

І.О. Казарова

*Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖИ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ТЕС ВІДПОВІДНО АРХИТЕКТУРИ «SENSOR-CLOUD»

Розглянуто особливості застосування сенсорних мереж у системах моніторингу об'єктів теплової енергетики. Проведено оцінку алгоритмів автоматизованого керування сенсорними мережами теплових електростанцій відповідно показників точності роботи з вхідними даними датчиків та зменшення рівня навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи. Розроблено методіку побудови, налаштування та оптимізації алгоритмів машинного аналізу та організації роботи сенсорної мережі організованої відповідно до концепції «Інтернету речей». Проведено моделювання системи контролю сенсорної мережі на основі математичного апарату, що визначає області та підобласті граничних вузлів. Вказано на пріоритет застосування у зазначеній галузі жадібних алгоритмів для вибіркової активації вузлів сенсорної мережі. Запропонований метод надає можливість визначити межі контрольних об'єктів моделі інфраструктури теплової електростанції відповідно до вхідних даних, що надходять від датчиків активованих вузлів сенсорної мережі. Показано, що розроблена математична модель дозволяє досягти високих показників точності виявлення змін у режимі роботи контрольних об'єктів інфраструктури теплової електростанції за умов зменшення навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи.

Ключові слова: теплова електростанція, сенсорна мережа, жадібний алгоритм, об'єкт діагностування, обчислювальний ресурс, «Інтернет речей», архітектура «Sensor-Cloud».

И.А. Казарова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ТЕПЛОВЫХ СЕНСОРОВ ТЭС СООТВЕТСТВИИ АРХИТЕКТУРЫ «SENSOR-CLOUD»

Рассмотрены особенности применения сенсорных сетей в системах мониторинга объектов тепловой энергетики. Проведена оценка алгоритмов автоматизированного управления сенсорными сетями тепловых электростанций в соответствии показателей точности работы с входными данными датчиков и уменьшение уровня нагрузки на вычислительный ресурс аппаратно-программной платформы. Разработана методика построения, настройки и оптимизации алгоритмов машинного анализа и организации работы сенсорной сети организованной в соответствии с концепцией «Интернета вещей». Проведено моделирование системы контроля сенсорной сети на основе математического аппарата, которая определяет области и подобласти предельных узлов. Указан приоритет применения в данной области жадных алгоритмов для выборочной активации узлов сенсорной сети. Предложенный метод дал возможность определить границы контрольных объектов модели инфраструктуры тепловой электростанции в соответствии с входными данными, поступающих от датчиков активированных узлов сенсорной сети. Показано, что разработанная математическая модель позволяет достичь высоких показателей точности обнаружения изменений в режиме работы контрольных объектов инфраструктуры тепловой электростанции в условиях уменьшения нагрузки на вычислительный ресурс аппаратно-программной платформы.

Ключевые слова: тепловая электростанция, сенсорная сеть, жадный алгоритм, объект диагностирования, вычислительный ресурс, «Интернет вещей», архитектура «Sensor-Cloud».

I.A. Kazarova

SIMULATION OF THERMAL POWER PLANT SENSOR NETWORK IN ACCORDANCE WITH THE ARCHITECTURE OF "SENSOR-CLOUD"

The peculiarities of the sensor networks use in monitoring systems of thermal power facilities are considered. Algorithms for automated control of sensor networks of thermal power plants were evaluated in accordance with input data of sensors and a decrease in the load level on the computing resource of the hardware and software platform. A methodology has been developed for constructing, configuring and optimizing algorithms for machine analysis and organizing the operation of a sensor network organized in accordance with the concept of the "Internet of Things". The modeling of the sensor network control system based on the mathematical apparatus, which determines the areas and sub-areas of the limiting nodes, has been carried out. The priority of using greedy algorithms in this area for selective activation of sensor network nodes is indicated. The proposed method made it possible to determine the boundaries of the control objects of the thermal power plant infrastructure model in accordance with the input data coming from the sensors of the activated nodes of the sensor network. It is shown that the developed mathematical model makes it possible to achieve high rates of accuracy in detecting changes in the operating mode of control objects of the thermal power plant infrastructure in conditions of a decrease in the load on the computing resource of the hardware and software platform.

Key words: thermal power plant, sensor network, greedy algorithm, diagnostic object, computing resource, "Internet of Things", "Sensor-Cloud" architecture.

Вступ. Теплові електростанції (ТЕС) є одним з найбільш типових об'єктів сучасної енергетики. Робота ТЕС базується на фізичному принципі переведення хімічної енергії палива (зазвичай, горючих корисних копалин) у теплову форму шляхом підтримання процесу згоряння у топці парового котла, після чого тепло передається теплоносію з метою переведення теплової енергії у кінетичну енергію обертання турбогенератора, який, у свою чергу, генерує електричну енергію. Таким чином, процес генерування електроенергії включає у себе значну кількість етапів, кожен з яких характеризується рівнем втрат, і, отже, підлягає аналізу та оптимізації. Вдосконалення об'єктів теплової енергетики пов'язано як з задачею організації економічного виробництва електроенергії, так і з вирішенням екологічних проблем, що пов'язані з перевищенням допустимих норм емісії вуглекислого газу та іншими викидами (зола, двоокис сірки, оксиди азоту, тощо), які виступають джерелами забруднення атмосфери, водних басейнів та ґрунту.

Організація інфраструктури сучасної ТЕС, налаштування параметрів функціональних елементів загального комплексу та впровадження автоматизованих систем забезпечення контролю та моніторингу ключових параметрів з метою проведення оцінки і наведення методологічних рекомендацій зумовлює необхідність математичного моделювання структури відповідного об'єкту та визначення цільових функцій ефективності його функціонування. **Аналіз сучасних досліджень і публікацій** присвячених проблемам теплоенергетики вказує на можливість оптимізації роботи ТЕС шляхом внесення змін у режим роботи газопоршневих та газотурбінних двигунів, зокрема впровадження режиму когенерації [1-4]. Крім того для вдосконалення та масштабування інфраструктури ТЕС необхідно впроваджувати ефективні системи моніторингу на основі сенсорної мережі. На сьогоднішній день високу ефективність показала система типу «Sensor Cloud», інфраструктура яких забезпечує режим спільної роботи функціональних елементів сенсорної мережі, а також функціонал по виділенню адаптивних підмереж [5-9]. Зазначений підхід є достатньо ефективним за умов моніторингу набору параметрів комплексної системи об'єкту теплоенергетики, що вказує на **актуальність даного дослідження** з точки зору вирішення завдання контролю технологічного процесу та прогнозування аварійних ситуацій, а також визначення рівня забруднень [10-12]. Дослідження вказують на пріоритет у застосуванні алгоритмів планаризації при визначенні границь через аналіз граничних вузлів [13], але специфіка задачі зумовлює удосконалення відповідних алгоритмів з метою збільшення точності машинного аналізу даних від вузлів сенсорної мережі. У свою чергу, архітектура системи моніторингу сенсорної мережі, що базується на основі жадібних алгоритмів, надає можливість вирішити відповідну задачу з достатнім рівнем точності незалежно від рівня складності архітектури мережі [14-16]. Перевагою даного методу є впровадження процедури аналізу даних датчиків мережі на відстані не більше одного сегменту від аномального вузла. Але при цьому жадібні алгоритми призводять до надмірного виявлення вузлів і, таким чином, значно збільшують навантаження на обчислювальний ресурс системи. Зазначена проблема вирішується через застосування оптимізованого жадібного алгоритму, відповідно якого зменшення відстані аналізу датчиків до одного мережевого сегменту проводиться тільки для неповних вузлів [17].

Проведений аналіз показав відсутність цілісної методології організації сенсорних мереж для моніторингу об'єктів теплоенергетики, що розглядається як **невирішена частина загального дослідження**. Таким чином, **метою дослідження** стала побудова методики оптимізації жадібних алгоритмів системи контролю сенсорної мережі, що базується на частковій активації датчиків мережі відповідно до визначення максимуму цільової функції точності аналізу та мінімуму цільової функції навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи системи моніторингу.

1. Визначення базових принципів оптимізації системи контролю сенсорної мережі ТЕС

Для побудови математичної моделі, що надалі може бути використана для визначення методів оптимізації системи контролю сенсорної мережі ТЕС необхідно провести класифікацію функціональних блоків загального комплексу та зв'язків між ними, а також побудувати цільові функції ефективності функціонування ТЕС. У рамках даного дослідження класифікація включає у себе наступні функціональні блоки ТЕС:

- паливний блок, що включає у себе паливне господарство та систему підготовки палива;
- котельний блок, що включає у себе паровий котел та допоміжне обладнання;
- турбінна установка, що включає у себе парову турбіну та допоміжне обладнання;
- система циркуляції води, що включає у себе установки технічного водопостачання, водопідготовки та конденсатоочищення;

• набір електротехнічних компонент, що включає у себе електротехнічне обладнання та систему управління електротехнічним обладнанням;

• набір блоків видалення шлаків та очистки води і повітря від забруднень.

Визначення цільових функцій ефективності функціонування ТЕС при цьому представляє собою нетривіальну задачу. Її складність пов'язана як з наявністю широкого набором функціональних компонент і зв'язків, а також їх груп у загальній системі ТЕС, що вказані вище, так і з особливостями оцінки ефективності системи і складових системи на різних етапах аналізу, які відповідно до цього можуть характеризуватися різними наборами цільових функцій. Виділимо наступні етапи аналізу системи з метою визначення цільових функцій ефективності (рис. 1):

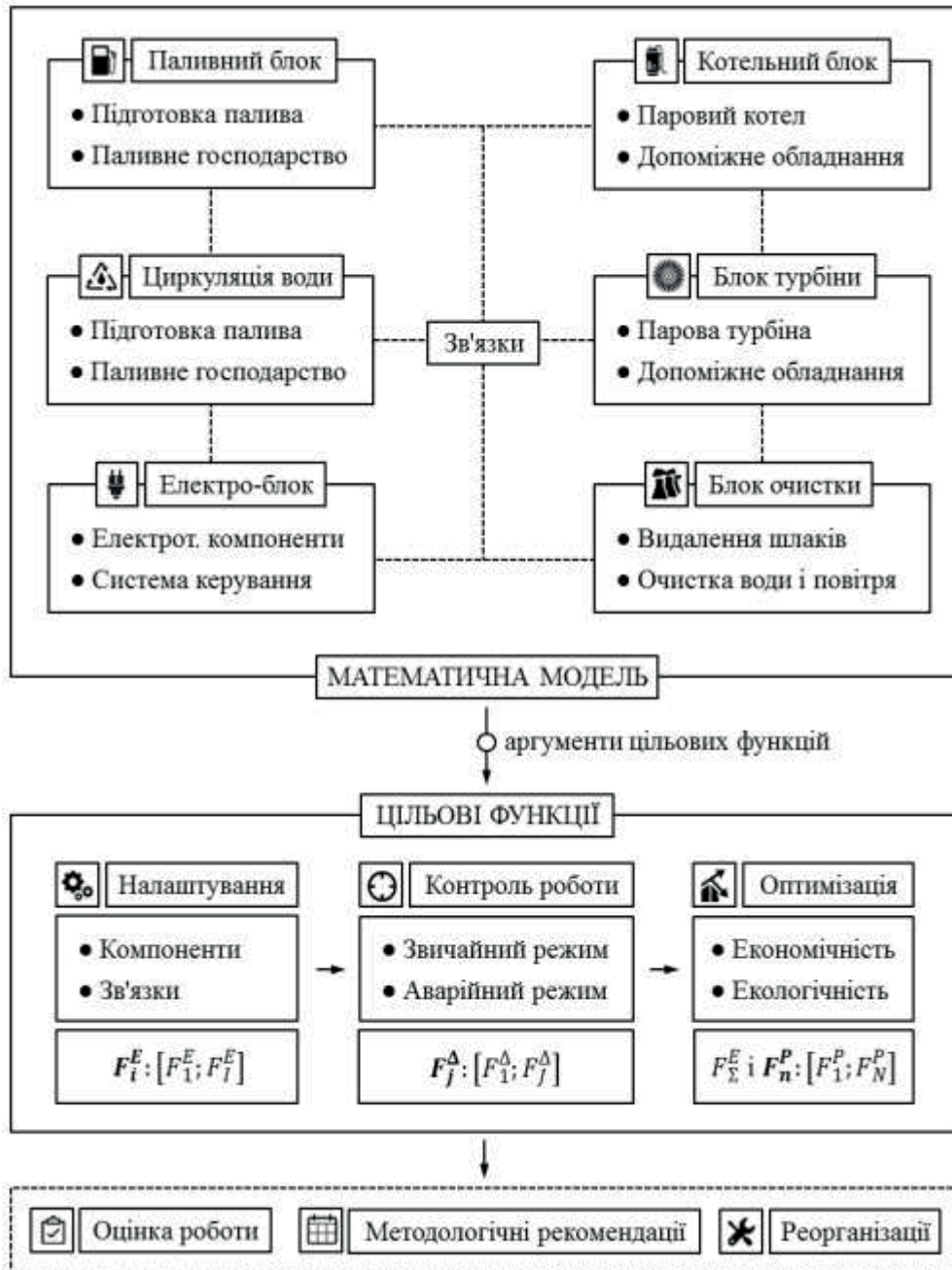


Рис. 1. Базова схема оптимізації системи контролю сенсорної мережі ТЕС на основі наборів цільових функцій.

1. налаштування параметрів функціональних компонент загальної системи та їх зв'язків відповідно показників ефективності роботи загального комплексу;

2. контроль стабільності функціонування системи у звичайному режимі роботи, контроль ефективності стабілізації системи у аварійному режимі роботи, а також прогнозування подальшої роботи відповідно наявності внутрішніх та зовнішніх факторів;

3. оптимізація системи шляхом реорганізації або масштабування інфраструктури загального комплексу відповідно показників економічності та екологічності роботи ТЕС.

Таким чином, на першому етапі на основі даних сенсорної мережі визначається набір цільових функцій $F_i^E: [F_1^E; F_I^E]$ ефективності функціонування системних блоків ТЕС для яких треба визначити глобальні мінімуми, а на другому етапі — набір цільових функцій $F_j^A: [F_1^A; F_J^A]$ відхилення параметрів від заданих для яких треба визначити глобальні мінімуми. На третьому етапі визначається цільова функція ефективності функціонування загальної системи F_{Σ}^E , що базуються на коефіцієнті корисної дії (ККД) системи, а також набір цільових функцій $F_n^P: [F_1^P; F_N^P]$, що визначають об'єм викидів вуглекислого газу і твердих компонент золи (в залежності від рівня небезпеки відповідно хімічного складу компонент), тепловим і хімічним забрудненням води, що застосовується для охолодження, тощо.

На першому етапі визначається набір мінімально допустимих значень ефективності $F_i^{EM}: [F_1^{EM}; F_I^{EM}]$ для кожного з системних блоків інфраструктури ТЕС і відповідно до них розраховуються максимуми цільових функцій:

$$\begin{cases} \max(F_1^E) \text{ при } F_1^E \geq F_1^{EM} \text{ для всіх } i \in [1; I] \\ \max(F_2^E) \text{ при } F_2^E \geq F_2^{EM} \text{ для всіх } i \in [1; I] \\ \max(F_i^E) \text{ при } F_i^E \geq F_i^{EM} \text{ для всіх } i \in [1; I] \\ \max(F_j^E) \text{ при } F_j^E \geq F_j^{EM} \text{ для всіх } i \in [1; I] \end{cases}$$

Аналогічним чином, на другому етапі визначається набір максимально допустимих значень ефективності $F_j^{\Delta+}: [F_1^{\Delta+}; F_J^{\Delta+}]$ для кожного з системних блоків інфраструктури ТЕС і відповідно до них розраховуються мінімуми цільових функцій:

$$\begin{cases} \min(F_1^{\Delta+}) \text{ при } F_1^{\Delta} \leq F_1^{\Delta+} \text{ для всіх } j \in [1; J] \\ \min(F_2^{\Delta+}) \text{ при } F_2^{\Delta} \leq F_2^{\Delta+} \text{ для всіх } j \in [1; J] \\ \min(F_i^{\Delta+}) \text{ при } F_i^{\Delta} \leq F_i^{\Delta+} \text{ для всіх } j \in [1; J] \\ \min(F_j^{\Delta+}) \text{ при } F_j^{\Delta} \leq F_j^{\Delta+} \text{ для всіх } j \in [1; J] \end{cases}$$

Нарешті, на третьому етапі визначається набір максимально допустимих значень рівня викидів $F_n^{PM}: [F_1^{PM}; F_N^{PM}]$ у відповідності до якого визначається глобальний максимум цільової функції ефективності F_{Σ}^E функціонування загальної системи:

$$\max(F_{\Sigma}^E) \text{ при } F_n^P \leq F_n^{PM} \text{ для всіх } n \in [1; N]. \quad (3)$$

На перших двох етапах отримується набір допустимих значень, серед яких обирається оптимальне у відповідності до особливостей поставленої задачі. На третьому етапі визначається одне значення, на основі якого можна провести оцінку максимального ККД, надати методологічні рекомендації та за необхідності провести реорганізацію комплексу ТЕС.

2. Математична модель класифікатора сенсорної мережі ТЕС на базі жадібних алгоритмів

Принципи розробки системи керування сенсорної мережі базуються на моделюванні класифікатора. Для формалізації поняття класифікатора мережі необхідно ввести поняття безперервного об'єкта, у рамках якого процеси протікають безперервно, що на математичному рівні відповідає безперервості даних на виході об'єкта. Формалізація принципів побудови жадібного алгоритму, у свою чергу, полягає визначенні локально оптимальних рішень на кожному етапі аналізу, при цьому структура завдання, може бути задана через матрицю. Сенсорна мережа включає у себе наступні групи елементів: базова станція (БС), ретрансляційні вузли (РВ) і кінцеві вузли (КВ). БС відповідає за прийом і передачу даних, РВ (множина $\{N_r\}$, де $r \in [1; R]$) отримують дані датчиків (множина $\{N_s\}$, де $s \in [1; S]$), що надходять від відповідних КВ (множина $\{N_t\}$, де $t \in [1; T]$) і надалі передають їх на БС. Також на рівні РВ відбувається обмін даними, на основі яких проводиться аналіз з метою виявлення аномальних вузлів, а також контролюються границі мережі (рис. 2). Функціонування сенсорної мережі включає у себе етапи

роботи у режимі очікування (РРО), класифікація областей мережі (КОМ) і визначення границь неперервних об'єктів (ВГО). На етапі РРО у сенсорній мережі періодично активуються РВ для виявлення подій. при цьому граничні індикатори виявлення події визначаються через набір граничних вузлів. Далі проводиться КОМ кожного граничного вузла як підобластей низхідної ймовірності виявлення події через позиційні зв'язки з сусідніми вузлами, з метою зменшення рівня навантаження на обчислювальний ресурс системи моніторингу. При цьому результати ВГО мають циклічно оновлюватись на базі даних датчиків сусідніх вузлів, а отжеаналіз на рівні БСможе бути переведено від частково нечіткої границі до чіткої границі.

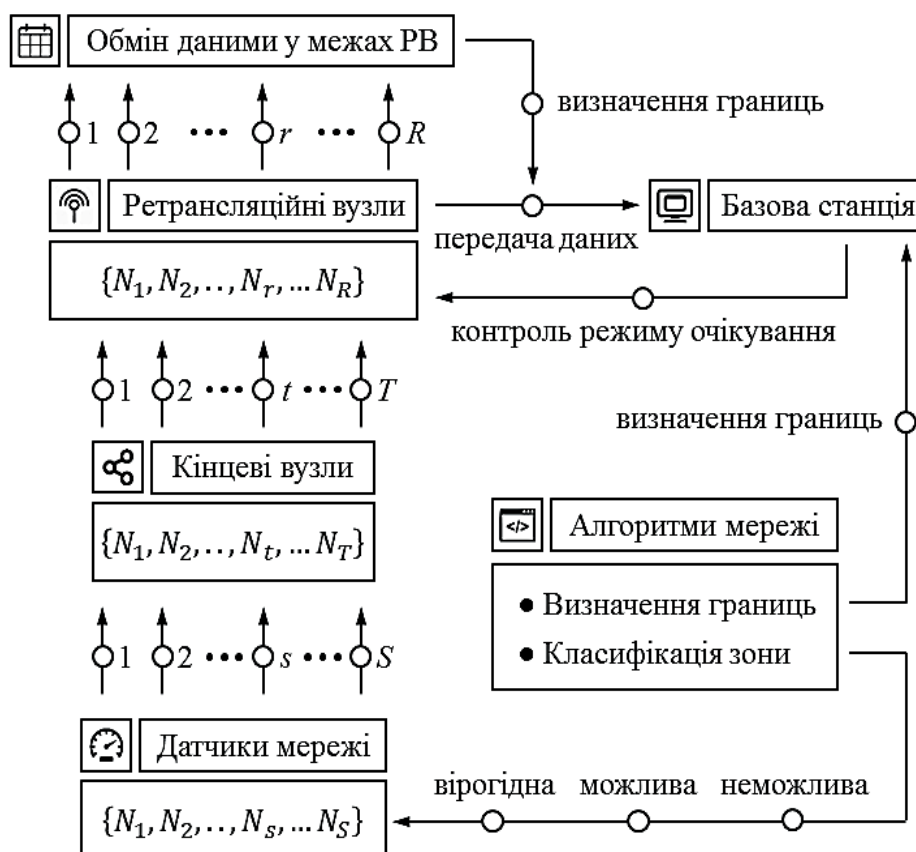


Рис. 2. Узагальнена схема організації класифікатора сенсорної мережі ТЕЦ.

Математична модель сенсорної мережі формалізує роботу реляційної системи управління базами даних (СУБД), що складається з наборів даних вузлів сенсорної мережі (БС, РВ і КВ). Кожен вузол сенсорної мережі визначається через запис СУБД, що, у свою чергу складається з унікального ідентифікатора вузла (УІВ), радіусу зони покриття (РЗП), рівня зарядки вузла (РЗВ), двійкового показника статусу вузла (ПСВ), типу вузла (ТВ) відповідно належності до БС, РВ чи КВ, двійковому показнику належності термінального вузла ретрансляційному вузлу (ПН) як функції від УІВ, даних КВ, а також порогового значення, що визначає аномальність вузла (ПЗА). На основі кожного запису вузли сенсорної мережі класифікуються як нормальні вузли (НВ), граничні вузли (ГВ) і аномальні вузли (АВ). Структура безперервного об'єкта визначається через наявність АВ, а дані про НВ зберігаються у СУБД якщо вони є сусідніми до ГВ і АВ. Оптимізація системи координування сенсорної мережі визначається відповідно зменшення навантаження на обчислювальний ресурс загального комплексу на основі наступних параметрів:

- — розмір запису СУБД;
- — навантаження на інформаційний вузол, від РВ;
- — навантаження на інформаційний вузол, від РВ на біт переданої інформації;
- — навантаження на інформаційний вузол, від КВ;
- $\frac{D_{PB}^{BC}}{D_{PB}^{KB}}$ — середня відстань між РВ і БС;
- $\frac{D_{PB}^{KB}}{D_{PB}^{KB}}$ — середня відстань між РВ і КВ, що обробляється КВ;
- i — коефіцієнти передачі і підсилення вузла, відповідно.

Таким чином, навантаження на вузол РВ, а також навантаження при передачі даних між КВ до РВ, може бути розраховано через наступну систему рівнянь:

Представлена математична модель навантаження на обчислювальний ресурс базується на методі визначення розсіювання енергії сигналу [18]. Вона дозволяє побудувати алгоритм оптимізації системи контролю ТЕС, що включає у себе також оптимізацію сенсорної мережі датчиків ТЕС.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було розглянуто принципи впровадження алгоритмів автоматизованого керування сенсорними мережами у системах моніторингу об'єктів теплової енергетики. Оцінка ефективності алгоритмів автоматизованого керування сенсорними мережами теплових електростанцій була проведена відповідно показників точності аналізу поточних даних, що надходять від датчиків мережі та зменшення рівня навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи загального комплексу. Математичне моделювання системи контролю базувалось на основі математичного апарату, що визначає області та підобласті граничних вузлів сенсорної мережі. Аналіз запропонованої моделі вказав на пріоритет застосування у зазначеній галузі жадібних алгоритмів для вибіркової активації вузлів сенсорної мережі. Представлена методика надає можливість визначити межі контрольних об'єктів моделі інфраструктури теплової електростанції відповідно до вхідних даних, що надходять від датчиків активованих вузлів сенсорної мережі. Таким чином, було показано, що розроблена математична модель дозволяє досягти високих показників точності виявлення змін у режимі роботи контрольних об'єктів інфраструктури електростанції за умов зменшення навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи системи моніторингу.

Список літератури

1. Маляренко В.А., Казарова І.О., Сенецький О.В., Темнохуд О.О. (2019) Дослідження впровадження газопоршневих та газотурбінних двигунів при переведенні котельні в режим когенерації. Інтегровані технології та енергозбереження. НТУ «ХПІ»: сб. наук. пр. Харків: НТУ «ХПІ», № 2, с. 3-10.
2. Казарова І.О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, спец. 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / І.О. Казарова. – Харків, 2018. – 24 с.
3. Маляренко В.А., Андреев С.Ю., Казарова І.О. (2018) Можливості підвищення комунальної енергетики втіленням когенерації. Міжнародний журнал «Світлотехніка та електроенергетика». Харків: ХНУМГ. №2(52). С. 59-62.
4. Андреев С.Ю., Маляренко В.А., Шубенко О.Л., Бабак М.Ю., Сенецький О.В., Темнохуд І.О., Казарова І.О. (2016) Когенерація водогрійних котельнях з котлами ПТВМ-100 при використанні органічного циклу Ренкіна. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 2. С. 48-60. ISSN 2078-5364.
5. Yates, D. J., & Xu, J. (2010). Sensor Field Resource Management for Sensor Network Data Mining. *Intelligent Techniques for Warehousing and Mining Sensor Network Data*, 280–304. doi: 10.4018/978-1-60566-328-9.ch013.
6. Xiong, S., Ni, Q., Wang, X., Su, Y.: A connectivity enhancement scheme based on link transformation in IoT sensing networks. *IEEE Internet Things J.* 4(6), 2297–2308 (2017)
7. Ahmadi, H., & Bouallegue, R. (2015). Comparative study of learning-based localization algorithms for Wireless Sensor Networks: Support Vector regression, Neural Network and Naïve Bayes. 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). doi: 10.1109/iwcmc.2015.7289314.
8. Diao, J., Zhao, D., Tang, J., Cheng, Z., & Zhou, Z. (2019). Continuous Objects Detection Based on Optimized Greedy Algorithm in IoT Sensing Networks. *Security, Privacy, and Anonymity in Computation, Communication, and Storage Lecture Notes in Computer Science*, 265–278. doi: 10.1007/978-3-030-24900-7_22.

9. Wu, Y., & Rowe, A. (2011). Logic-Based Programming for Wireless Sensor-Activator Networks. 2011 IEEE/ACM Second International Conference on Cyber-Physical Systems. doi: 10.1109/iccps.2011.31.
10. Chao, C., Jiao, S., Zhang, S., Liu, W., Feng, L., Wang, Y.: TripImputor: realtime imputing taxi trip purpose leveraging multi-sourced urban data. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 99, 1–13 (2018).
11. Ni, J., Li, Z., Xie, S., & Jia, C. (2018). Toxic Gas Leak Monitoring Alarm System Based on Wireless Sensor Network. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). doi: 10.23919/chicc.2018.8483568.
12. Qihua, W., Ge, G., Lijie, C., & Xufeng, X. (2015). Scheduling strategy for Hidden Markov Model in wireless sensor network. 2015 34th Chinese Control Conference (CCC). doi: 10.1109/chicc.2015.7260879.
13. Nguyen, D., & Phung, P. H. (2017). A Reliable and Efficient Wireless Sensor Network System for Water Quality Monitoring. 2017 International Conference on Intelligent Environments (IE). doi: 10.1109/ie.2017.34.
14. Diao, J., Zhao, D., Tang, J., Cheng, Z., & Zhou, Z. (2019). Continuous Objects Detection Based on Optimized Greedy Algorithm in IoT Sensing Networks. *Security, Privacy, and Anonymity in Computation, Communication, and Storage Lecture Notes in Computer Science*, 265–278. doi: 10.1007/978-3-030-24900-7_22.
15. Lei, F., Yao, L., Zhao, D., Duan, Y.: Energy-efficient abnormal nodes detection and handlings in wireless sensor networks. *IEEE Access* 5, 3393–3409 (2017).
16. Shu, L., Chen, Y., Sun, Z., Tong, F., Mukherjee, M.: Detecting the dangerous area of toxic gases with wireless sensor networks. *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.* (2017).
17. Diao, J., Zhao, D., Tang, J., Cheng, Z., & Zhou, Z. (2019). Continuous Objects Detection Based on Optimized Greedy Algorithm in IoT Sensing Networks. *Security, Privacy, and Anonymity in Computation, Communication, and Storage Lecture Notes in Computer Science*, 265–278. doi: 10.1007/978-3-030-24900-7_22.
18. Heinzelman, W.B., Chandrakasan, A.P., Balakrishnan, H.: An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 1(4), 660–670 (2002).