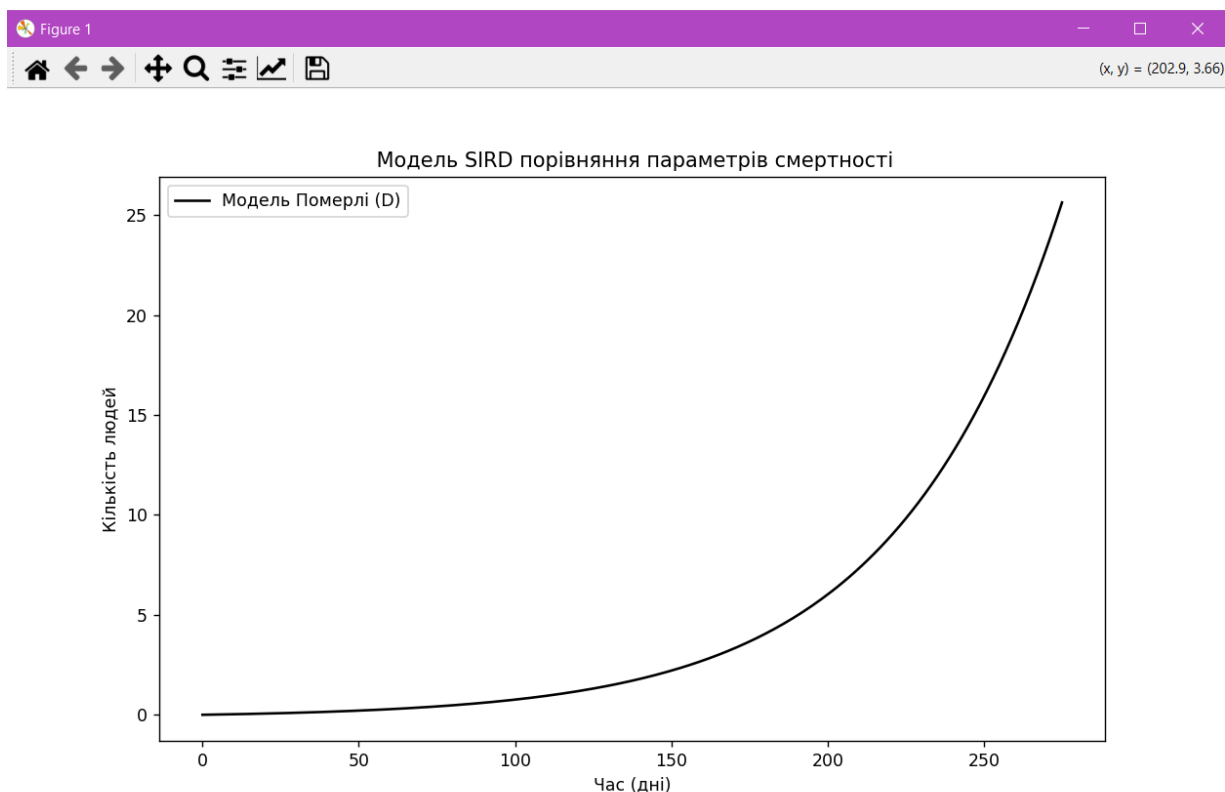


Рисунок 3. 10 — Модель SIRD порівняння параметрів смертності

Джерело: розроблено автором

Модель SIRD добре передбачає загальні тренди поширення COVID-19. Проте реальні дані можуть мати відхилення через місцеві фактори, такі як карантинні заходи, медична інфраструктура та інші локальні умови. Згенерована модель і реальні статистичні дані показують узгоджене зростання кількості випадків і летальних випадків після початкового періоду стабільності, що підтверджує ефективність використання SIRD моделі для прогнозування динаміки пандемії. (Рисунок 3.11 та Рисунок 3.12);

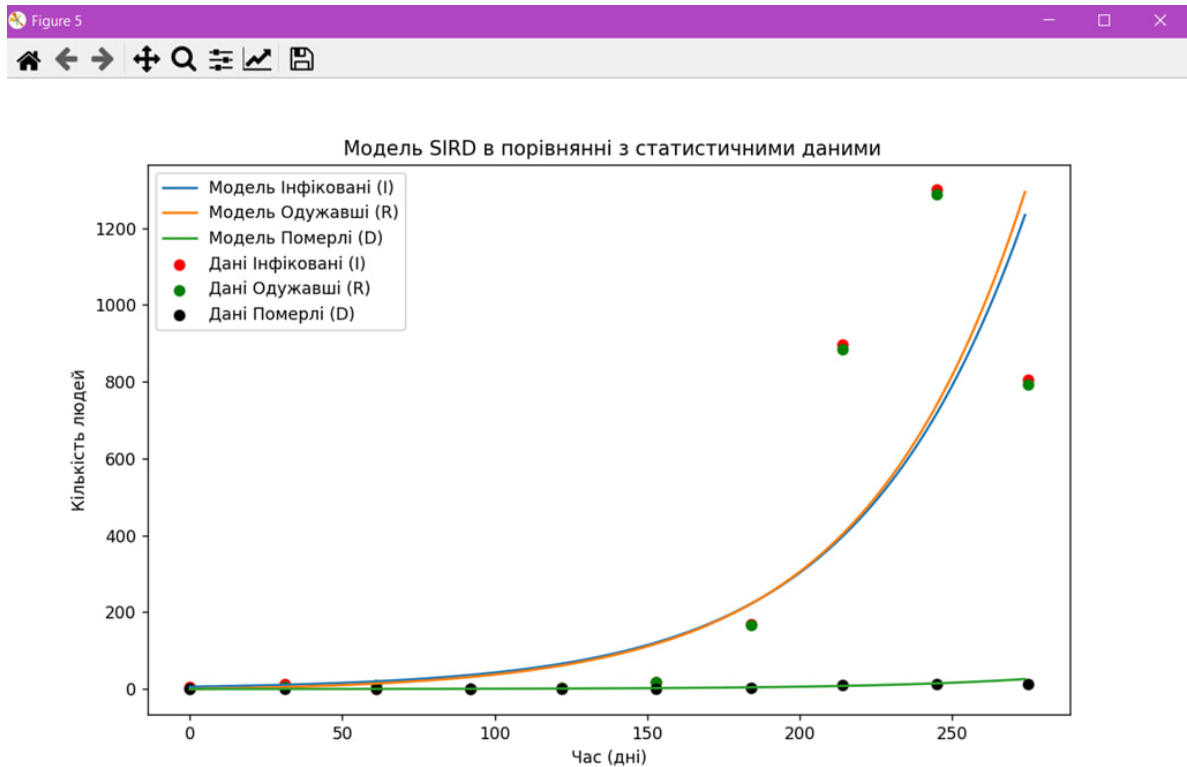


Рисунок 3. 11 — Модель SIRD в порівнянні з статистичними даними

Джерело: розроблено автором

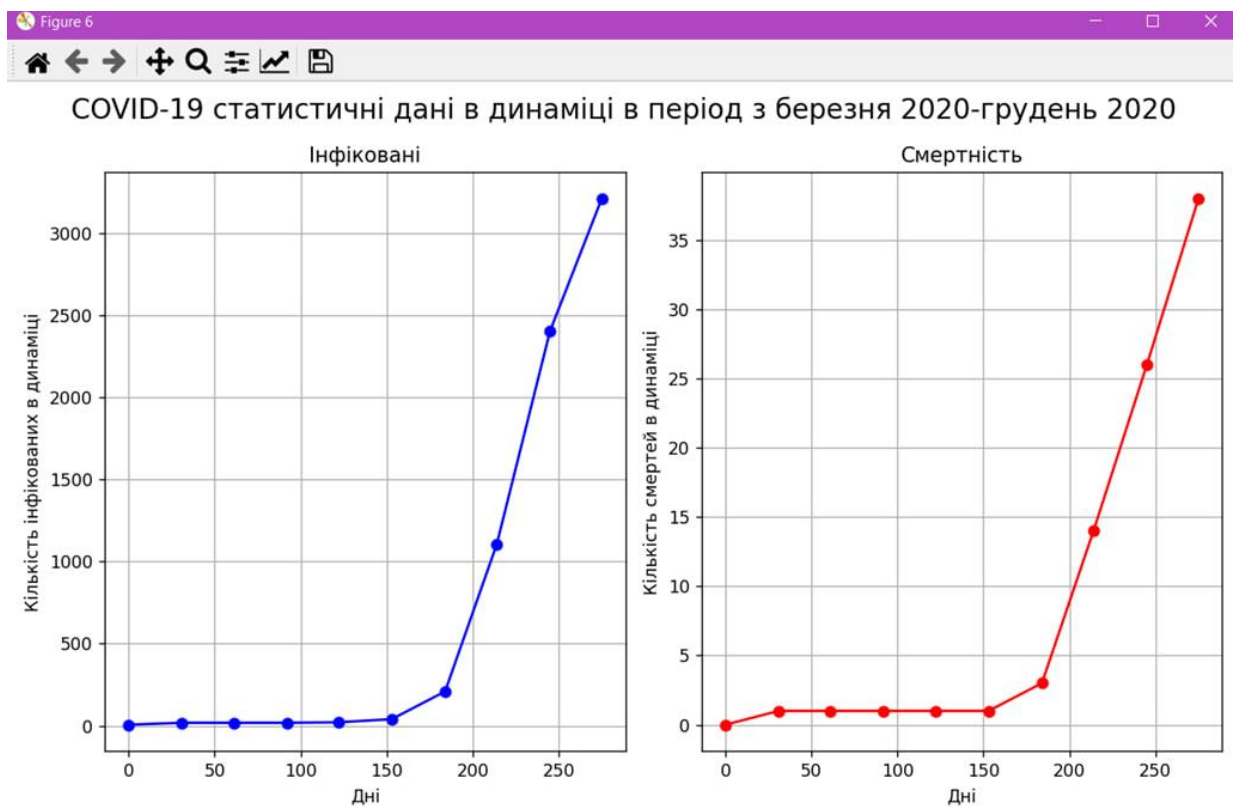


Рисунок 3. 12 — Статистичні дані COVID-19 в динаміці з березня по грудень 2020 року

Джерело: розроблено за даними уманського районного відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України"[32]

3.4 Апробація моделі SIRD в інших регіонах

Успішна апробація моделі SIRD на прикладі міста Умань, з населенням 82603 особи, спонукала протестувати модель на інших регіонах, з більшою кількістю населення.

Обраним для тестування є місто Штутгарт у Німеччині, столиця землі Баден-Вюртемберг. За кількістю населення — шосте місто країни. Станом на 2020 рік — 630 305 жителів.

Модель побудована на основі даних в місті Штутгарт є також відносно точною в аналізі динаміки поширення епідемії, відхилення від статистичних даних є не значним. (Рисунок 3.13);

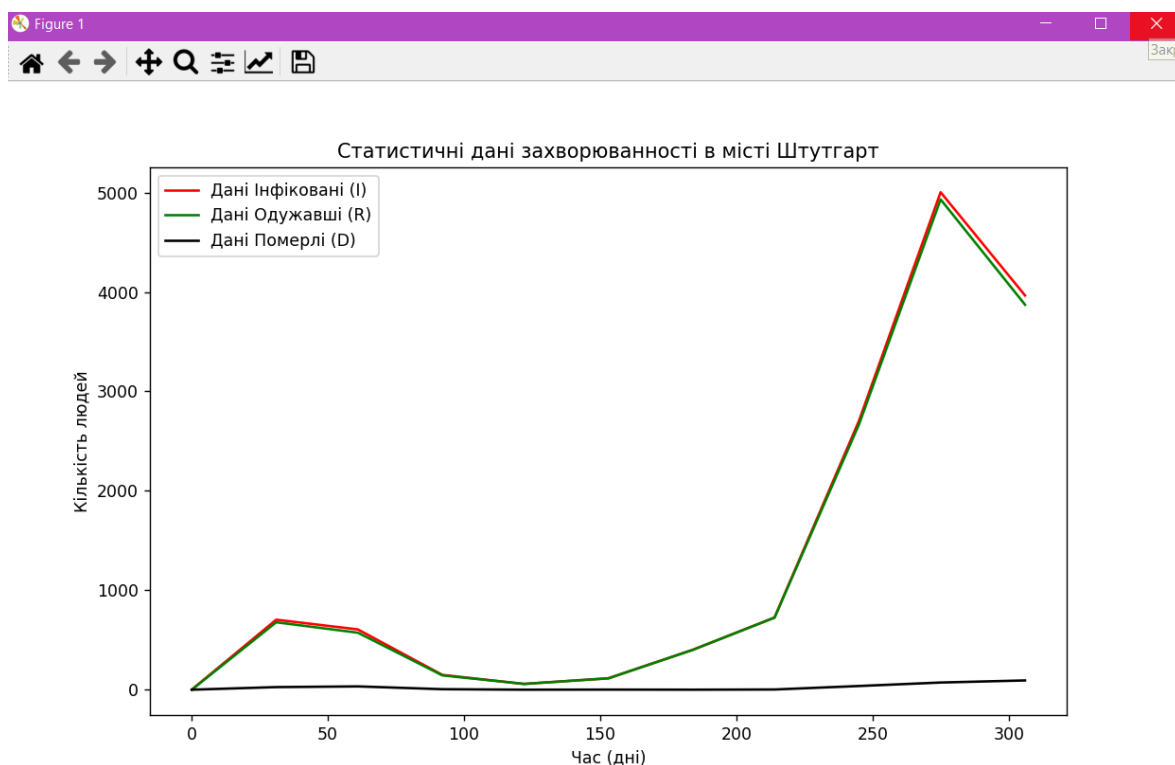


Рисунок 3. 13 — Статистичні дані захворюваності в місті Штутгарт

Джерело: розроблено автором за даними [29]

Перед моделюванням оцінімо параметри $\beta = 0.058$, $\gamma = 0.029$, $\mu = 0.00074$. Введемо дані в інтерфейс програми та візуалізуємо модель SIRD. (Рисунок 3.14 та Рисунок 3.15);

COVID-19 Simulation

Кількість населення:

Кількість вразливих осіб до вірусу:

Кількість інфікованих осіб:

Кількість одужавших осіб:

Кількість померлих осіб:

Період часу (дні):

Коефіцієнт швидкості поширення вірусу (beta):

Коефіцієнт одужання (gamma):

Швидкість смертності (delta):

Базове репродуктивне число R_0 : 1.95

Рисунок 3. 14 — Інтерфейс для побудови моделі SIRD в м. Штутгарт

Джерело: розроблено автором

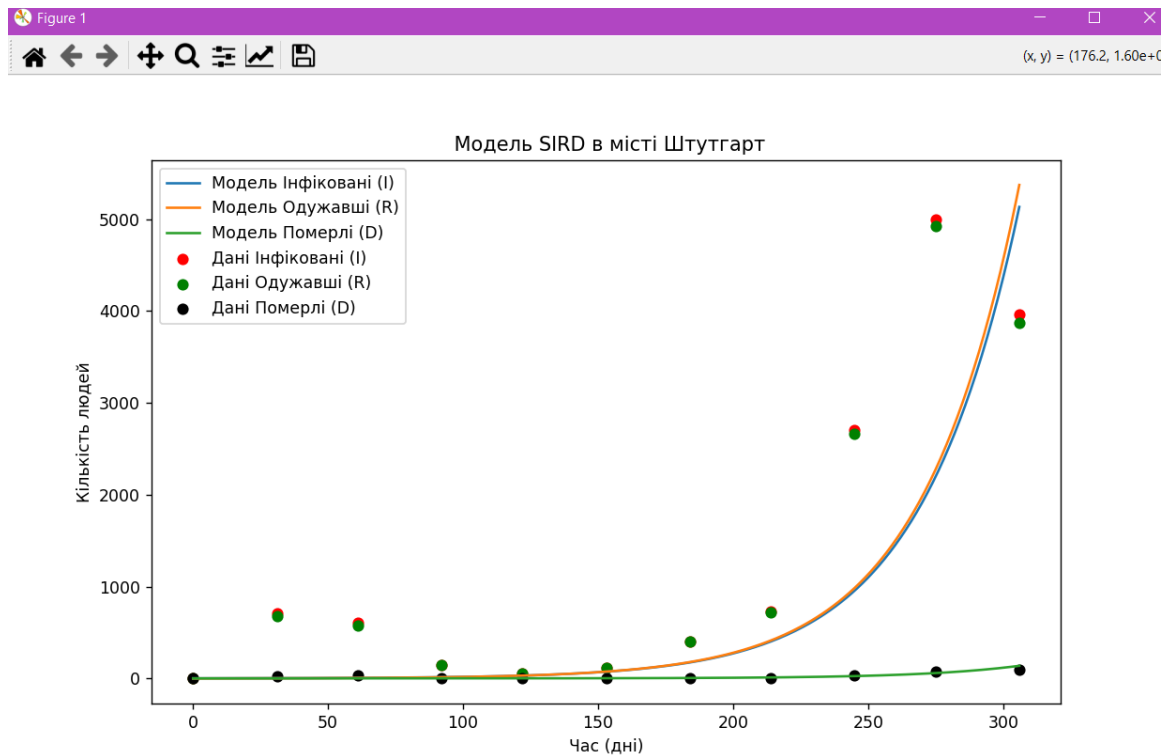


Рисунок 3. 15 — Візуалізація моделі SIRD в м. Штутгарт

Джерело: розроблено автором

Успішна апробація моделі спонукала перевірити її дієвість у глобальному масштабі. На «Рисунку 3.16» зображено статистичні дані кількості інфікованих осіб у світі.

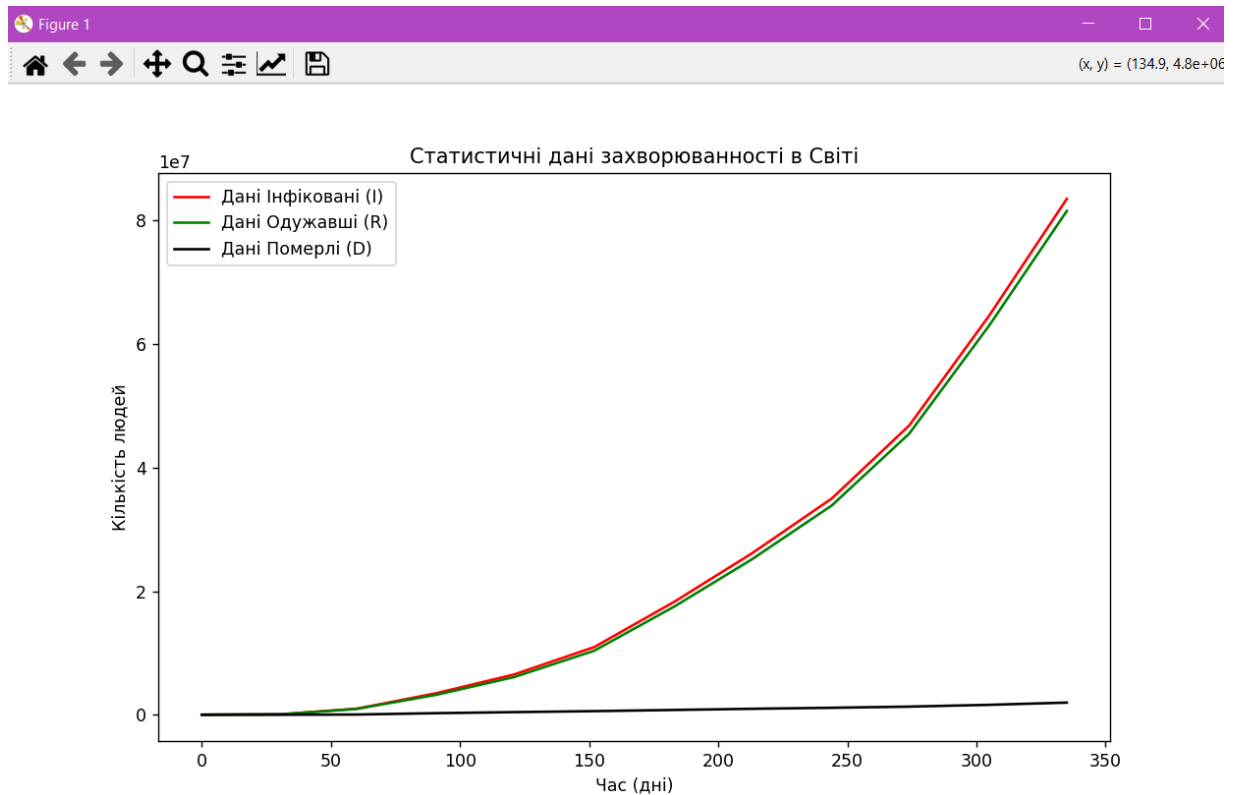


Рисунок 3. 16 — Статистичні дані захворюваності у світі в період з січня по грудень 2020 року

Джерело: розроблено автором за даними [30]

Для моделювання оцінимо параметри $\beta = 0.34$ $\gamma = 0.3$, $\mu = 0.019$.

(Рисунок 3.17);

Оцінені параметри: $\beta = 0.34682495115227724$, $\gamma = 0.30781304632256323$, $\mu = 0.01943515978401298$

Рисунок 3. 17 — Оцінені параметри для моделювання в світі

Джерело: розроблено автором за даними[30]

Візуалізуємо модель SIRD. (Рисунок 3.18);

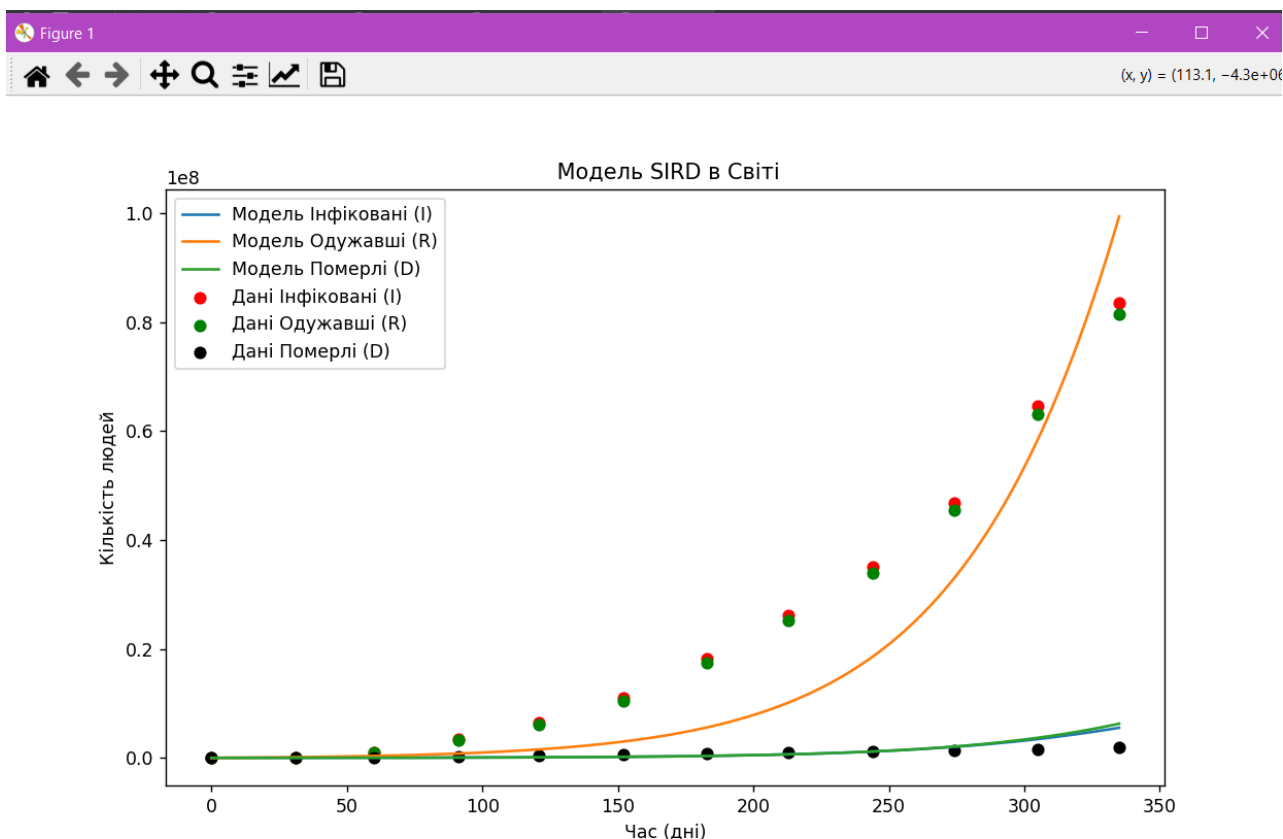


Рисунок 3. 18 —Візуалізація моделі SIRD у світі

Джерело: розроблено автором

Однак побудована модель на основі світових статистичних даних має велику похибку та є не точною, адже ми не маємо змоги відслідкувати точну кількість населення в конкретний день, тому що населення нашої планети змінюється кожену секунду. Вказати точну кількість інфікованих, одужавших та загиблих під час епідемії. Окрім цього, численна кількість населення та різна густота населення в регіонах створює додаткові фактори, які потрібно враховувати під час моделювання динаміки поширення епідемії в світі. Ще одним важливим фактором є якість медицини в тому чи іншому регіоні, адже він впливає на швидкість виявлення вірусу, швидкість одужання та кількість смертей від пандемії.

Проаналізувавши динаміку поширення епідемії побудованих моделей SIRD в різних регіонах, можна зробити висновок, що точність моделі залежить від різних факторів. Модель побудована на прикладі міст Умань та Штутгарт, дає більш точний аналіз, адже кількість населення та густота не велика, було введено

карантинні обмеження та здійснений контроль над ними, тому модель є дуже наближеною до статистичних даних.

3.5 Порівняння різних стратегій боротьби з епідемією

Протягом всього історичного існування людства боротьба з епідеміями вимагає комплексного підходу і включає в себе різні стратегії, які можуть варіюватися в залежності від типу захворювання, його поширення та особливостей кожної конкретної ситуації. Наведу їх приклади та проаналізую переваги та недоліки кожної.

Першою стратегією боротьби з епідемією є вакцинація населення. Її перевагами є:

- найефективніший спосіб профілактики та контролю поширення захворювань;
- довготривалий захист, який забезпечує колективний імунітет населення та знижує можливість передачі хвороби серед невакцинованих осіб.

Дана стратегія має ряд недоліків, а саме:

- розробка та виробництво вакцини вимагає багато часу та затратних ресурсів;
- деякі вакцини потребують складної системи розподілу та спеціальних умов зберігання;
- існує опір та недовіра серед населення, які можуть знижувати ефективність кампаній з вакцинації.

Наступна стратегія — соціальне дистанціювання та карантин, не менш вагома для запобігання поширення епідемії та має ряд переваг:

- швидке впровадження, яке вводиться негайно в області спалаху епідемії без необхідності в додаткових ресурсах;

- забезпечує контроль над поширенням, що зменшує контакт між інфікованими та здоровими людьми, знижуючи швидкість поширення захворювання.

Однак дана стратегія має вагомі недоліки у соціальній та економічній сферах:

- економіка потерпає через закриття бізнесів та обмеження пересування;
- ізоляція змінює психологічний стан суспільства, що може привести до багатьох соціальних проблем.

Не менш важливою є стратегія масового тестування та ізоляції

До її переваг належить:

- точність та своєчасність визначення інфікованих осіб та їх ізоляція для запобігання подальшого поширення епідемії;

Недоліком є:

- потреба значних ресурсів для тестування та відстеження контактів;

Не популярною, але дієвою є стратегія — локдаун або повне закриття регіонів.

До переваг віднесемо зменшення передач вірусу за рахунок обмеження пересування та контактів, що дає час медичним службам для підготовки до можливого напливу пацієнтів.

Однак дана стратегія має суттєві недоліки, що визначаються високою вартістю та негативним впливом на економіку та суспільство.

Важливою стратегією є створення інформаційних кампаній, щодо поширення та протидії епідемії.

Перевагами є підвищення рівня обізнаності про захворювання та способи захисту, а також зміна поведінки населення на більш безпечну, наприклад, носіння масок, правильне миття рук, зберігання дистанції тощо.

Ефективність даної стратегії залежить від рівня свідомості населення, готовності слідувати рекомендаціям, не піддаватися дезінформації та фейковим новинам, що і є недоліком стратегії.

Для ефективної боротьби з епідемією, однієї стратегії не достатньо, тому часто виникає необхідність у комбінуванні кількох стратегій. Вакцинація, соціальна дистанція, масове тестування та інформаційні кампанії разом можуть створити всебічну і багаторівневу відповідь на виклик епідемії. Кожна стратегія має свої унікальні переваги та виклики, які повинні бути ретельно зважені при плануванні заходів боротьби з епідемією.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було досягнуто низку важливих результатів, що сприяли розумінню динаміки розповсюдження інфекційних захворювань, зокрема епідемії COVID-19. Виконані завдання дозволили отримати цінні наукові та практичні висновки, що можуть бути використані для подальшого дослідження і розробки стратегій боротьби з інфекційними хворобами.

1. Розглянуто та проаналізовано наймасштабніші епідемії в історії людства, що дозволило виявити загальні закономірності їхнього поширення та фактори, що впливають на їх динаміку, а також зрозуміти еволюцію підходів до боротьби з різними інфекційними захворюваннями
2. Проаналізовано основні математичні моделі, що використовуються для вивчення динаміки розповсюдження інфекційних захворювань, включаючи SIR, SEIR, SIS , дав можливість виявити переваги та недоліки кожної з моделей та вибір однієї з них. Обґрунтовано використання моделі SIRD для дослідження динаміки епідемії COVID-19 та проведено аналіз параметрів.
3. Зібрано статистичні дані щодо епідемії COVID-19 в місті Умань за період з березня по грудень 2020 року використані для визначення параметрів моделі SIRD та її адаптацію для локальних умов.
4. Створено модель прогнозування динаміки поширення COVID-19 у місті Умань з використанням програмного середовища Python. На основі визначених параметрів моделі — проведено симуляції та прогнозування динаміки епідемії.
5. Здійснено порівняння прогнозованих результатів з реальними статистичними даними, взятими в уманському районному відділі ДУ "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України". Створену модель апробовано на інших регіонах та світові в цілому, що дозволило перевірити її універсальність та адаптивність до різних умов, а також виявлено можливості та обмеження використання моделі для прогнозування епідемій у різних географічних та соціально-економічних умовах

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Black Death: estimated death toll in European cities | Statista. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1114273/black-death-estimates-deaths-european-cities/> (дата звернення: 22.04.2024).
2. Visualizing the history of pandemics. Visual Capitalist. URL: <https://www.visualcapitalist.com/history-of-pandemics-deadliest/> (дата звернення: 22.04.2024).
3. Historical *Y. pestis* genomes reveal the european black death as the source of ancient and modern plague pandemics / M. A. Spyrou та ін. *Cell host & microbe*. 2016. Т. 19, № 6. С. 874–881. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chom.2016.05.012> (дата звернення: 21.04.2024).
4. Учасники проєктів Вікімедіа. Чума антоніна – вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Чума_Антоніна (дата звернення: 22.04.2024).
5. Чума, холера, "іспанка": як великі пандемії змінювали світ - BBC News Україна. BBC News Україна. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-52291698> (дата звернення: 30.04.2024).
6. Найбільш смертоносні пандемії в історії. Радіо Свобода. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/30493269.html> (дата звернення: 22.04.2024).
7. Coronavirus (COVID-19) cases by country worldwide 2023 | Statista. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1043366/novel-coronavirus-2019ncov-cases-worldwide-by-country/> (дата звернення: 20.05.2024).
8. Dynamics of epidemics: impact of easing restrictions and control of infection spread / S. L. T. de Souza та ін. *Chaos, solitons & fractals*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110431> (дата звернення: 30.04.2024).
9. Epidemics and trust: The case of the Spanish Flu. PubMed Central (PMC). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7986373/> (date of access: 25.04.2024).
10. Pandemics throughout the history / S. Sampath та ін. *Cureus*. 2021. URL: <https://doi.org/10.7759/cureus.18136> (дата звернення: 01.05.2024).

11. Novel coronavirus (COVID-19) deaths by country worldwide 2023 | Statista. Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/1093256/novel-coronavirus-2019ncov-deaths-worldwide-by-country/> (дата звернення: 25.04.2024).
12. Ukrinform. «Іспанка» 1918-го. Уроки, які потрібно винести в 2020-му. Укрінформ - актуальні новини України та світу. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3128036-ispanka-1918go-uroki-aki-potribno-vinesti-v-2020mu.html> (дата звернення: 25.04.2024).
13. Mathematical modelling: modelling the spread of diseases with SIRD model. Analytics Vidhya. URL: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/08/mathematical-modelling-modelling-the-spread-of-diseases-with-sird-model/> (дата звернення: 26.04.2024).
14. An adaptive social distancing SIR model for COVID-19 disease spreading and forecasting / S. Gounane та ін. Epidemiologic methods. 2021. Т. 10. URL: <https://doi.org/10.1515/em-2020-0044> (дата звернення: 12.05.2024).
15. Contributors to Wikimedia projects. Compartmental models in epidemiology - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Compartmental_models_in_epidemiology (дата звернення: 23.04.2024).
16. Mathematical models to study the biology of pathogens and the infectious diseases they cause / J. B. Xavier та ін. IScience. 2022. Т. 25, № 4. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104079> (дата звернення: 26.04.2024).
17. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions / Z. Yang та ін. Journal of thoracic disease. 2020. Т. 12, № 3. С. 165–174. URL: <https://doi.org/10.21037/jtd.2020.02.64> (дата звернення: 10.05.2024).
18. Girardi P., Gaetan C. An SEIR model with time-varying coefficients for analyzing the sars-cov-2 epidemic. Risk analysis. 2021. URL: <https://doi.org/10.1111/risa.13858> (дата звернення: 06.04.2024).
19. Model stokastik tipe SIRV pada penyebaran COVID-19 dengan mempertimbangkan efektivitas vaksinasi / S. Utina та ін. Jurnal fourier. 2022. Т. 11, № 1. С. 7–16. URL: <https://doi.org/10.14421/fourier.2022.111.7-16> (дата звернення: 11.05.2024).

20. Kröger M., Schlickeiser R. On the analytical solution of the sirv-model for the temporal evolution of epidemics for general time-dependent recovery, infection and vaccination rates. *Mathematics*. 2024. Т. 12, № 2. С. 326. URL: <https://doi.org/10.3390/math12020326> (дата звернення: 11.05.2024).
21. Pacheco C. C., de Lacerda C. R. Function estimation and regularization in the SIRD model applied to the COVID-19 pandemics. *Inverse problems in science and engineering*. 2021. С. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1080/17415977.2021.1872563> (дата звернення: 12.05.2024).
22. Studying the progress of COVID-19 outbreak in India using SIRD model / S. Chatterjee та ін. *Indian journal of physics*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s12648-020-01766-8> (дата звернення: 12.05.2024).
23. Contributors to Wikimedia projects. Python (programming language) - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)) (дата звернення: 10.05.2024).
24. Modeling Data with NumPy: images. Oak-Tree Technologies. URL: <https://www.oak-tree.tech/blog/numpy-images> (дата звернення: 10.05.2024).
25. NumPy : the most used Python library in Data Science. Data Science Courses | DataScientest. URL: <https://datascientest.com/en/numpy-the-python-library-in-data-science> (дата звернення: 10.05.2024).
26. SciPy: all about the python machine learning library. *Data Science Courses | DataScientest*. URL: <https://datascientest.com/en/scipy-all-about-the-python-machine-learning-library> (дата звернення: 10.05.2024).
27. Pandas. PyPI. URL: <https://pypi.org/project/pandas/> (дата звернення: 14.05.2024).
28. What is PyQt? | Learn Python PyQt. *Learn Python PyQt | Learn Python PyQt*. URL: <https://pythonpyqt.com/what-is-pyqt/> (дата звернення: 10.05.2024).
29. Corona-Zahlen für Stuttgart. Corona-in-Zahlen für Deutschland und weltweit - aktuelle COVID-19 Kennzahlen. URL: <https://www.corona-in-zahlen.de/landkreise/sk%20stuttgart/> (дата звернення: 15.05.2024).

- 30.COVID - coronavirus statistics - worldometer. Worldometer - real time world statistics. URL: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (дата звернення: 15.05.2024).
- 31.The Justinianic Plague: an inconsequential pandemic? / L. Mordechai та ін. Proceedings of the national academy of sciences. 2019. Т. 116, № 51. С. 25546–25554. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1903797116> (дата звернення: 23.04.2024).
- 32.Державна установа "Черкаський обласний центр контролю та профілактики захворювань МОЗ України". (2020). Статистичні дані про динаміку захворюваності на COVID-19 в уманському районі з березня по грудень 2020 року.
- 33.Хвороба Х. Що це таке і чому ЗМІ заговорили про нову "пандемію" - BBC News Україна. *BBC News Україна*. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cd170zz9xdno> (дата звернення: 20.05.2024).

ДОДАТОК А

```
import sys
from PyQt6.QtWidgets import QApplication, QWidget, QLabel, QLineEdit, QPushButton, QSlider, QGridLayout,
QMessageBox
from PyQt6.QtCore import Qt
from scipy.integrate import odeint
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
class CovidSimulationApp(QWidget):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setWindowTitle("COVID-19 Simulation")
        self.beta = 0.04 # Ймовірність зараження при контакті
        self.gamma = 0.02 # Швидкість одужання
        self.delta = 0.0004 # Швидкість смертності (початкове значення)
        self.setup_ui()
    def setup_ui(self):
        layout = QGridLayout()
        self.population_size_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Кількість населення:"), 0, 0)
        layout.addWidget(self.population_size_input, 0, 1)
        self.susceptible_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Кількість вразливих осіб до вірусу:"), 1, 0)
        layout.addWidget(self.susceptible_input, 1, 1)
        self.infected_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Кількість інфікованих осіб:"), 2, 0)
        layout.addWidget(self.infected_input, 2, 1)
        self.recovered_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Кількість одужавших осіб:"), 3, 0)
        layout.addWidget(self.recovered_input, 3, 1)
        self.deceased_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Кількість померлих осіб:"), 4, 0)
        layout.addWidget(self.deceased_input, 4, 1)
        self.days_input = QLineEdit()
        layout.addWidget(QLabel("Період часу (дні):"), 5, 0)
```

```
layout.addWidget(self.days_input, 5, 1)
self.beta_slider = QSlider(Qt.Orientation.Horizontal)
self.beta_slider.setMinimum(0)
self.beta_slider.setMaximum(100)
self.beta_slider.setSingleStep(1)
self.beta_slider.setValue(int(self.beta * 100))
self.beta_slider.setTickPosition(QSlider.TickPosition.TicksBelow)
self.beta_slider.valueChanged.connect(self.update_beta_label)
layout.addWidget(QLabel("Коефіцієнт швидкості поширення вірусу (beta):"), 6, 0)
layout.addWidget(self.beta_slider, 6, 1)
self.beta_label = QLabel(f"{self.beta:.2f}")
layout.addWidget(self.beta_label, 6, 2)
self.gamma_slider = QSlider(Qt.Orientation.Horizontal)
self.gamma_slider.setMinimum(0)
self.gamma_slider.setMaximum(100)
self.gamma_slider.setSingleStep(1)
self.gamma_slider.setValue(int(self.gamma * 100))
self.gamma_slider.setTickPosition(QSlider.TickPosition.TicksBelow)
self.gamma_slider.valueChanged.connect(self.update_gamma_label)
layout.addWidget(QLabel("Коефіцієнт одужання (gamma):"), 7, 0)
layout.addWidget(self.gamma_slider, 7, 1)
self.gamma_label = QLabel(f"{self.gamma:.2f}")
layout.addWidget(self.gamma_label, 7, 2)
self.delta_slider = QSlider(Qt.Orientation.Horizontal)
self.delta_slider.setMinimum(1) #  $0.0001 * 10000 = 1$ 
self.delta_slider.setMaximum(10) #  $0.001 * 10000 = 10$ 
self.delta_slider.setValue(int(self.delta * 10000))
self.delta_slider.valueChanged.connect(self.update_delta_label)
layout.addWidget(QLabel("Швидкість смертності (delta):"), 8, 0)
layout.addWidget(self.delta_slider, 8, 1)
self.delta_label = QLabel(f"{self.delta:.4f}")
layout.addWidget(self.delta_label, 8, 2)
self.run_button = QPushButton("Зробити аналіз")
self.run_button.clicked.connect(self.run_simulation)
layout.addWidget(self.run_button, 9, 0, 1, 3)
```

```

self.result_label = QLabel("")
layout.addWidget(self.result_label, 10, 0, 1, 3)
self.setLayout(layout)
def update_beta_label(self):
    self.beta = self.beta_slider.value() / 100
    self.beta_label.setText(f"{self.beta:.2f}")
def update_gamma_label(self):
    self.gamma = self.gamma_slider.value() / 100
    self.gamma_label.setText(f"{self.gamma:.2f}")
def update_delta_label(self):
    self.delta = self.delta_slider.value() / 10000
    self.delta_label.setText(f"{self.delta:.4f}")
def sird_model(self, y, t, beta, gamma, delta, population_size):
    S, I, R, D = y
    dSdt = -beta * S * I / population_size
    dIdt = beta * S * I / population_size - (gamma + delta) * I
    dRdt = gamma * I
    dDdt = delta * I
    return [dSdt, dIdt, dRdt, dDdt]
def forecast_covid_sird(self, initial_conditions, population_size, days, beta, gamma, delta):
    S0, I0, R0, D0 = initial_conditions
    t = np.linspace(0, days, days)
    y0 = [S0, I0, R0, D0]
    solution = odeint(self.sird_model, y0, t, args=(beta, gamma, delta, population_size))
    return solution
def plot_covid_sird(self, solution, days):
    t = np.arange(days)
    S = solution[:, 0]
    I = solution[:, 1]
    R = solution[:, 2]
    D = solution[:, 3]
    # Перший набір графіків
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    ax.plot(t, I, label='Інфіковані', color='red')
    ax.plot(t, R, label='Одужавші', color='green')
    ax.plot(t, D, label='Померли', color='black')

```

```

ax.set_xlabel('Дні')
ax.set_ylabel('Населення')
ax.set_title('Модель поширення COVID-19 в місті Умань (SIRD Model)')
ax.legend()
ax.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Створення підграфіків
fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(1, 3, figsize=(10, 6))
fig.suptitle('Модель SIRD поширення епідемії COVID-19 в місті Умань ', fontsize=16)

# Перший графік - Інфіковані та померлі
ax1.plot(t, I, label='Інфіковані', color='violet')
ax1.set_xlabel('Дні')
ax1.set_ylabel('Населення')
ax1.set_title('Інфіковані')
ax1.legend()
ax1.grid(True)

# Другий графік - Одужавші
ax2.plot(t, R, label='Одужавші', color='red')
ax2.set_xlabel('Дні')
ax2.set_ylabel('Населення')
ax2.set_title('Одужавші')
ax2.legend()
ax2.grid(True)

# Третій графік - Померлі
ax3.plot(t, D, label='Померли', color='black')
ax3.set_xlabel('Дні')
ax3.set_ylabel('Населення')
ax3.set_title('Смертність')
ax3.legend()
ax3.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

# Зчитування даних з файлу Excel
try:
    df = pd.read_excel('C:\\Users\\user\\Desktop\\умань.xlsx')

```

except Exception as e:

```
    QMessageBox.critical(self, "Error", f"Error reading Excel file: {e}")
```

```
    return
```

```
# Побудова графіку кількості інфікованих за місяці
```

```
fig, (ax4, ax5, ax6) = plt.subplots(1, 3, figsize=(10, 6))
```

```
fig.suptitle('COVID-19 статистичні дані в період з березня 2020-грудень 2020', fontsize=16)
```

```
ax4.plot(df['Дні'], df['Кількість інфікованих'], marker='o', color='b')
```

```
ax4.set_title('Інфіковані')
```

```
ax4.set_xlabel('Дні')
```

```
ax4.set_ylabel('Кількість інфікованих')
```

```
ax4.grid(True)
```

```
# Побудова графіку кількості смертей за місяці
```

```
ax5.plot(df['Дні'], df['Кількість смертей'], marker='o', color='r')
```

```
ax5.set_title('Смертність')
```

```
ax5.set_xlabel('Дні')
```

```
ax5.set_ylabel('Кількість смертей')
```

```
ax5.grid(True)
```

```
# Побудова графіку кількості одужавших за місяці
```

```
ax6.plot(df['Дні'], df['Кількість одужавших'], marker='o', color='g')
```

```
ax6.set_title('Одужавші')
```

```
ax6.set_xlabel('Дні')
```

```
ax6.set_ylabel('Кількість одужавших')
```

```
ax6.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

```
# Побудова графіку кількості смертельних випадків на 1000 осіб за місяці
```

```
fig, ax7 = plt.subplots(figsize=(10, 6))
```

```
ax7.plot(df['Дні'], df['Кількість смертельних випадків на 1000 осіб'], marker='o', color='m')
```

```
ax7.set_title('Кількість смертельних випадків на 1000 осіб за місяці')
```

```
ax7.set_xlabel('Місяць')
```

```
ax7.set_ylabel('Кількість смертельних випадків на 1000 осіб')
```

```
ax7.set_xticklabels(df['Дні'])
```

```
ax7.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

```
# Побудова графіків
```

```

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(t, I, label='Модель Інфіковані (I)')
plt.plot(t, R, label='Модель Одужавші (R)')
plt.plot(t, D, label='Модель Померлі (D)')
plt.scatter(df['Дні'], df['Кількість інфікованих'], label='Дані Інфіковані (I)', color='red')
plt.scatter(df['Дні'], df['Кількість одужавших'], label='Дані Одужавші (R)', color='green')
plt.scatter(df['Дні'], df['Кількість смертей'], label='Дані Померлі (D)', color='black')
plt.xlabel('Час (дні)')
plt.ylabel('Кількість людей')
plt.title('Модель SIRD в порівнянні з статистичними даними')
plt.legend()
plt.show()

# Побудова графіку кількості інфікованих та померлих в динаміці за місяці
fig, (ax8, ax9) = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 6))
fig.suptitle('COVID-19 статистичні дані в динаміці в період з березня 2020-грудень 2020', fontsize=16)
ax8.plot(df['Дні'], df['Динаміка зараження'], marker='o', color='b')
ax8.set_title('Інфіковані')
ax8.set_xlabel('Дні')
ax8.set_ylabel('Кількість інфікованих в динаміці')
ax8.grid(True)

# Побудова графіку кількості смертей за місяці
ax9.plot(df['Дні'], df['Динаміка смертей'], marker='o', color='r')
ax9.set_title('Смертність')
ax9.set_xlabel('Дні')
ax9.set_ylabel('Кількість смертей в динаміці')
ax9.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()

def calculate_r0(self, beta, gamma, delta):
    return beta / (gamma + delta)

def run_simulation(self):
    try:
        population_size = float(self.population_size_input.text())
        susceptible = float(self.susceptible_input.text())
        infected = float(self.infected_input.text())
        recovered = float(self.recovered_input.text())

```

```

        deceased = float(self.deceased_input.text())
        days = int(self.days_input.text())
    except ValueError:
        QMessageBox.warning(self, "Input Error", "Please enter valid numeric values.")
        return

    beta = self.beta_slider.value() / 100
    gamma = self.gamma_slider.value() / 100
    delta = self.delta_slider.value() / 10000
    initial_conditions = [susceptible, infected, recovered, deceased]
    solution = self.forecast_covid_sird(initial_conditions, population_size, days, beta, gamma, delta)
    self.plot_covid_sird(solution, days)
    r0 = self.calculate_r0(beta, gamma, delta)
    self.result_label.setText(f"Базове репродуктивне число R0: {r0:.2f}")

if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
    window = CovidSimulationApp()
    window.show()
    sys.exit(app.exec())

```

Ім'я користувача:
Комп'ютерної математики та інформаційної безпеки...

ID перевірки:
1016333502

Дата перевірки:
07.06.2024 20:55:57 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
07.06.2024 21:01:24 EEST

ID користувача:
100005746

Назва документа: Диплом_Петриченко АВ

Кількість сторінок: 51 Кількість слів: 8556 Кількість символів: 61315 Розмір файлу: 1.68 MB ID файлу: 1016133698

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

6.66%
Схожість

Найбільша схожість: 1.18% з Інтернет-джерелом (<https://WWW.bbc.com/ukrainian/articles/cd170zz9xdno>)

5.32% Джерела з Інтернету

249

Сторінка 53

3.59% Джерела з Бібліотеки

247

Сторінка 54

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

30

Підозріле форматування

12
сторінок