

ЛЬОВКІН ВАЛЕРІЙ

Національний університет «Запорізька політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6890-2807>e-mail: [vllovkin@gmail.com](mailto:vllovkin@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ ФРЕЙМВОРКІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ ПОВІТРЯ ДІОКСИДОМ АЗОТУ В УМОВАХ ІНТЕГРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі розглянуто проблему прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту на основі застосування системного підходу з точки зору створення програмної системи в умовах інтегрованого середовища, коли об'єднуються можливості, пов'язані з моделями прогнозування трафіку транспортних засобів, з моделями прогнозування концентрації діоксиду азоту в повітрі, забезпечуючи створення єдиної програмної системи. Обґрунтовано потребу в наявності такої інтеграції в ситуаціях наявності обох типів моделей та обмеженості ресурсів. Запропоновано використовувати фреймворки для розробки такої програмної системи з врахуванням наявних зв'язків між складовими системи. Виконано проектування програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, включаючи визначення відповідних функціональних можливостей та інтеграцію між ними, виділення відповідної структури системи та бази даних, та відповідно її програмно реалізовано на основі створення вебсистеми з застосуванням фреймворку веброзробки Django з інтеграцією відповідних Python-інструментів для роботи з даними. Виконано експерименти щодо застосування цієї системи для системного прогнозування концентрації діоксиду азоту з підтвердженням ефективності отриманих результатів через зменшення рівня помилок прогнозування на основі показника середньоквадратичної помилки на горизонті в 6 годин як сумарно, так і окремо за останньою годиною та підвищення ступеня інтегрованості складових системи за допомогою об'єднання відповідного комплексу моделей прогнозування трафіку та концентрації діоксиду азоту в повітрі на різних станціях через зменшення складності створених моделей в результаті. Прогнозовані значення трафіку були застосовані як додаткові вхідні ознаки моделей у складі розробленої програмної системи.

Ключові слова: фреймворк, програмна система, вебсистема, прогнозування трафіку, прогнозування концентрації діоксиду азоту, інтегрованість.

LOVKIN VALERII

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

## FRAMEWORK APPLICATION FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE SYSTEM FOR FORECASTING AIR POLLUTION BY NITROGEN DIOXIDE IN THE INTEGRATED ENVIRONMENT

The problem of forecasting air pollution by nitrogen dioxide based on the application of a systems approach is considered in the paper. It is investigated for creating a software system in an integrated environment. Such an environment combines the capabilities of traffic forecasting models with models for forecasting nitrogen dioxide concentration in the air. It strengthens solving the problem by creating a united software system. The need for such integration when both types of models are available and resources are limited is substantiated. It is proposed to use frameworks to develop such a software system, taking into account the existing connections between the components of the system. The software system for forecasting air pollution by nitrogen dioxide has been designed, including determining and integrating the relevant functional capabilities, selecting the appropriate system and database structure. It has been implemented based on creating a web system using the Django web development framework with the integration of relevant Python tools for working with data in an appropriate way. Experimental investigation of the application of the developed system for systematic forecasting of nitrogen dioxide concentration was conducted confirming the effectiveness of the obtained results by reducing the level of forecasting errors based on mean squared error indicator for 6 hour forecasting horizon cumulatively as well as for the sixth hour and increasing the degree of integration of the system components by combining the appropriate set of traffic forecasting models and models for forecasting nitrogen dioxide concentration in the air at different stations due to the reduction in the complexity of the created models as a result. Forecasted traffic values were applied as additional input features for models in the developed software system.

**Keywords:** framework, software system, web system, traffic forecasting, nitrogen dioxide concentration forecasting, integration.

Стаття надійшла до редакції / Received 15.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 06.06.2025

### Постановка проблеми

Застосування системного аналізу для розв'язання складних проблем є важливим інструментом, який дозволяє врахувати наявні зв'язки між складовими проблемами, сприяючи більш ефективній реалізації відповідної програмної системи. У такому випадку під ефективністю слід розглядати з одного боку точність отриманих результатів для випадків, коли така система застосовується під час прогнозування різного роду показників, а з іншого боку – ступінь інтегрованості наявних на момент розробки підсистем у складі програмної системи, яка має цілісно вирішити складну проблему.

В сучасних умовах цілий ряд робіт у галузі прогнозування забрудненості повітря (зокрема [1-2]), доводить, що ця проблема є складною і комплексною. Відповідно при створенні окремих програмних рішень, відповідних математичних моделей існуючі зв'язки у складі проблеми стосовно вже наявних рішень ігноруються, а кількість існуючих моделей та рішень постійно збільшується, призводячи до надмірного навантаження при застосуванні наявних ресурсів в реальних умовах. У такому випадку додатково постає питання ефективності використання наявних ресурсів. Якщо кількість існуючих моделей постійно

збільшується, то це призводить до створення додаткових вибірок даних, додаткового навчання моделей, а наявні зв'язки при цьому не є задіяними. У результаті виникають моделі для прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, твердими частинками, монооксидом вуглецю, діоксидом сірки, а окремо від них існують моделі, які реалізують прогнозування тих факторів, які є причинами додаткової забрудненості повітря відповідними речовинами. При цьому якщо такий вплив враховується, то він враховується на основі даних за минулий період. Відповідно зокрема моделі прогнозування автомобільного трафіку існують, але вони існують окремо від моделей прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту. Кожна модель є спеціалізованою, певний зв'язок може враховуватись через введення додаткових ознак, яким є рівень трафіку у відповідні моменти часу, але це минулі моменти часу. Очевидно, що рівень діоксиду азоту в повітрі значною мірою залежить від поточної кількості транспортних засобів у відповідних точках місцевості. Тобто виникає зв'язок між показником, який прогнозується, – рівнем забрудненості повітря діоксидом азоту та іншим показником, який також прогнозується, але вже іншими моделями, – рівнем трафіку у певних ділянках місцевості.

Такий зв'язок може бути враховано через фактично створення більш складної моделі, яка передбачає в своїй структурі прогнозування трафіку на основі відповідних зв'язків, а тоді вже врахуванні результатів для прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту. Однак, у такому випадку створюється більш складна модель, яка зокрема містить більшу кількість шарів у своєму складі, при цьому за наявності моделей, які окремо направлені на прогнозування трафіку. Звісно, якщо такі моделі відсутні, то створення більш складної моделі може бути логічним кроком. Проте якщо раніше базові моделі вже були розроблені, то логічним кроком є застосування результатів, отриманих цими моделями, у складі програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в умовах інтегрованого середовища.

Дана проблема була окреслена в роботі [3], де вона вирішувалась на основі створення відповідної моделі, яка інтегрувала до складу моделі прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту прогнозовані значення трафіку. Однак важливим є вирішення не тільки питання створення відповідної моделі, але і розв'язання питання програмної реалізації такого програмного забезпечення, яке відповідно за своєю структурою є програмною системою, в якій має бути об'єднано відповідні створені моделі та рішення на основі актуальних технологій. Саме на вирішення цієї проблеми розробки програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в умовах інтегрованого середовища і направлена дана робота.

#### **Аналіз досліджень та публікацій**

Прогнозуванню забрудненості повітря присвячено цілий ряд робіт, зокрема серед останніх джерел у даному огляді було виділено [1-12], при цьому прогнозування саме концентрації діоксиду азоту в повітрі є менш розповсюдженим. Серед представлених джерел даному забруднювачу присвячено роботи [3-8, 10-12].

У роботах [1-12] досліджується цілий ряд чинників, які впливають на якість створених моделей прогнозування, зокрема концентрації твердих частинок [1-2, 7-8, 10], діоксиду сірки [2, 10], озону [9], монооксиду вуглецю [10] та діоксиду азоту [3-6, 8, 10-12]. Серед таких чинників зокрема центральну увагу приділено наступним: година доби або інші часові атрибути в роботах [1-2], температура, відносна вологість, швидкість вітру та інші метеорологічні дані в роботах [1, 10-12], просторові закономірності стосовно станцій, де відбувається збір даних, в роботах [8, 10], автомобільний трафік в роботі [12].

В якості методів для побудови моделей прогнозування концентрації забруднювачів в цих роботах проаналізовано наступні: Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) [4] та vector ARIMA (VARIMA) [7], модель експоненційного згладжування у дослідженні [4], дерева рішень зокрема у вигляді ансамблів, побудованих на основі методу Random Forest у дослідженні [9], рекурентні нейронні мережі зокрема з архітектурою Gated Recurrent Unit (GRU) у дослідженні [7] та long short-term memory (LSTM) у дослідженнях [3, 7], глибокі моделі seq2seq у дослідженні [2], інтегровані моделі на основі згорткових нейронних мереж та LSTM у дослідженнях [6, 8, 12], LSTM та ансамблю дерев рішень на основі моделі gcForest у статті [11], модель Temporal Fusion Transformer та графові нейронні мережі в роботі [10], де експериментальне дослідження виконано на основі синтетичного набору даних. При цьому моделі на основі інтеграції згорткових нейронних мереж та LSTM мають свої обмеження стосовно необхідності широкого охоплення місцевості станціями для спостереження, що не завжди може бути забезпечено зокрема постійно, тому в межах даного дослідження, що є ланкою серії досліджень зокрема [3, 5], таку модель застосовувати недоцільно. Окрім того вона є складнішою, потребує більше ресурсів, відповідно суперечить принципу підвищення інтегрованості.

У той же час, зважаючи на різноманіття врахованих чинників, архітектур моделей, можна стверджувати, що проблема прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту або іншими забруднювачами не розглядається в постановці з застосуванням інтегрованості моделей, що була описана вище, тобто в цьому напрямку спостерігається обмеженість існуючих рішень. Дане дослідження є продовженням роботи [3], де така постановка була вперше розглянута та запропоновано рішення для прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту на основі LSTM-моделей з використанням історичних значень концентрації діоксиду азоту в повітрі та прогнозованих значень автомобільного трафіку. У той же час у роботі [3] не було розглянуто питання системного впровадження таких засобів до складу програмної системи, що об'єднує в собі можливості моделей прогнозування концентрації діоксиду азоту та трафіку. Загалом же, зокрема в роботі [4], питання програмної реалізації прогнозування концентрації діоксиду азоту розглядається. Проте без врахування системного підходу. Тому за результатами проведеного аналізу слід

констатувати, що створення такої програмної системи стосовно як реалізації, так і проектування є актуальним завданням.

**Метою роботи є:** дослідження особливостей застосування фреймворків для розробки програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в умовах інтегрованого середовища.

#### Виклад основного матеріалу

Програмна система прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту передбачає виконання цілого ряду базових функцій для підтримки роботи користувачів у різних ролях, що щонайменше включають адміністратора, менеджера, оператора та звичайного користувача (рис. 1).

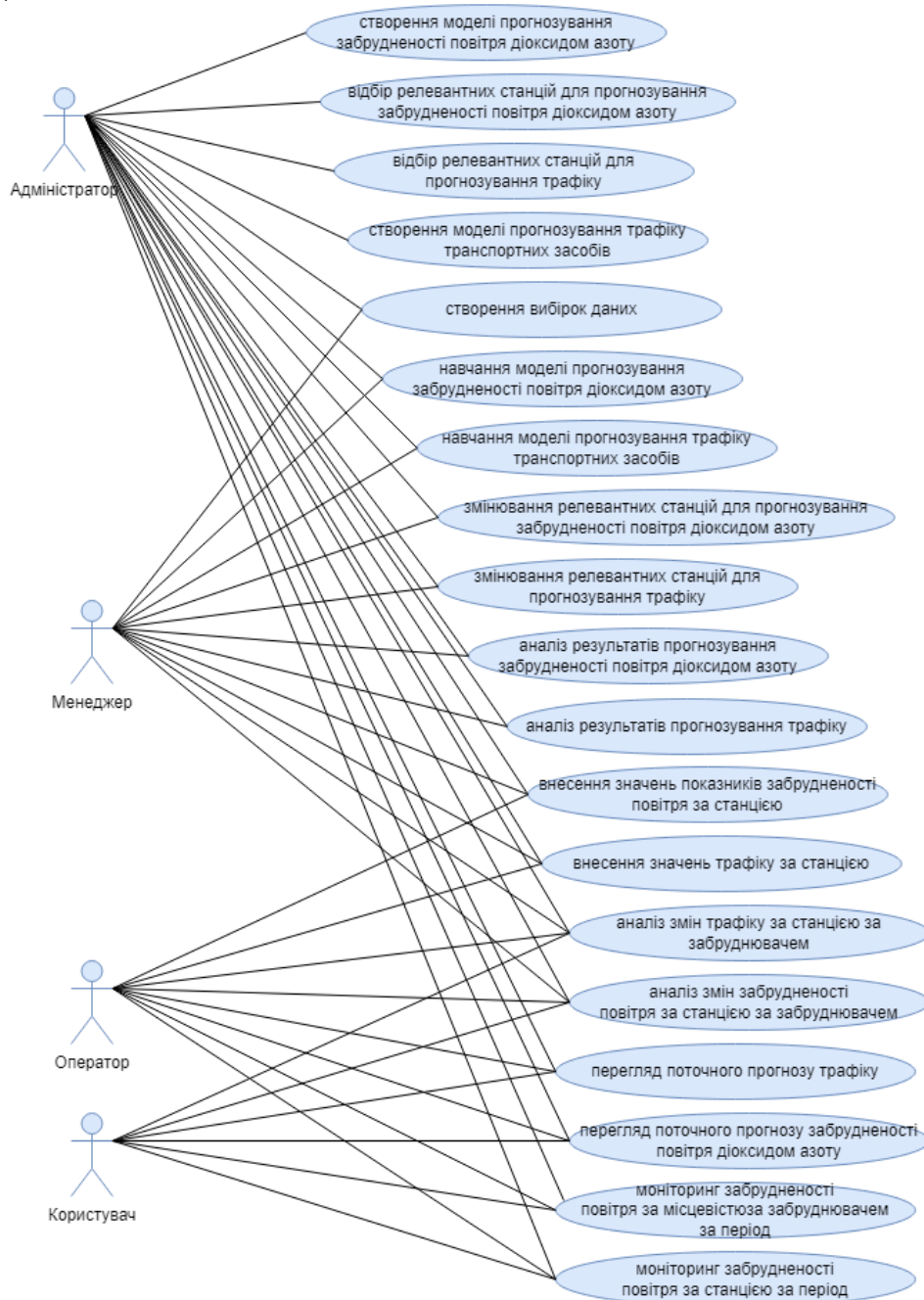


Рис. 1. Діаграма прецедентів використання програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту

Менеджером є особа, яка безпосередньо приймає рішення, оператором – привілейований користувач, який може вносити дані спостережень в систему, а звичайний користувач може тільки виконувати моніторинг на основі наявної інформації, але безпосередньо не має права приймати менеджерські рішення та вносити дані в систему. Виходячи з цього, було визначено ряд функціональних можливостей, які повинна надавати система прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту відповідним ролям користувачів (рис. 1). Адміністратор безпосередньо відповідає за підтримку функціонування механізмів прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту та трафіку транспортних засобів, забезпечуючи цю діяльність, а також маючи можливість за необхідності виконувати всі дії, які доступні всім іншим ролям користувачів. Менеджери можуть вносити дані, зібрані на станціях спостережень, хоча це є спеціалізацією операторів, якщо

не виконується автоматизовано, тобто то складу системи не інтегровано відповідний модуль. Але якщо такий модуль реалізовано та інтегровано, то менеджер і оператор все одно повинен мати можливість впливати на внесені дані для уточнення. Окрім того менеджер повинен мати можливість моніторингу всіх наявних даних, ініціювати навчання наявних моделей, відповідно виділяючи вибірки даних з бази даних, впливати на релевантність між станціями, що визначає входні ознаки моделей, аналізувати результати прогнозування стосовно отриманих помилок моделей відносно фактично отриманих значень. Функціональна можливість аналізу змін трафіку за станцією за забруднювачем як і забрудненості повітря за станцією за забруднювачем передбачає певне акумулювання даних (за місяцями, роками), в той час як моніторинг відповідних значень передбачає роботи з окремими значеннями, тобто фактично погодинні значення без акумуляції.

Для забезпечення створення програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту у вигляді вебсистеми використано фреймворк веброзробки Django [13]. Підхід на основі використання фреймворку уніфікує розробку з одного боку, а з іншого безпосередньо використання фреймворку Django дозволяє сумістити засоби мови програмування Python, що активно використовуються для роботи з даними, машинного навчання, зі створеним у підсумку вебзастосунком, при цьому супроводжуючи розробку відповідними готовими засобами для пришвидшення. Одним з цих засобів є Django ORM, що дозволяє визначати роботу з основними сутностями предметної області у вигляді моделей, а вже на основі коду моделей генерувати SQL-код для визначення структури бази даних, уникаючи фактичного дублювання цих дій.

Структура програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту (рис. 2) включає вебсистему на основі фреймворку Django та дві підсистеми, необхідні для роботи з моделями прогнозування: підсистеми засобів прогнозування трафіку транспортних засобів та концентрації діоксиду азоту в повітрі. У свою чергу ці підсистеми взаємодіють напряду зі спільним сховищем, що включає як результати їх роботи створені й навчені моделі та вибірки даних. Окрім того вони взаємодіють з базою даних у процесі створення вибірок даних та у процесі збереження результатів виконаного прогнозування на основі навчених моделей.

Логіка побудови вебсистеми на основі фреймворку Django представлена з точки зору взаємодії з користувачем. У свою чергу підсистеми засобів прогнозування трафіку транспортних засобів та концентрації діоксиду азоту в повітрі напряду з користувачем не взаємодіють, але можуть використовуватися розробниками у процесі роботи. Дані підсистеми також взаємодіють з представленнями вебсистеми у той момент, коли користувачі у відповідних ролях, для яких така функціональність доступна, ініціюють роботу з моделями, як це було розглянуто вище. Сама вебсистема має стандартну структуру для вебзастосунку Django, охоплюючи менеджер URL, представлення вебсистеми, які формують результати з шаблонів сторінок та моделей програмної системи, що взаємодіють безпосередньо з базою даних.

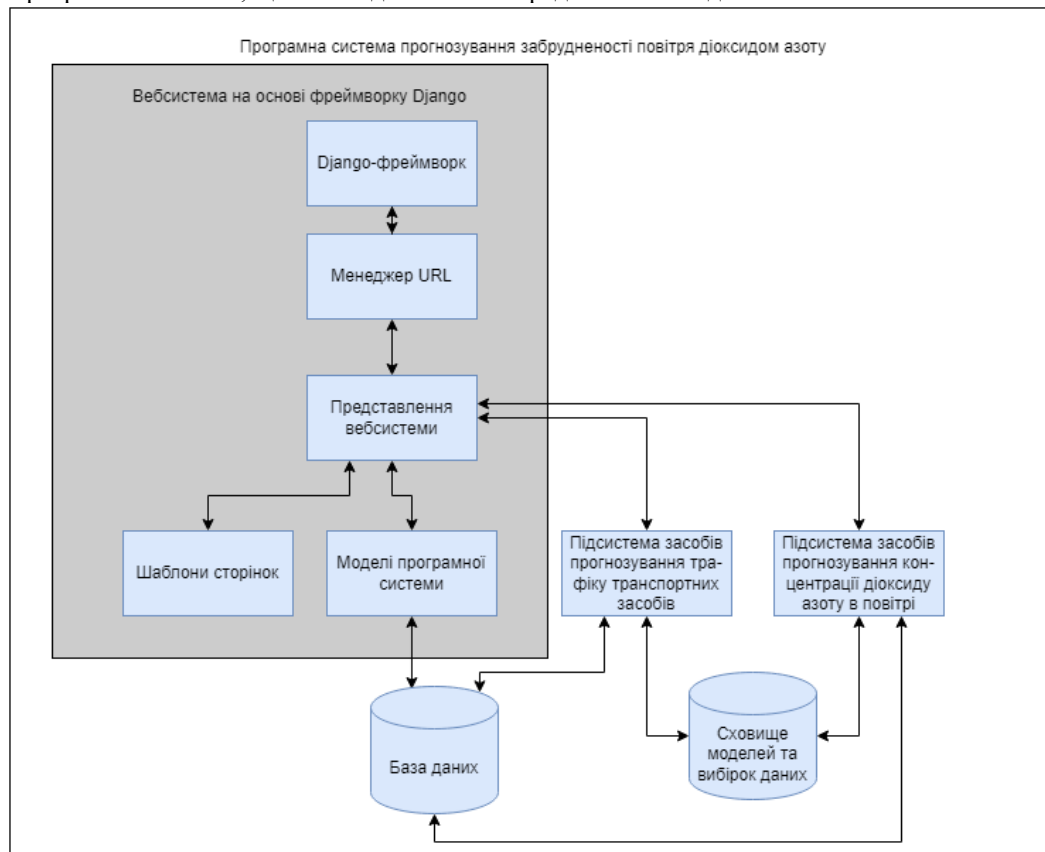


Рис. 2. Структура програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту

Оскільки в основі роботи програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту лежить робота з даними, то питання побудови бази даних та відповідних вибірок даних для навчання моделей є важливим. Така база даних повинна об'єднувати дані про трафік на місцевості та дані про забрудненість повітря діоксидом азоту й іншими забруднювачами. Врахування інших забруднювачів з одного боку пов'язано з тим, що для виконання функцій моніторингу наявність такої інформації може бути важливою, а з іншого боку з тим, що ці дані в подальшому можуть використовуватись для побудови моделей прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в якості додаткових вхідних ознак. Тому для проектування бази даних в підсумку було використано відповідні результати, представлені в роботі [5]. Створення бази даних забезпечено з застосуванням системи PostgreSQL. Результуюча структура бази даних програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту виходить зі структури, побудованої на основі відповідного коду моделей програмної системи у складі застосунку, створеного на основі вебфреймворку Django.

До складу бази даних входять таблиця `pollforecasterapp_trafficstation` з даними станцій моніторингу трафіку транспорту зі стовпцями ідентифікатора станції (`id`), умовного позначення (`mark`) та повної назви (`title`), координат за широтою (`latitude`) та довготою (`longitude`), таблиця `pollforecasterapp_pollutionstation` з даними станцій моніторингу забруднення повітря зі стовпцями ідентифікатора (`id`), умовного позначення (`mark`) та повної назви (`title`), координат за широтою (`latitude`) та довготою (`longitude`), доступності вимірювань забрудненості повітря діоксидом азоту за станцією (`no2measurement`), діоксидом сірки (`so2measurement`), озоном (`o3measurement`), монооксидом вуглецю (`comeasurement`), твердими частинками відповідних розмірів (`pm10measurement` і `pm25measurement`).

Результуюча база даних (рис. 3) у підсумку включає також такі таблиці:

- `pollforecasterapp_trafficstationpair` – таблиця з даними про релевантність даних станцій трафіку транспортних засобів, необхідних для побудови моделей прогнозування трафіку, зі стовпцями ідентифікатора запису (`id`), станції, для якої така модель будується (`station_source`), станції, дані про трафік за якою використовуються в якості вхідних ознак при побудові моделі (`station_pair`), позначки про актуальність цього зв'язку для побудови нових моделей (`active`), позначки часу створення пари (`time`);

- `pollforecasterapp_pollution` – таблиця з даними спостережень за концентрацією забруднювачів повітря зі стовпцями ідентифікатора вимірювання (`id`), станції вимірювання забруднювача (`pollutionstation`), часу вимірювання або часу, на який відбувається прогнозування (`pollution_time`), концентрації відповідного забруднювача (`concentration`), стану спостереження для позначення актуальності відповідного значення спостереження (`state`), позначки про отримання значення шляхом вимірювання або спостереження (`forecast`), позначки про час виконання самого прогнозування для випадків, коли було виконано не спостереження, а прогнозування (`forecast_time`), номеру самого забруднювача, для якого виконано вимірювання (`pollutant`);

- `pollforecasterapp_stationpair` – таблиця з даними про релевантність даних станцій трафіку транспортних засобів станціям спостереження за концентрацією забруднювачів повітря, необхідних для побудови моделей прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, зі стовпцями ідентифікатора запису (`id`), станції, для якої така модель будується (`pollutionstation`), станції, дані про трафік за якою використовуються в якості вхідних ознак при побудові моделі (`trafficstation`), позначки про актуальність цього зв'язку для побудови нових моделей (`active`), позначки часу створення пари (`time`);

- `pollforecasterapp_traffic` – таблиця з даними спостережень за трафіком транспорту зі стовпцями ідентифікатора вимірювання (`id`), станції (`trafficstation`), часу вимірювання або часу, на який відбувається прогнозування (`traffic_time`), кількості транспортних засобів в зазначений час за вказаною станцією (`vehicles`), стану спостереження для позначення актуальності відповідного значення (`state`), позначки про отримання значення шляхом вимірювання або спостереження (`forecast`), позначки про час виконання самого прогнозування для випадків, коли було виконано не спостереження, а прогнозування (`forecast_time`). Тривалість спостереження дорівнює годині як для трафіку, так і для концентрації забруднювача. За необхідності може змінюватись для всієї системи загалом, але повинна бути рівною для трафіку та концентрації забруднювача.

Для проведення експериментального дослідження (таблиця 1) було використано розроблену програмну систему прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту з використанням вибірок даних, сформованих на основі даних міста Мадрид з Порталу відкритих даних Мадридської міської ради [14]. Використані дані включали період з 1.01.2019 по 30.09.2022 стосовно трафіку та забрудненості повітря. Прогнозування було реалізовано на 6 годин вперед у 2 варіантах моделей. Перший варіант прогнозування забрудненості повітря виконував прогнозування на основі даних про забрудненість повітря діоксидом азоту за 6 попередніх годин. Другий варіант використовував додатково прогнозовані значення трафіку за відібраними для цього станціями у відповідності з методом [3]. При розгляді отриманих результатів було виділено як базовий показник середньоквадратичну похибку або Mean Squared Error (MSE). Особливу увагу було приділено розміру похибки сумарно за всі 6 годин та окремо за шосту годину, тобто за результатами прогнозування на 6 годин вперед (таблиця 1). Таке виділення в останньому випадку обумовлено тим, що при прийнятті рішень нерідко необхідно користуватися більш віддаленими значеннями. Відповідно, якщо ці результати погіршуються у використовуваному методі, то застосування його може бути недоцільним.

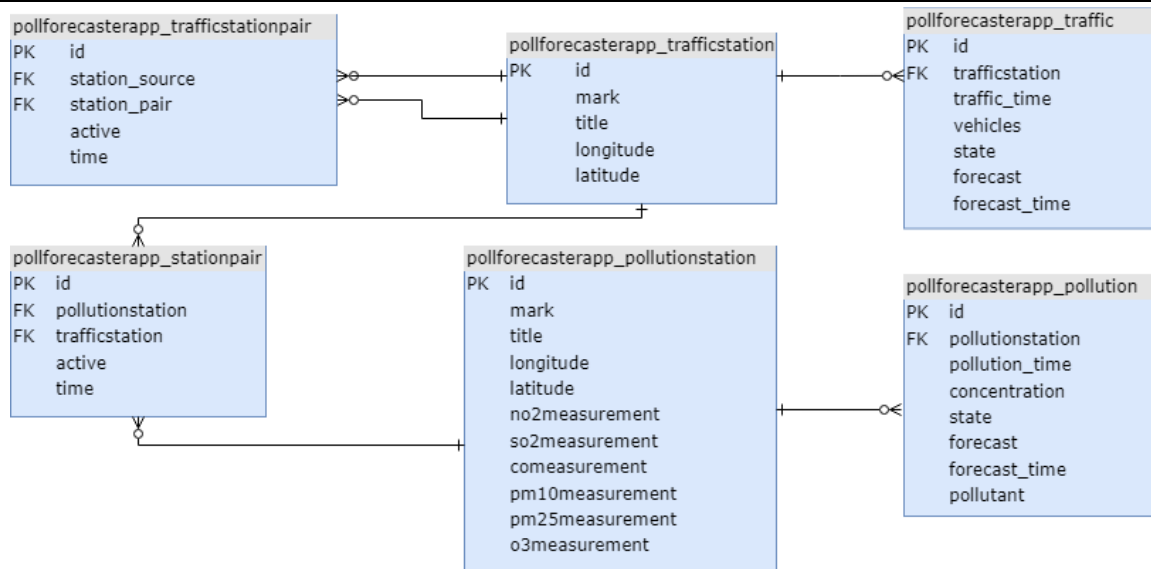


Рис. 3. Схема бази даних програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту

Отримані результати в підсумку вказують, що використання прогнозованого трафіку на основі інтегрованих відповідних моделей призвело до покращення в середньому в обох розглянутих випадках. Так сумарно покращення становило для MSE 6,35 %, а окремо для однієї години, що є шостою у часовому ряді, починаючи з точки прогнозування, – 5,44 %. Якщо розглядати отримані значення за окремими станціями замість сумарного значення, то найбільше покращення становило для всіх 6 годин – 13,42 %, а для шостої години – 11,41 %. Такі результати підтверджують доцільність застосування моделей прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту з інтегрованими до їх складу моделями прогнозування трафіку транспортних засобів. При цьому важливим є створення програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, здатної підтримати відповідну функціональність на основі інтеграції моделей та надання можливості гнучкої взаємодії користувачів з програмною системою та програмної системи з моделями прогнозування.

Таблиця 1

## Результати прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту за станціями

| Назва станції        | MSE                        |              |                                                  |              |
|----------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------------------------|--------------|
|                      | Історичні дані забруднення |              | Історичні дані забруднення, прогнозовані трафіку |              |
|                      | Усі 6 годин                | Шоста година | Усі 6 годин                                      | Шоста година |
| Plaza de Espana      | 0,002471152                | 0,003146899  | 0,002776583                                      | 0,003885312  |
| Escuelas Aguirre     | 0,002631159                | 0,003450747  | 0,002448932                                      | 0,003324651  |
| Ramon y Cajal        | 0,004893444                | 0,006612738  | 0,004726907                                      | 0,006040059  |
| Arturo Soria         | 0,003384407                | 0,004742844  | 0,003565546                                      | 0,004489723  |
| Villaverde           | 0,008496022                | 0,011729933  | 0,0077234                                        | 0,010691613  |
| Farolillo            | 0,005257705                | 0,006864586  | 0,005146064                                      | 0,006974168  |
| Casa de Campo        | 0,004635772                | 0,006047303  | 0,004033936                                      | 0,005301647  |
| Barajas Pueblo       | 0,005710296                | 0,007476568  | 0,005275771                                      | 0,00710227   |
| Plaza del Carmen     | 0,005608928                | 0,007556614  | 0,005055268                                      | 0,006833824  |
| Moratalaz            | 0,004842693                | 0,006243336  | 0,00431842                                       | 0,005830663  |
| Cuatro Caminos       | 0,005038617                | 0,006567383  | 0,004878755                                      | 0,00639022   |
| Barrio del Pilar     | 0,007089396                | 0,009239332  | 0,006210104                                      | 0,008184711  |
| Vallecas             | 0,00608384                 | 0,007543018  | 0,005887652                                      | 0,00727197   |
| Mendez Alvaro        | 0,008120113                | 0,010585241  | 0,007361113                                      | 0,010016024  |
| Castellana           | 0,006213621                | 0,008107761  | 0,005691623                                      | 0,007426178  |
| Parque del Retiro    | 0,005041478                | 0,006521834  | 0,005169415                                      | 0,006587308  |
| Plaza Castilla       | 0,005422632                | 0,006906461  | 0,005183627                                      | 0,006708275  |
| Ensanche de Vallecas | 0,002502804                | 0,00316588   | 0,002462233                                      | 0,00309191   |
| Urb. Embajada        | 0,004601715                | 0,006078769  | 0,004263475                                      | 0,005740848  |
| Plaza Elíptica       | 0,0041184                  | 0,00515475   | 0,004080536                                      | 0,005387759  |
| Sanchinarro          | 0,007506579                | 0,009481791  | 0,007374921                                      | 0,009093485  |
| El Pardo             | 0,003708257                | 0,004846983  | 0,003210723                                      | 0,004366339  |
| Juan Carlos I        | 0,00553583                 | 0,007395917  | 0,004830851                                      | 0,006647348  |
| Tres Olivos          | 0,005414617                | 0,007085988  | 0,004760832                                      | 0,006326942  |
| Середнє значення     | 0,005180395                | 0,006773028  | 0,004851529                                      | 0,006404719  |

### Висновки

Застосування програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в умовах інтегрованого середовища є важливим завданням, розв'язання якого здатне перенести у практичну площину процес прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту на основі відповідних теоретичних досліджень, при цьому забезпечуючи необхідний для складних систем ступінь інтегрованості. Підвищення ступеня інтегрованості необхідне для зменшення вимог до ресурсів.

У даній роботі описано процес створення програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, яка здатна підвищений ступінь інтегрованості забезпечити. Для цього використано підхід на основі використання фреймворків, який забезпечує уніфікацію, дозволяє інтегрувати до складу вебсистеми можливості підсистем засобів прогнозування трафіку транспортних засобів та концентрації діоксиду азоту в повітрі, які також можуть використовуватися і окремо при повторному використанні коду за необхідності, зокрема при розв'язанні цих задач окремо. Програмну систему створено за допомогою фреймворку веброзробки Django. На основі розробленої програмної системи прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту проведено ряд експериментів, які підтвердили зменшення помилки MSE в умовах прогнозування на 6 годин вперед за рахунок використання прогнозованих значень трафіку як при розгляді всього горизонту прогнозування у 6 годин, так і у розрізі окремо останньої, шостої, години. Сумарно MSE зменшено на 6,35 %, а за останньою годиною – на 5,44 %.

### Література

1. Olmos-Guerrero, H. A. Exploring the significance of temporal, meteorological, and previous states parameters in PM2.5 concentration predictions : a neural network sensitivity study for Aguascalientes, Mexico / H. A. Olmos-Guerrero, P. T. Rodriguez-Gonzalez, R. Rico-Martinez // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2025. – Volume 11, Issue 3. – Article 163.
2. Liu, Y. Deep Aggregation seq2seq Network With Time Feature Fusion for Air Pollutant Concentration Prediction in Smart Cities / Y. Liu // *Engineering Reports*. – 2025. – Volume 7, Issue 2. – Article e70031. – DOI : 10.1002/eng2.70031.
3. Льовкін, В. М. Використання принципів системного аналізу при розробці інтегрованого середовища прогнозування забрудненості повітря / В. М. Льовкін // *Системні технології*. – 2024. – № 1. – С. 16-24. – DOI : 10.34185/1562-9945-1-150-2024-02.
4. Setiawan, I. Time series air quality forecasting with R Language and R Studio / I. Setiawan // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Applied Science and Technology (iCAST on Engineering Science)* 24–25 October 2019, Bali, Indonesia. – 2020. – Volume 1450. – Article 012064. – DOI : 10.1088/1742-6596/1450/1/012064.
5. Льовкін, В. Особливості програмування алгоритмів і структур даних при прогнозуванні автомобільного трафіку / В. Льовкін // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки*. – 2024. – № 1 (331). – С. 252-258. – DOI : 10.31891/2307-5732-2024-331-38.
6. Uluocak, I. Atmospheric NO2 concentration prediction with statistical and hybrid deep learning methods / I. Uluocak, E. Pinar, M. Bilgili // *Environmental and Ecological Statistics*. – 2025. – Volume 32, Issue 1. – Pp. 89 – 118. – DOI : 10.1007/s10651-024-00637-3.
7. Comparison Between LSTM, GRU and VARIMA in Forecasting of Air Quality Time Series Data / Yu Nie Ng, Han Ying Lim, Ying Chyi Cham, Mohd Aftar Abu Bakar, Noratiqah Mohd Ariff // *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2024. – Volume 20, Issue 6. – Pp. 1248-1260. – DOI : 10.11113/mjfas.v20n6.3411.
8. Raj, S. Hybrid graph convolutional LSTM model for spatio-temporal air quality transfer learning / S. Raj, J. Smith, E. Hayes // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2025. – DOI : 10.1007/s11869-025-01713-8.
9. Mo, J. Improving the performance of random forests model in daily-scale ozone pollution prediction by integrating upwind spatial information / J. Mo, Z. Yuan // *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*. – 2024. – Volume 44, Issue 11. – Pp. 39-49. – DOI : 10.13671/j.hjkxxb.2024.0188.
10. Rath, S. Air Pollution Forecasting using Machine Learning with Temporal Fusion Transformer and Graph Neural Networks / S. Rath, P. Manesha // *3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things, IDCIoT 2025*. – Bengaluru, 2025. – Pp. 1798-1803. – DOI : 10.1109/IDCIOT64235.2025.10914714.
11. An Improved Hybrid GC-LSTM Framework for Hourly Nowcasting of Ground-Level NO2 Concentrations over Beijing-Tianjin-Hebei Region / Z. Han, M. Fan, S. Song // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2025. – Volume 63. – Article 4100614. – DOI : 10.1109/TGRS.2024.3514158.
12. Iskandaryan, D. Reconstructing secondary data based on air quality, meteorological and traffic data considering spatiotemporal components / Ditsuhi Iskandaryan, Francisco Ramos, Sergio Trilles // *Data in Brief*. – 2023. – Volume 47. – Article 108957. – DOI : 10.1016/j.dib.2023.108957.
13. The web framework for perfectionists with deadlines Django [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.djangoproject.com/> – (Дата звернення 10.05.2025). – Назва з екрана.
14. En portada – Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid [Електронний ресурс]. – Режим

доступу : <https://datos.madrid.es/portal/site/egob> – (Дата звернення 10.05.2025). – Назва з екрана.

## References

1. Olmos-Guerrero, H. A. Exploring the significance of temporal, meteorological, and previous states parameters in PM2.5 concentration predictions: a neural network sensitivity study for Aguascalientes, Mexico / H. A. Olmos-Guerrero, P. T. Rodriguez-Gonzalez, R. Rico-Martinez // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2025. – Volume 11, Issue 3. – Article 163.
2. Liu, Y. Deep Aggregation seq2seq Network With Time Feature Fusion for Air Pollutant Concentration Prediction in Smart Cities / Y. Liu // *Engineering Reports*. – 2025. – Volume 7, Issue 2. – Article e70031. – DOI : 10.1002/eng2.70031.
3. Lovkin, V. Application of the principles of systems analysis for the development of environment for integrated air pollution forecasting / V. Lovkin // *System technologies*. – 2024. – № 1. – Pp. 16-24. – DOI : 10.34185/1562-9945-1-150-2024-02.
4. Setiawan, I. Time series air quality forecasting with R Language and R Studio / I. Setiawan // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Applied Science and Technology (iCAST on Engineering Science)* 24–25 October 2019, Bali, Indonesia. – 2020. – Volume 1450. – Article 012064. – DOI : 10.1088/1742-6596/1450/1/012064.
5. Lovkin, V. Features of Programming Algorithms and Data Structures for Traffic Forecasting / V. Lovkin // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2024. – № 1 (331). – Pp. 252-258. – DOI : 10.31891/2307-5732-2024-331-38.
6. Uluocak, I. Atmospheric NO2 concentration prediction with statistical and hybrid deep learning methods / I. Uluocak, E. Pinar, M. Bilgili // *Environmental and Ecological Statistics*. – 2025. – Volume 32, Issue 1. – Pp. 89 – 118. – DOI : 10.1007/s10651-024-00637-3.
7. Comparison Between LSTM, GRU and VARIMA in Forecasting of Air Quality Time Series Data / Yu Nie Ng, Han Ying Lim, Ying Chyi Cham, Mohd Aftar Abu Bakar, Noratiqah Mohd Ariff // *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2024. – Volume 20, Issue 6. – Pp. 1248-1260. – DOI : 10.11113/mjfas.v20n6.3411.
8. Raj, S. Hybrid graph convolutional LSTM model for spatio-temporal air quality transfer learning / S. Raj, J. Smith, E. Hayes // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2025. – DOI : 10.1007/s11869-025-01713-8.
9. Mo, J. Improving the performance of random forests model in daily-scale ozone pollution prediction by integrating upwind spatial information / J. Mo, Z. Yuan // *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*. – 2024. – Volume 44, Issue 11. – Pp. 39-49. – DOI : 10.13671/j.hjkxxb.2024.0188.
10. Rath, S. Air Pollution Forecasting using Machine Learning with Temporal Fusion Transformer and Graph Neural Networks / S. Rath, P. Maneesha // *3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things, IDCIoT 2025*. – Bengaluru, 2025. – Pp. 1798-1803. – DOI : 10.1109/IDCIOT64235.2025.10914714.
11. An Improved Hybrid GC-LSTM Framework for Hourly Nowcasting of Ground-Level NO2 Concentrations over Beijing-Tianjin-Hebei Region / Z. Han, M. Fan, S. Song // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2025. – Volume 63. – Article 4100614. – DOI : 10.1109/TGRS.2024.3514158.
12. Iskandaryan, D. Reconstructing secondary data based on air quality, meteorological and traffic data considering spatiotemporal components / Ditsuhi Iskandaryan, Francisco Ramos, Sergio Trilles // *Data in Brief*. – 2023. – Volume 47. – Article 108957. – DOI : 10.1016/j.dib.2023.108957.
13. The web framework for perfectionists with deadlines Django [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://www.djangoproject.com/> – (Data zvernennia 10.05.2025). – Nazva z ekrana.
14. En portada – Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <https://datos.madrid.es/portal/site/egob> – (Data zvernennia 10.05.2025). – Nazva z ekrana.