

АНОТАЦІЯ

Сінькевич О.О. Оптимізація функціонування інтелектуальних об'єктів з використанням методів машинного навчання. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». — Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2023.

Проблеми оптимізації функціонування інтелектуальних об'єктів визначають широкий клас задач, який охоплює як реальні апаратні комплекси, що забезпечують виробничі процеси, так і відповідне їм програмне забезпечення. Програмування таких комплексів в контексті задання оптимальних режимів роботи потребує вирішення задач стабільної апаратно-програмної інтеграції та розроблення ефективних алгоритмів для їх функціонування. Еволюція наявних мікрокомп'ютерних та мікроконтролерних технологій, які становлять “розумну” основу більшості інтелектуальних об'єктів зумовлює потребу в постійному вдосконаленні вже існуючих програмних засобів та їх адаптації під нові платформи. При цьому, зі зростанням вимог до таких інтелектуальних об'єктів підвищується і складність щодо проектування та реалізації програмного забезпечення.

Використання машинного навчання при створенні програмних засобів для інтелектуальних об'єктів стає все більш поширеною практикою, оскільки дозволяє реалізовувати гнучкі та різноманітні моделі прогнозування стану об'єкта, його динамічного самонавчання (навчання з підкріпленням) або даних, що дозволяють продуктивніше використовувати робочу систему. Прикладом такого роду інтелектуального об'єкту, функціонування якого можна забезпечувати та оптимізувати методами машинного навчання, є інтелектуальний будинок. У дисертації основна увага приділена розробці та удосконаленню прототипу апаратно-програмного комплексу для аналізу та обробки

даних інтелектуального будинку, в межах чого здійснена інтеграція мікрокомп'ютерної та нейроконтролерної систем з відкритим програмним забезпеченням, яке ґрунтується на використанні сучасних підходів глибокого навчання, техніки MLOPS і REST архітектури.

Проведений аналіз наукових публікацій та відкритих джерел у тематиці інтелектуальних будинків продемонстрував, що зараз існує недостатньо рішень щодо апаратно-програмних систем, функціонування яких не залежить від хмарних технологій та доступу до глобальної мережі Інтернет. Також, не у повній мірі розкриті прикладні архітектурні концепції із залученням моделей глибокого навчання та граничних (edge) чи туманних (fog) обчислень, розподілених мікроконтролерних систем, які підтримують вбудовування й розгортання згаданих моделей. У зв'язку із цим завданням дисертаційної роботи є доповнення та розширення знань у предметній області проектування прототипу мікроконтролерної системи обробки даних інтелектуального будинку в контексті граничних обчислень у поєднанні з машинним навчанням, статистичними методами та практиками побудови прикладних програмних інтерфейсів (API).

Оскільки у більшості випадків функціонування інтелектуального будинку стосується оптимізації енерговитрат та встановленню зручних кліматичних умов для мешканців, у якості даних для розробки і досліджень були вибрані показники температур та споживання енергії. Проте, розроблені у роботі моделі та, загалом, програмне забезпечення можна розширити шляхом додавання інших кліматичних вимірювань: вологість повітря, кількість сонячних днів тощо.

Окремим та не менш важливим компонентом у проектуванні систем керування інтелектуальним будинком є врахування теплофізичних процесів, які описуються відповідними динамічними рівняннями теплопереносу у приміщенні. Розв'язування таких рівнянь на основі даних, накопичених типовими сенсорами (датчиками температур DS18B20, DHT22; датчиком споживання газу Smartico, або електроенергії Emporia) дозволяє як моделювати теплові процеси, так і використовувати

їх розв'язки для уточнення прогнозування споживання енергії. Оскільки огляд наявних публікацій та комерційних рішень у контексті застосування теплофізичного моделювання та його поєднання з методами машинного навчання показав достатньо незначну кількість впроваджень таких систем, постає актуальною розробка даних методик. Відтак, у дисертації запропоновано підходи у застосуванні теплофізичного моделювання до оцінки теплофізичних характеристик будівель.

У першому розділі дисертаційної роботи розглянуто проблематики створення систем інтелектуального будинку, які здебільшого базуються на граничних та туманних обчисленнях; дано розширене визначення інтелектуального будинку та визначено актуальні проблеми його проєктування. Через те, що використання хмарних технологій зумовлює низку проблем, які стосуються приватності та безпеки даних, високої ціни, наявністю мережевих затримок й вимогою до постійного зв'язку по глобальній мережі Інтернет для забезпечення відклику системи в реальному часі, актуалізується потреба в розробці недорогих та ефективних рішень на базі локальних (граничних) систем.

Проаналізовані сучасний стан та аспекти граничних обчислень для інтелектуального будинку, що ґрунтуються на мікрокомп'ютерах Raspberry Pi 3 та мікроконтролерах Arduino. Розглянута пошарова апаратна схема побудови такої системи інтелектуального будинку та характеристики мікроконтролерів серії STM32 F/H, які можна використовувати як граничний пристрій у такій системі. Оскільки вони підтримуються пакетом розширення X-CUBE-AI, це дозволяє легко розгорнути навчені моделі машинного навчання. Також, розглянуті актуальні засоби та підходи до обробки сенсорних даних в межах регресійних та нейромережевих моделей, останні з яких можна вбудовувати у мікроконтролери з метою прогнозування. Використання отриманого прогнозу дозволяє оптимізувати режими роботи пристроїв обігріву, або виявляти аномальні надходження з сенсорів, під'єднаних до мікроконтролера з розгорнутою нейронною мережею.

Для забезпечення гнучкого розгортання нейромережевих моделей, проведений огляд та аналіз автоматизованих засобів циклу обробки даних — навчання та валідації нейронної мережі — вбудовування нейромережі на мікроконтролер з одночасним її розгортанням на мікрокомп'ютері, що становить собою центральний обчислювальний хаб запропонованого прототипу апаратно-програмного комплексу.

У другому розділі дисертаційної роботи описано дані, які використовуються у моделюванні та тестуванні системи. До цих даних належить відкрита база вимірювань кліматичних й енергетичних показників REFIT, що містить температури та показники споживання енергії у 20 інтелектуальних будинках та вимірювання температур, здійснених у лабораторії інтелектуальних автономних систем факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка за період з 1 лютого 2021 року по 1 вересня 2021 року. Для обробки цих даних розглянуті та реалізовані алгоритми виявлення викидів та аномалій (STL-декомпозиція, метод ізольованого лісу); проведений статистичний аналіз та побудовані регресійні моделі: а) зовнішніх та внутрішніх температур; б) споживання газу та температур на поверхнях батарей та в) зовнішньою, внутрішньою температури та температури на обігрівальних елементах, результати яких можна використовувати для прогнозу та аналізу зв'язків між вимірюваннями. Виявлено, що кут нахилу прямої регресії пов'язаний із теплофізичними характеристиками будинку.

Запропоновано підхід до дезагрегації даних споживання газу на основі кластерного аналізу, метою якого є виділення конкретних споживачів газу з сумарних (агрегованих) даних.

Для побудови нейромережевих прогностичних моделей температур детально описаний процес підготовки та перетворення даних та розглянуті актуальні архітектури рекурентних та гібридно-згорткових нейронних мереж, на основі яких реалізовані відповідні моделі. Сформульована задача оптимізації гіперпараметрів спроектованих

нейромереж, розв'язування якої здійснено за допомогою генетичного алгоритму. Здійснений аналіз результатів та підбір оптимальної архітектури для розгортання на мікроконтролері STM32.

Третій розділ дисертації присвячений апаратно-програмній реалізації прототипу комплексу для аналізу та обробки даних інтелектуального будинку. В якості апаратної платформи були обрані мікрокомп'ютер Nvidia Jetson Nano, що має достатні потужності для центрального обчислювального хабу і навчання нейромереж, та високопродуктивний мікроконтролер STM32 F767. Останній є базою первинних граничних обчислень завдяки розгорнутій на ньому нейронній мережі. При під'єднанні до нього датчиків температур, нейроконтролер може здійснювати короткотермінове прогнозування у реальному часі для порівняння з даними, що надходять на нього (випадок виявлення аномалій), чи використовуватися як окремий прогностичний модуль для оптимізації параметрів обігріву приміщення.

Програмна частина (створена мовою програмування Python 3) даного прототипу складається з REST API, що огортає базу даних з вимірюваннями SQLite, модулі статистичної обробки та нейромережевого моделювання, систему для організації конвеєру MLOPS — Mlflow, оркестратор Apache Airflow, що відстежує виконання усіх кроків конвеєру та модуль комунікації з нейроконтролером на базі TCP сокетів.

У четвертому розділі запропонована методика застосування теплофізичних моделей у поєднанні з даними температур та споживання газу для наближеної оцінки ефективних коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності будівлі. Обчислення таких параметрів відбувається на основі розв'язків прямої та оберненої задач шляхом формулювання проблеми оптимізації функціоналу, який визначає різниця між обчисленими та реальними температурами у приміщенні відносно теплофізичних коефіцієнтів. Також, у межах задачі теплопереносу розроблена математична модель оцінки ефективних теплових параметрів індивідуальних джерел обігріву, які можна використовувати як для задач

прогнозування споживання, так і для визначення частини від сумарної енергії обігріву, яка споживається конкретним обігрівальним елементом.

Ключові слова: розумний будинок, машинне навчання, глибоке навчання, граничні обчислення, регресійні моделі, рекурентні нейронні мережі, теплофізичне моделювання, математичне моделювання, нейроконтролер, REST API, STM32, Nvidia Jetson Nano, об'єктно-орієнтоване програмування.

ABSTRACT

Sinkevich O.O. Optimization of the functioning of intelligent objects using machine learning methods. — Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Ph.D in specialty 122 "Computer Science". — Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2023.

The problems of optimizing the functioning of intelligent objects determine a wide class of problems, which includes both hardware complexes that provide production processes and their corresponding software. Programming of such complexes in the context of setting optimal operating modes requires solving the problems of stable hardware and software integration and developing effective algorithms for their operation. The evolution of existing microcomputer and microcontroller technologies, which constitute the "intelligent" basis of most intelligent objects, necessitates the need for constant improvement of already existing software tools and their adaptation to new platforms. At the same time, as the requirements for such intelligent objects grow, so does the complexity of software design and implementation.

The use of machine learning in the creation of software tools for intelligent objects is becoming an increasingly common practice, as it allows the implementation of flexible and diverse models for predicting the state of the object, its dynamic self-learning (reinforcement learning) or data that allow more productive use of the working system. An example of this kind of intelligent object, the functioning of which can be ensured and optimized by machine learning methods, is a smart home. In the dissertation, the main attention is paid to the development and improvement of the prototype of the hardware and software complex for the analysis and processing of smart home data, within which the integration of microcomputer and neurocontroller systems with open software, which is based on the use of modern deep

learning approaches, MLOPS techniques and REST architecture, is carried out.

The analysis of scientific publications and open sources on the topic of intelligent buildings showed that at the moment there is a lack of solutions for hardware and software systems, the functioning of which does not depend on cloud technologies and access to the global Internet. Also, applied architectural concepts involving deep learning models and edge or fog computing, distributed microcontroller systems that support embedding and deployment of the mentioned models are not fully disclosed. Therefore, the task of the dissertation consists in supplementing and expanding knowledge in the subject area of designing a prototype of a microcontroller data processing system of an intelligent house in the context of boundary computing in combination with machine learning, statistical methods and practices of building application programming interfaces (API).

Since in most cases the functioning of an intelligent house concerns the optimization of energy consumption and the establishment of comfortable climatic conditions for residents, temperature indicators and energy consumption were selected as data for development and research. However, the models developed in the paper and the software in general can be extended by adding other climate measurements, such as air humidity, number of sunny days, etc.

A separate and important component in the design of intelligent building control systems is the consideration of thermophysical processes, which are described by the corresponding dynamic equations of heat transfer in the room. Solving such equations on the basis of data collected by typical sensors (temperature sensors DS18B20, DHT22; Smartico gas consumption sensor, or Emporia electricity consumption sensor) allows modeling both thermal processes and using their solutions to refine energy consumption forecasting. Since the review of available publications and commercial solutions in the context of the application of thermophysical modeling and its combination with machine learning methods showed a fairly small number of

implementations of such systems, the development of these methods becomes relevant. Therefore, the dissertation offers approaches in the application of thermophysical modeling to the assessment of thermophysical characteristics of buildings.

In the first chapter of the dissertation, an overview of the problems of creating intelligent home systems, which are mostly based on boundary and fuzzy calculations; an extended definition of an intelligent building is given and the actual problems of its design are identified. Due to the fact that the use of cloud technologies causes a number of problems related to data privacy and security, high price, the presence of network delays, and the requirement for constant communication over the global Internet to ensure real-time system response, the need for the development of inexpensive and effective solutions based on local (boundary) systems.

The current state and aspects of edge computing for the intelligent home, based on Raspberry Pi 3 microcomputers and Arduino microcontrollers, are analyzed. The layer-by-layer hardware scheme of building such an intelligent home system and the characteristics of STM32 F/H series microcontrollers, which can be used as an edge device in such a system, are considered. Since they are supported by the X-CUBE-AI extension package, it makes it easy to deploy trained machine learning models. Also, current means and approaches to sensor data processing within regression and neural network models are considered, the latter of which can be built into microcontrollers for the purpose of forecasting. Using the obtained forecast allows you to optimize the operating modes of heating devices, or detect abnormal inputs from sensors connected to a microcontroller with a deployed neural network.

To ensure the flexible deployment of neural network models, a review and analysis of automated data processing cycle tools — neural network training and validation — neural network embedding on a microcontroller with simultaneous deployment on a microcomputer, which is the central

computing hub of the proposed hardware and software complex prototype, was conducted.

The second chapter of the dissertation describes the data used in modeling and testing the system. These data include the REFIT open database of measurements of climate and energy indicators, which contains temperatures and energy consumption indicators in 20 intelligent houses and temperature measurements carried out in the laboratory of intelligent autonomous systems of the Faculty of Electronics and Computer Technologies of the Ivan Franko National University of Lviv in the period from February 1, 2021 to September 1, 2021. Algorithms for detecting emissions and anomalies (STL-decomposition, isolated forest method) were considered and implemented to process these data; statistical analysis was carried out and regression-correlation models of a) external and internal temperatures were built; b) gas consumption and battery surface temperatures and c) external, internal and heating element temperatures, the results of which can be used for forecasting and analysis of relationships between measurements. It was found that the slope angle of the regression line is related to the thermophysical characteristics of the house.

An approach to the disaggregation of gas consumption data based on cluster analysis is proposed, the purpose of which is to select specific gas consumers from aggregated (aggregated) data.

For the construction of neural network prognostic temperature models, the process of data preparation and transformation is described in detail, and current architectures of recurrent and hybrid-convolutional neural networks, on the basis of which the corresponding models are implemented, are considered. The problem of hyperparameter optimization of designed neural networks is formulated, the solution of which is implemented using a genetic algorithm. Analysis of the results and selection of the optimal architecture for deployment on the STM32 microcontroller was carried out.

The third section of the dissertation is devoted to the hardware and software implementation of the complex prototype for analyzing and

processing data of an intelligent building. As a hardware platform, the Nvidia Jetson Nano microcomputer, which has sufficient power to serve as a central computing hub and to train neural networks, and a high-performance STM32 F767 microcontroller were chosen. The latter serves as the basis of primary boundary calculations thanks to the neural network deployed on it. When temperature sensors are connected to it, the neurocontroller can make short-term predictions in real time for comparison with the data coming to it (in case of anomaly detection), or be used as a separate predictive module to optimize room heating parameters.

The software part (created in the Python 3 programming language) of this prototype consists of a REST API wrapping a database with SQLite measurements, modules for statistical processing and neural network modeling, a system for organizing the MLOPS pipeline — Mlflow, an Apache Airflow orchestrator that monitors the execution of all pipeline steps and a communication module with a neurocontroller based on TCP sockets.

In the fourth chapter, a method of applying thermophysical models in combination with temperature and gas consumption data is proposed for an approximate estimation of the effective coefficients of thermal conductivity and thermal capacity of the building. Calculation of such parameters takes place on the basis of solutions of direct and inverse problems by formulating the problem of optimization of the functional, which determines the difference between the calculated and real temperatures in the room relative to the sought coefficients. Also, within the framework of the heat transfer problem, a mathematical model for estimating the effective thermal parameters of individual heating sources has been developed, which can be used both for consumption forecasting tasks and for determining the part of the total heating energy consumed by a specific heating element.

Keywords: smart home, machine learning, deep learning, edge computing, regression models, recurrent neural networks, thermophysical modeling, mathematical modeling, neurocontroller, REST API, STM32, Nvidia Jetson Nano, object-oriented programming.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. публікації у фахових виданнях України:

1. Sinkevych O. Statistical Analysis of the Thermal Parameters of Smart Homes / O. Sinkevych, L. Monastyrskii, B. Sokolovskyi // Electronics and Information Technologies. – 2018. – No. 10. – P. 99–108.
2. Sinkevych O. Gas Disaggregation Approach Based on Cluster Analysis / O. Sinkevych, L. Monastyrskii, B. Sokolovskii, Ya. Boyko // Computer Technologies of Printing. – 2019. – Vol.- 41 (1). – P. 23-33.
3. Sinkevych O. Estimation of effective thermal parameters of heating sources based on dynamic measurments in smart home / O. Sinkevych, L. Monastyrskii, B. Sokolovskii, Ya. Boyko // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: "Computer systems of design. Theory and practice – 2020 – No. 1(1). – P.–58-66.
4. Sinkevych O. Development of neuro-controller based on STM 32 / O. Sinkevych, L. Monastyrskii, B. Sokolovskii, Ya. Boyko // Electronics and Information Technologies. – 2020. – No. 13. – P. 118–125.
5. Sinkevych O. Low complexity recurrent neural networks for edge computing / O. Sinkevych // Electronics and Information Technologies. – 2021. – No. 16. – P. 11–19.
6. Sinkevych O. MLOPS prototype of AI system for edge computing / O. Sinkevych. Ya. Boyko, L. Monastyrskyy // Electronics and Information Technologies. – 2022. – No. 17. – С. 74–83.
7. Сінькевич О. Регресійні моделі для аналізу даних інтелектуального будинку / О. Сінькевич // Електроніка та інформаційні технології. – 2022. – Вип. 20. – С. 62–73.

2. публікації у виданнях, які проіндексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus:

1. Estimation of smart home thermophysical parameters using dynamic series of temperature and energy data / Oleh Sinkevych [et al.] // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2–6 July 2019. P. 934-937.
2. Algorithm of tuning heating source thermophysical parameters in smart home / Oleh Sinkevych [et al.] // 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine, 22–26 April 2020. P. 9-12.
3. Embedding sequence model in STM32 based neuro-controller / Oleh Sinkevych [et al.] // 2021 IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), Lviv, Ukraine, 19–21 March 2021. P. 113-118.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Sinkevych O. Determination of Regression Parameters for the Thermal and Energy Components of Smart Homes / O. Sinkevych, L. Monastyrskyi, B. Sokolovskyi // International Scientific and Practical Conference "Electronics and Information Technologies" (ELIT-2018). A-92 A-95. 2018.
2. Сінькевич О. Встановлення кореляційних зв'язків між тепловими параметрами розумних будинків / О. Сінькевич, Л. Монастирський, Б. Соколовський // Матеріали Міжнародної наукової конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2018". – Н13.
3. Cluster analysis of smart home energy time series / Олег Сінькевич [та ін.] // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції "Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і

комп'ютерних технологій” присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я. І. Проця, 2019. – С. 237–240.

4. Sinkevych O. Dynamic approach to identification of smart home thermophysical parameters / Oleh Sinkevych // International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics “HEUREKA-2019”, 14-16 May 2019. – II.
5. Sinkevych O. To the modeling of smart home heating behavior / Oleh Sinkevych // International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics “HEUREKA-2020”, 6-7 October. 2020. – G7.
6. Sinkevych O. Genetic hyper-parameters optimization for STM32 deep learning model / Oleh Sinkevych, Oleksandr Rechynskyi // International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics “HEUREKA-2021”, 18-20 May 2021. – G10.
7. Пат. № 140565 Україна, МПК G01N 25/20, G01N 27/18, G06F 15/00. Спосіб визначення теплофізичних характеристик архітектурних споруд / Монастирський Л. С., Соколовський Б. С., Сінькевич О. О., Оленич І. Б. Заявник і власник – Львівський національний університет імені Івана Франка. – № u201905725; заявл. 27.05.2019; опубл. 10.03.2020 р. Бюл. № 5.