Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

1 (150) 2024

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

– ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

– МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

– СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (150). - Дніпро, 2024. – 179 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні технології та організація сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Скалозуб В.В. - д.т.н., проф.

Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології обробки інформації та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 31.01.2024 р., № 6

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІВК «Системні технології», 2024

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-01
УДК 528.235:681.3:628.1

В.В. Гнатушенко, Д.О. Миросенко

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТОПОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ МІСЬКОЇ МЕРЕЖІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Анотація. Для ефективного управління міськими мережами водопостачання комунальним підприємствам, які забезпечують водопостачання та водовідведення (надалі – КП «Водоканал») необхідне вирішення наступних задач: використання топографічних карт масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000, у складі яких є як наземна забудова, так і суміжні підземні комунікації; гідравлічні розрахунки мережі водопостачання для визначення стану, аналізу та оптимізації структури мережі; оперативне усунення аварійних ситуацій та відновлення мережі після усунення аварії; контроль та управління якістю питної води; наявність приладів контролю тиску, витрати та п'єзометрів; автоматизоване управління насосними станціями; економія енергоресурсів; інвентаризація мережі. Комплексне вирішення цих задач здійснюється із застосуванням геоінформаційних технологій, математичного моделювання мережі водопостачання. В роботі запропоновано математичну модель топологічної структури мережі водопостачання, визначено бази геопросторових даних про об'єкти мережі та взаємозв'язки цих об'єктів з врахуванням топологічної структури цієї мережі для забезпечення геоінформаційного та математичного моделювання гідравлічного стану мережі водопостачання, вирішення задач обробки аварійних ситуацій, контролю якості питної води, оптимізації мережі, енергозбереження.
Ключові слова: мережа водопостачання, математична модель, геоінформаційна система, гідравлічний розрахунок, аналіз мережі, оптимальна структура мережі водопостачання.

Постановка завдання. В сучасному світі водопостачання міських територій стає складнішим завданням через зростання населення, зміни клімату та швидкий розвиток міської інфраструктури. Гідравлічний розрахунок та аналіз систем водопостачання стають невід'ємною частиною вирішення цих проблем. У цьому контексті розвиток геоінформаційних систем виявляється важливим інструментом для забезпечення ефективності та оптимізації функціонування міських мереж водопостачання. Застосування в комунальних підприємствах КП «Водоканал» геоінформаційної системи гідравлічного розрахунку, аналізу та оптимізації міських мереж водопостачання дозволяє комплексне вирішення

© Гнатушенко В.В., Миросенко Д.О., 2024

задач ефективного автоматизованого управління міськими мережами водопостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В публікаціях [1-3, 6-11] визначені:

- математична модель мережі водопостачання;
- використання топографічних карт масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000 для отримання просторової інформації про об’єкти мережі водопостачання;
- перелік об’єктів мережі водопостачання із складом технічних та графічних параметрів;
- методики та алгоритми проведення гідравлічних розрахунків - повіроч-ного та конструкторського розрахунків;
- наведені приклади гідравлічних розрахунків із використанням традиційної математичної моделі мережі водопостачання - топологічного графа [4].

Топологічний граф, як адекватна модель відображення на площині просторової структури міської мережі водопостачання, визначає об’єкти мережі, їх взаємозв’язки, спосіб відображення топологічної структури мережі та результати гідравлічних розрахунків. Топологічний граф є орієнтованим графом з поміченими ребрами та вершинами та традиційно використовується для проведення розрахунків (рис.1). Складовими частинами мережі водопостачання в традиційній математичній моделі є наступні об'єкти: насосна станція НС-2; вузол – коло з номером вузла; ділянка водогону; абонент, позначений стрілкою із значенням відбору; додаткові об’єкти, які не вказані на рис.1, – засувка, датчик.

В попередніх роботах Д. Миросенка встановлена взаємно-однозначна відповідність умовним знакам топологічного графу відповідним об'єктам мережі, а саме:

- вершинам графа відповідають насосна станція, вузли, абоненти;
- ребрам графа відповідають ділянки водогонів;
- мітками вершин є назва насосної станції, номери вузлів. Для абонентів мітками є їх обсяги відборів Q, л/с;
- початковою вершиною цього графа є насосна станція, наступні вершини – вузли або абоненти. При цьому на вершині-абонента граф завершується, а вершини- вузли є проміжними і пов'язують ділянки водогонів в єдину мережу. Проміжні вузли відповідають колодязям/камерам, позначеним на топографічній карті своїми умовними знаками;
- на ребрах - ділянках водогонів визначені наступні мітки:

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

• стрілка встановлює орієнтацію графа. Напрям стрілки вказує напрямок потоків води від витоку-насосної станції до стоків-абонентів або до вершин графа - вузлів;

• зверху ребра графа вказується витрата води Q, л/с, що протікає по цій ділянці водогону і діаметр водогону;

• під ребром графа визначена довжина ділянки в кілометрах L, км, тиск Нм;

• швидкість протікання води V, м/с.

Для побудови цифрової моделі топологічної структури мережі водопостачання використовуються топографічні карти масштабів 1:500, 1:1000, 1:2000, на яких умовними знаками топографічних планів [5] «розташовані» елементи наземної та підземної забудови території населеного пункту. Невід'ємною часткою цих планів є складові частини – вищевказані об'єкти мережі водопостачання, а також їх картографічні та технічні параметри. Фрагмент топографічного плану у М1:1000 наведений на рис. 2.

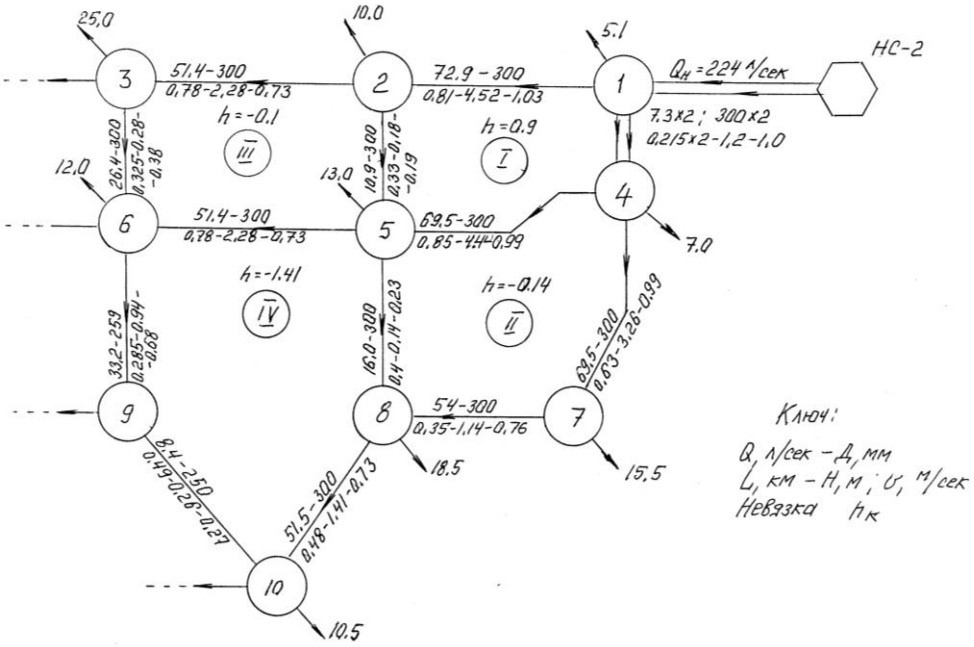


Рисунок 1 – Традиційна математична модель мережі водопостачання

Об'єкти мережі мають графічні атрибути - умовні знаки топографічних планів [5] та неграфічні атрибути – технічні параметри. Для відображення на топографічних планах об'єктів мережі водопостачання визначені персональні умовні знаки, які розташовуються в своїх шарах цифрової векторної топографічної карти масштабу 1:500, 1:1000, 1:2000 та мають координати X,Y, Z-центроїди дискретного умовного знаку (колодязь, засувка, насосна станція, да-

тчик, абонент) або координати X_i,Y_i, Z_i початку, кінця та вузлових точок полілінії для лінійного умовного знаку (ділянки водогонів).

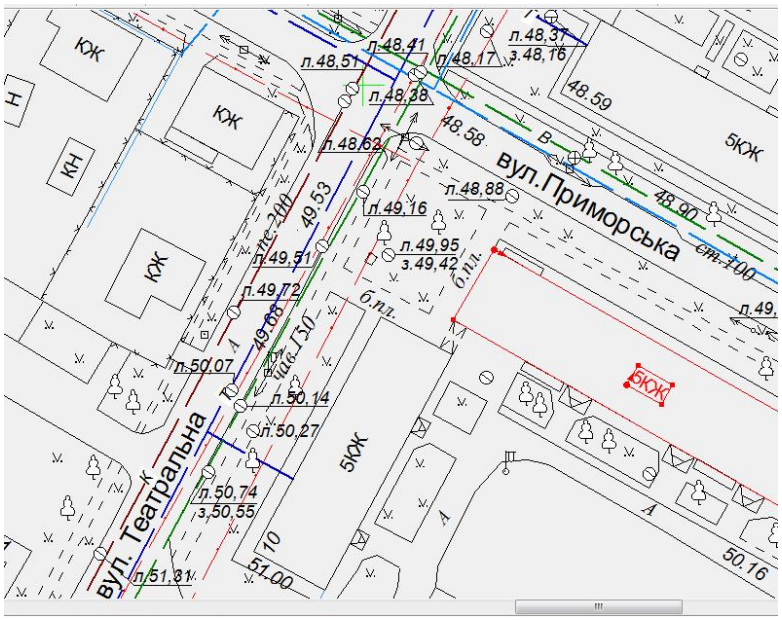


Рисунок 2 – Фрагмент електронної векторної топографічної карти М1:1000

Використання для гідравлічних розрахунків топологічного графа та топографічних карт має наступні суттєві недоліки, а саме:

- в структурі топологічного графа не передбачена наявність додаткових об’єктів – регуляторів тиску та витрати – засувок, приладів регулювання тиску та витрати, приладів контролю тиску та витрати;
- в структурі топологічного графа не визначена розгалужено-кільцева та сегментна структура мережі водопостачання;
- відображення на топографічних картах топологічної структури мережі та результатів гідравлічних розрахунків не передбачено легендою - складом умовних знаків топографічних планів [5]. Для цього необхідно складання спеціалізованих карт мережі водопостачання.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка математичної моделі топологічної структури мережі водопостачання, яка дозволить усунути зазначені недоліки, зокрема підвищить якість відображення та достовірність гідравлічних розрахунків.

Виклад основного матеріалу. Аналіз оновленої структури топологічного графа, його декомпозиція і співвіднесення із складовими частинами мережі – її об'єктами, встановлює наступну взаємно-однозначну відповідність. Складовими частинами мережі водопостачання є наступні об'єкти: насосна станція;

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

вузол – колодязь/камера (надалі – колодязь); ділянка водогону; регулятор Q-H витрати Q та тиску H (засувка, регулятор тиску/витрати, шайба, …, надалі – регулятор); абонент; датчик (прилад) контролю тиску/витрати води (надалі - датчик). Вершинам графа відповідають насосна станція, колодязі, абоненти. Ребрам графа відповідають ділянки водогонів. Мітками вершин є назва насосної станції, номери колодязів. Для абонентів мітками є їх номери, найменування абонентів, міста врізок абонентів до мережі – «зірочки». Початковою вершиною цього графа є насосна станція, наступні вершини – колодязі або абоненти. При цьому на вершині-абонента граф завершується, а вершини-колодязі є проміжними і пов'язують ділянки водогонів в єдину мережу. На ребрах - ділянках водогонів визначені наступні мітки:

• стрілка встановлює орієнтацію графа. Напрям стрілки вказує напрямок потоків води від витоку-насосної станції до стоків-абонентів або до вершин графа - колодязів;

• зверху ребра графа вказується витрата води Q, л/с, що протікає по цій ділянці водогону і діаметр водогону;

• під ребром графа зазначаються довжина ділянки в кілометрах L, км, тиск, Нм;

• швидкість протікання води V, м/с.

Цифрова математична модель топологічної структури мережі має розгалужено-кільцеву структуру, яка складається із:

- розгалужених (тупікових) ділянок, які доставляють воду абонентам від ділянок магістральних або закільцованих водоводів;

- магістральних ділянок, які забезпечують доставку води від насосної станції до ділянок кільцевих підграфів або по розгалуженим ділянкам до абонентів;

- кільцевих підграфів, які складаються із ділянок водоводів, об’єднаних в кільцеву структуру, яка забезпечує постачання води по всій території населеного пункту. Абоненти отримують воду по розгалуженим ділянкам, підключеним до кільцевих ділянок.

Укрупнена схема розгалужено-кільцевої структури приведена на Рис.3. та складається із наступних частин:

- кола з цифрами 1,2,3,4,5 – вузли мережі. Початковий вузол – Насосна станція;

- всі лінії, які з’єднують вузли мережі між собою та абонентами, мають «стрілки», які визначають напрям току води;

- подвоєна лінія синього кольору між Насосною станцією та Вузлом_1 – магістральний водопровід;
- товста лінія червоного кольору – траси ділянок кілець;
- одинарні тонкі лінії чорного кольору – розгалужені ділянки до абонентів;
- A1.1, A1.2, …, A5.2 – абоненти;
- «зірочки» - міста врізок абонентів до мережі;
- коло з перехрестям всередині визначає наявність на ділянці, підключеній до вузла, регуляторів тиску та витрати – засувок, приладів регулювання тиску/витрати, шайб, тощо;
- буква K – ключ Q-D-L-H-v-hk розрахункових значень гідравлічного розрахунку згідно рис.1;
- буква F – значення фактичного обсягу відбору води абонентом.

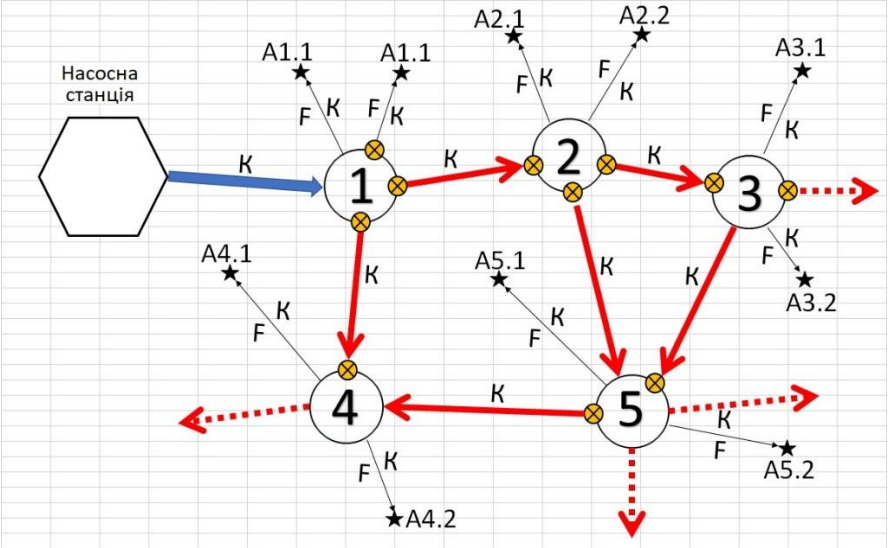


Рисунок 3 – Укрупнена схема розгалужено-кільцевої структури топологічного графу

Траси трубопроводів мають сегментну структуру, де кожний сегмент у складі: «Вузол-Виток»-ділянка трубопровода-«Вузол-сток» у відповідності до орієнтації тока води. Перший Вузел-Виток – насосна станція, кінцеві Вузли-Стоки – абоненти, проміжні Вузли-Витоки або Вузли-Стоки – колодязі/камери.

Інформаційно-графічна схема деталіровки колодязя є його графічним атрибутом, який визначає розгалуження в топологічній структурі мережі водопостачання, а також склад запірної арматури та приладів.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Для побудови цифрової моделі розгалужено-кільцевої структури топологічного графу використовуються цифрові векторні топографічні карти наступним чином:

- за результатами геодезичних вишукувань на топографічну карту наносяться об’єкти мережі водопостачання вищевказаними умовними знаками;
- за аналізом інформаційно-графічних схем деталіровок колодязів виявляється наявність регуляторів тиску/витрати та гідрантів. При наявності регуляторів їх умовні знаки наносяться на полілінію ділянки водогону біля умовного знаку колодязя в місці врізки труби водогону в колодязі, вказуються їх діаметри та процент відкриття;
- при наявності гідранту умовний знак колодязя без гідранта замінюється на умовний знак колодязя з гідрантом;
- для всіх об’єктів мережі водопостачання визначаються значення технічних та графічних параметрів;
- визначається орієнтація графа - напрямок потоку води. Напрямок потоку вказується стрілкою над полілінією ділянки водогону в напряму від Вузла-витоку - насосної станції/колодязя до Вузла-стоку - колодязя/абонента;
- формується матриця інціденцій вершин і контурів.

Традиційно матриця інціденцій вершин і контурів використовується для розрахунку кільцевих підграфів та має вигляд [4]:

$$\begin{Vmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1l} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2l} & v_{2\,l+1} \\ t_{31} & t_{32} & \dots & t_{3l} & v_{3\,l+1} \\ & & \dots & & \\ t_{k+1\,1} & t_{k+1\,2} & \dots & t_{k+1\,l} & t_{k+1\,l+1} \end{Vmatrix} \quad (1)$$

де k - число вершин, l - число ділянок мережі, $u_{l,j}$ (j = 1, ..., l) - номера ділянок, $v_{i,l+1}$ (i = 2, ..., k + 1) - номера вершин, $t_{i,j}$ = 1, якщо ділянка $u_{1,j}$ з'єднана з вершиною $v_{i,l+1}$ та з'єднання не регулюється; $t_{i,j}$ = 2, якщо ділянка $u_{1,j}$ з'єднана з вершиною $v_{i,l+1}$ та регулюється засувкою.

У матриці інціденцій встановлюється зв'язок між ділянками (контурами) і вузлами (вершинами) мережі з урахуванням фактичної площі поперечного перерізу засувок, визначається орієнтація топологічного графа - спрямування потоків води від виходів насосної станції до вершин, безпосередньо пов'язаних з насосною станцією ребрами, визначається структура розподілених та кільцевих підграфів.

Для побудови спеціалізованої карти мережі водопостачання із розгалуженo-кільцевою топологічною структурою мережі та її використання для проведення гідравлічних розрахунків легенда топографічної карти змінюється на наступне: -на топографічній карті остаються тільки шари наземної забудови, об'єкти мережі, пікети та ізолінії рельєфу, всі інші шари закриваються; -всі ділянки мережі кольорами розподіляються на розгалужені – зеленого кольору, кільцеві – красні, магістральні - сині; -в містах врізки абонентів до мережі встановлюється позначка «зірочка»; - над кожною ділянкою встановлюється позначкою «стрілка» орієнтація топологічного графу в напрямку від «Вузла-Витока» до «Вузла-Стоку». Начальний «Вузол-Виток» – насосна станція; - надписи над об'єктами мережі – їх технічні або розрахункові параметри.

Фрагмент цифрової моделі розгалужено-кільцевої топологічної структури мережі водопостачання міста Дніпрорудне наведений на рис.4, де синім кольором визначені магістральні ділянки, червоним кольором визначені ділянки кілець, зеленим кольором визначені ділянки розгалужених частин мережі, «зірочками» визначені врізки мережі до абонентів. Із рис.4 видно, що постачання води по мережі провадиться послідовно в напряму току води по ділянкам магістральних та кільцевих частин мережі; доставка води до абонентів провадиться по ділянкам розгалужених частин, які підключаються у вузлах-колодязях магістральних або кільцевих частин мережі.

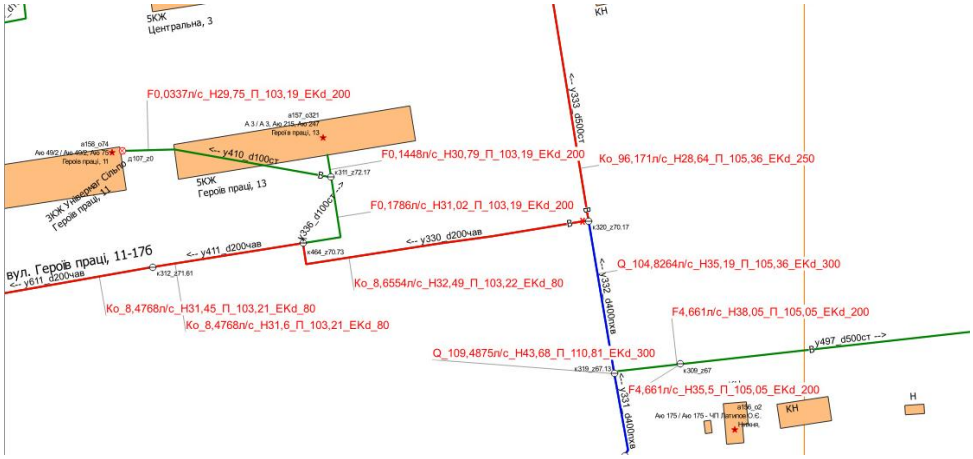


Рисунок 4 – Фрагмент цифрової моделі топологічної структури мережі водопостачання

На рис.5 наведений приклад розгалужень мережі водопостачання на діючій мережі м.Вільнянськ. Стрілка коричневого кольору – умовний знак засувки,

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

який розташований біля колодязя на водоводі з боку підключення. Цифри +500, +50 над стрілками - діаметри засувок.

На електронній векторній цифровій карті забезпечується одночасне отримання геопросторової інформації про розташування мережі водопостачання, графічного атрибуту – схеми деталіровки колодязя та технічних параметрів (рис.6).

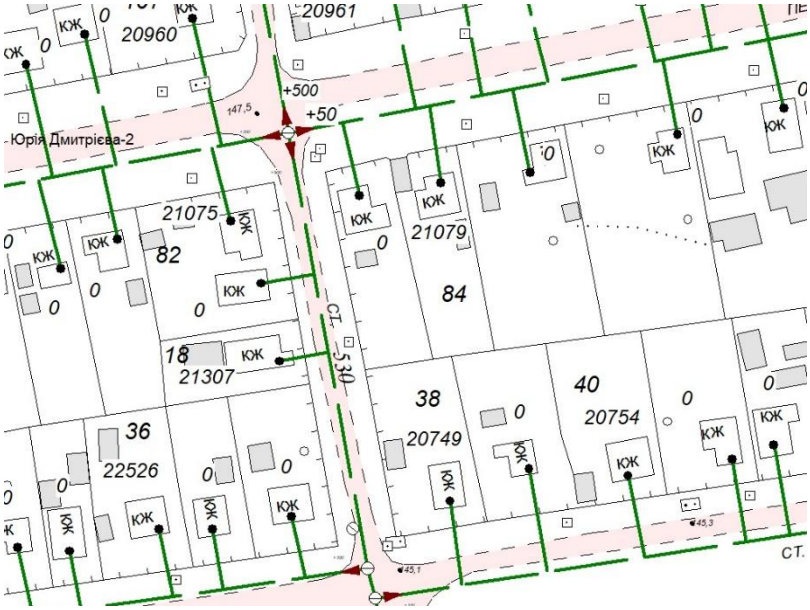


Рисунок 5 – Приклад розгалужень мережі водопостачання на діючій мережі

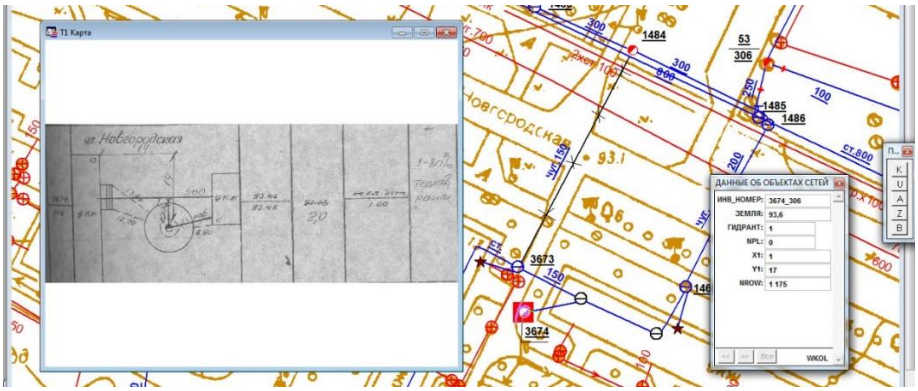


Рисунок 6 – Приклад застосування електронної векторної цифрової карти

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі запропоновано математичну модель топологічної структури мережі водопостачання, визначено бази геопросторових даних про об’єкти мережі та взаємозв’язки цих об’єктів з врахуванням топологічної структури цієї мережі для забезпечення геоінформаційного та математичного моделювання гідравлічного стану мережі

водопостачання, вирішення задач обробки аварійних ситуацій, контролю якості питної води, оптимізації мережі, енергозбереження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О. Дослідження та розробка геоінформаційної підсистеми повірочного розрахунку міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(46). - Дніпропетровск, 2006. – С. 73-80.

2. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О., Савін В.В. Розробка і дослідження геоінформаційної системи обробки аварійних ситуацій міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(24). - Дніпропетровск, 2003. – С. 62-68.

3. Бахрушін В.Є., Миросенко Д.О. Дослідження та розробка геоінформаційної підсистеми конструкторського розрахунку міської мережі водопостачання // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(50). - Дніпропетровск, 2007. – С. 55-61.

4. Розрахунок водопровідних мереж. Навчальний посібник для вузів / Н.Н. Абрамов, М.М. Поспелова, М.А. Сомов и др. - М.: Будіздат, 1983.

5. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. - К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001, С. 268.

6. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система енергозберігаючого управління міськими мережами водопостачання // ЕТЕВК-2017 Міжнародний конгрес та технічна виставка. Збірка доповідей. - м.Чорноморськ, 2017. - С.221 - 224.

7. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система моделювання та управління міськими мережами водопостачання // ЕТЕВК-2019 Міжнародний конгрес та технічна виставка. Збірка доповідей. - м.Чорноморськ, 2019. - С.276 - 283.

8. Миросенко Д.О. Геоінформаційна система оптимального управління міськими мережами водопостачання // Водопостачання та водовідведення. Вип.5 - Київ, 2020. - С. 29 - 35.

9. Миросенко Д.О. Дослідження і розробка геоінформаційної підсистеми повірочного розрахунку міської мережі водопостачання // Водопостачання та водовідведення. Вип.6 - Київ, 2020. - С. 21 - 25.

10. Горбань О.М., Миросенко Д.О. Дослідження, математичне моделювання й розробка геоінформаційної системи оперативного енергоощаджуючого управління міською мережою водопостачання // Держава та регіони. Серія “Державне управління”. - Вип. №2. – Запоріжжя, 2006. – С.31-46.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

11. Математичні методи та інформаційні технології в управлінні земельними ресурсами. Монографія / Д.І. Левінзон, О.М.Горбань, Д.О.Миросенко та інші. - Запоріжжя: КПУ, 2009. - 132с.

REFERENCES

1. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O. Doslidzhennia ta rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy povirochnoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 5(46). - Dnipropetrovsk, 2006. – S. 73-80.

2. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O., Savin V.V. Rozrobka i doslidzhennia heoinformatsiinoi systemy obrobky avariinykh sytuatsii miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 1(24). - Dnipropetrovsk, 2003. – S. 62-68.

3. Bakhrushin V.Ie., Myrosenko D.O. Doslidzhennia ta rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy konstruktorskoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. - Vypusk 3(50). - Dnipropetrovsk, 2007. – S. 55-61.

4. Rozrakhunok vodoprovidnykh merezh. Navchalnyi posibnyk dlia vuziv / N.N. Abramov, M.M. Pospelova, M.A. Somov y dr. - M.: Budizdat, 1983.

5. Umovni znaky dlia topohrafichnykh planiv masshtabiv 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. - K.: Ministerstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 2001, S. 268.

6. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema enerhozberihaiuchoho upravlinnia miskymy merezhamy vodopostachannia // ETEVK-2017. Zbirka dopovidei. - m.Chornomorsk, 2017. - S.221 - 224.

7. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema modeliuvannia ta upravlinnia miskymy merezhamy vodopostachannia // ETEVK-2019 Mizhnarodnyi konhres ta tekhnichna vystavka. Zbirka dopovidei. - m.Chornomorsk, 2019. - S.276 - 283.

8. Myrosenko D.O. Heoinformatsiina systema optymalnoho upravlinnia miskymy merezhamy vodopostachannia // Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Vyp.5 - Kyiv, 2020. - S. 29 - 35.

9. Myrosenko D.O. Doslidzhennia i rozrobka heoinformatsiinoi pidsystemy povirochnoho rozrakhunku miskoi merezhi vodopostachannia // Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Vyp.6 - Kyiv, 2020. - S. 21 - 25.

10. Horban O.M., Myrosenko D.O. Doslidzhennia, matematychne modeliuvannia y rozrobka heoinformatsiinoi systemy operatyvnoho enerhooshchadzhuiuchoho upravlinnia miskoiu merezhoiu vodopostachannia // Derzhava ta rehiony. Seriia “Derzhavne upravlinnia”. - Vyp. № 2. – Zaporizhzhia, 2006. – S.31-46.

11. Matematychni metody ta informatsiini tekhnolohii v upravlinni zemelnymy resursamy. Monohrafiia / D.I.Levinzon, O.M.Horban, D.O.Myrosenko ta inshi. - Zaporizhzhia: KPU, 2009. - 132s.

Received 03.01.2024.
Accepted 08.01.2024.

Mathematical model of the topological structure of the urban water supply network

To effectively manage urban water supply networks, utility companies providing water supply and drainage (hereinafter referred to as KP "Vodokanal") need to solve the following problems: - use of topographic maps of scales 1:500, 1:1000, 1:2000, which include both ground-based buildings , as well as adjacent underground communications - water supply and sewerage, electrical networks, gas supply networks, heat supply, communications, etc.; - hydraulic calculations of the water supply network to determine the condition, analysis and optimization of the network structure; - prompt elimination of emergency situations and resumption of the network after the emergency is eliminated; - control and management of drinking water quality; - availability of pressure, flow and piezometer monitoring devices; - automated control of pumping stations; - saving energy resources; – network inventory. A comprehensive solution to these problems is provided by a geoinformation automated water supply network management system. Automated network management is carried out using geoinformation technologies, mathematical and geoinformation models of the water supply network. The work proposes a mathematical model of the topological structure of the water supply network, defines geospatial data bases about network objects and the interrelationships of these objects, taking into account the topological structure of the network to provide geoinformation and mathematical modeling of the hydraulic state of the water supply network, solving problems of emergency processing, monitoring the quality of drinking water, and optimizing the network, energy saving. To construct a digital model of the branched-ring structure of a topological graph, digital vector topographic maps are used as follows: - based on the results of geodetic surveys, water supply network facilities are marked on the topographic map with symbols; - analysis of information-graphic diagrams of well details indicates the presence of pressure/flow regulators and hydrants. If there are regulators, their symbols are applied to the polyline of the water supply section at the symbol of the well at the point where the water pipe is inserted into the well, their diameters and the percentage of opening are indicated; - if there is a hydrant, the symbol for a well without a hydrant is replaced with the symbol for a well with a hydrant; - for all objects of the water supply network, the values of technical and graphic parameters are determined; - the orientation of the graph is determined - the direction of water flow; – a matrix of incidents of vertices and contours is formed.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Гнатушенко Володимир Володимирович - д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

Миросенко Дмитро Олексійович - аспірант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), головний програміст Концерну «Міські теплові мережі» (м. Запоріжжя).

Hnatushenko Volodymyr - doctor of technical science, professor, head of department of information technologies and computer engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Myrosenko Dmytro - postgraduate of department of information technologies and computer engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-02
УДК 004.896

В.М. Льовкін

ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ПРИ РОЗРОБЦІ ІНТЕГРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ ПОВІТРЯ

Анотація. У даній роботі прогнозування забрудненості повітря досліджується в контексті менш дослідженого забруднювача повітря, яким є діоксид азоту, з врахуванням впливу на його концентрацію автомобільного трафіку на основі прогнозованих значень, що не розглядається в інших існуючих дослідженнях. Мета роботи полягала в дослідженні впливу використання системного підходу на точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту. Проведене експериментальне дослідження вказує на те, що використання підходу, що базується на принципах системного аналізу, дозволяє підвищити точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту за рахунок використання в якості вхідних ознак моделі прогнозованих значень автомобільного трафіку замість значень за минулі періоди.
Ключові слова: прогнозування забрудненості повітря, діоксид азоту, концентрація забруднювача, машинне навчання, системний аналіз, автомобільний трафік, довга коротокочасна пам'ять, середня абсолютна похибка.

Постановка проблеми. Проблеми екології так чи інакше впливають на життя кожної сучасної людини у світі. До таких проблем зокрема відноситься забрудненість повітря. Кожен з забруднювачів має свій вплив на стан здоров'я людини, при чому критичний вплив може досягатися не тільки, якщо він довгостроковий: людина не обов'язково повинна перебувати протягом всього року в екологічних умовах з великим середньорічним вмістом відповідної речовини.

Забруднення повітря має критичний вплив на здоров'я людей, адже підвищує смертність через респіраторні, серцево-судинні захворювання, ускладнює протікання захворювань і лікування від інфекцій нижніх дихальних шляхів, випадків передчасних пологів, що відповідно є основними причинами смертності або ускладнень у глобальному вираженні [1].

Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації здоров'я [1] вміст у пові-

© Льовкін В.М., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

трі діоксиду азоту, який розглядається в цій роботі, протягом періоду в 24 години має становити 25 мкг/м^3, але якщо рівень смертності, що відповідає цьому значенню, встановлювати рівним 100, то у випадку, якщо вміст за такий період досягне 50 мкг/м^3, рівень смертності оцінюється у 102, а за досягнення 120 мкг/м^3 – 107. Тож коливання вмісту діоксиду азоту навіть у короткостроковому періоді важливо прогнозувати якомога точніше: фактично кожна наступна година може вказувати на виявлення такого тривалого періоду підвищеного вмісту забруднювача, визначаючи необхідність прийняття рішень для зменшення впливу на здоров'я людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент існує ряд робіт, зокрема [2-6], в яких запропоновано рішення щодо прогнозування вмісту забруднювачів у повітрі. У роботах [2-4] використовуються моделі на основі графових згорткових нейронних мереж з гібридним використанням інших архітектур, але для врахування просторових співвідношень, заради чого такі моделі створюються, необхідно мати розгалужену систему станцій вимірювання, яка не завжди наявна. Відповідно в умовах обмеженості даних та ресурсів, що розглядаються в даній роботі, застосовувати такі моделі недоцільно або неможливо. Також слід виокремити, що при цьому описані моделі прогнозування не стосуються всіх забруднювачів одночасно, тобто зазвичай не є універсальними. Зокрема одним з забруднювачів, який менш активно розглядається при розв'язанні задачі прогнозування, є діоксид азоту. Можна виділити роботи [4-6], в яких моделі прогнозування запропоновані саме для діоксиду азоту. У цих роботах застосовуються різні моделі машинного навчання, зокрема в роботі [4] досліджено щоденне прогнозування на основі моделей глибоких нейронних мереж з архітектурами трансформер, довга короткочасна пам'ять або long short-term memory (LSTM), InceptionTime, ResNet, XceptionTime, MiniRocket, у роботі [5] прогнозування відбувається погодинно, а в основі використовуються штучні нейронні мережі, у роботі [6] прогнозування виконується на наступні 6 годин на основі двонаправлених згорткових LSTM. Переважно такі моделі базуються на вхідних ознаках, до яких належать концентрація забруднювача в повітрі в попередні моменти. Додатково у роботах [5-6] використано метеорологічні дані та дані трафіку, проте трафік подається на вхід за минулі години, а не за години, на які відбувається прогнозування, що є недоліком, зважаючи на те, що саме трафік у цей час впливає на забруднення повітря на виході моделі. На усунення цього недоліку (врахування трафіку за наступні години як результату прогнозування) направлено дане дослідження.

Мета роботи полягала в дослідженні впливу використання системного підходу на точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту.

Викладення основного матеріалу дослідження. Прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту є задачею прогнозування часового ряду. У класичній постановці цієї задачі необхідно за значеннями концентрації діоксиду азоту в повітрі на станції вимірювання D за минулий період часу виконати прогнозування концентрації діоксиду азоту в повітрі в наступний період часу. У такому випадку вхідні ознаки представлені набором послідовних значень концентрації діоксиду азоту в повітрі протягом H^F годин, які є послідовними. Результатом прогнозування є концентрація діоксиду азоту в повітрі протягом наступних H^{FP} годин. Тобто значення вхідних і вихідних ознак у підсумку формують часовий ряд, представлений значеннями, що відповідають $H^F + H^{FP}$ послідовним годинам. У випадку, коли кількість вхідних ознак відповідає кількості вихідних ознак моделі, тобто часові горизонти співпадають ($H^F = H^{FP}$), виходить, що $H^F + H^{FP} = 2H^F$.

Двигуни внутрішнього згорання є одним з головних джерел діоксиду азоту [7]. Тому логічною є необхідність врахування даного впливу в моделі прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту. Таке врахування зазвичай виконується на основі визначення автомобільного трафіку, який долає певну ділянку, безпосередньо пов'язану зі станцією D. Проте важливим є те, що при прогнозуванні концентрації діоксиду азоту в наступні $H^F + 1$, $H^F + 2$, …, $H^F + H^F$ години основний вплив на таку концентрацію здійснює обсяг трафіку відповідно в $H^F + 1$, $H^F + 2$, …, $H^F +$ $+ H^F$ години, а не в 1, 2, …, H^F години відповідно. Звичайно, що значення трафіку в $H^F + 1$, $H^F + 2$, …, $H^F + H^F$ години невідомі в момент прогнозування забрудненості повітря, тому для цього необхідно попередньо виконати прогнозування автомобільного трафіку. При системному розгляді пов'язаних проблем з даною можуть бути створені або вже наявні моделі прогнозування, зокрема прогнозування автомобільного трафіку, адже ця сукупність моделей зокрема відноситься до задач керування, планування діяльності, прийняття рішень у місті. Наявність сукупності таких моделей дозволяє розглядати відповідну інформаційну технологію як цілісну в складі інтегрованого середовища прогнозування забрудненості повітря. Запропоновано для прогнозування значень трафіку використовувати метод прогнозування автомобільного трафіку в умовах обмеженості даних та ресурсів [8].

Для побудови моделей прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту можуть використовуватися різні архітектури, проте в даній роботі розг-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

лядається випадок обмеженості даних та ресурсів, тому базова модель побудована на основі LSTM. Такий вибір обумовлений зокрема і тим, що мета роботи пов'язана з дослідженням впливу використання системного підходу на точність прогнозування. Тому достатньо використання LSTM як базової моделі, але дослідження різних варіантів вхідних ознак, пов'язаних з трафіком.

Окрім того випадок обмеженості даних та ресурсів характеризується також і тим, що станції вимірювання трафіку та забрудненості повітря не охоплюють всі потрібні локації, а відповідно можуть не охоплювати і одні ті самі ділянки, тобто на одній ділянці вимірюється забрудненість повітря діоксидом азоту, але не вимірюється автомобільний трафік. Тоді розглянуте вище питання вибору вхідних ознак набуває потреби додаткового врегулювання. Для цього було використано метод вибору вхідних ознак на основі Random Forest. Для цього при створенні кожної моделі прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту для відповідної станції D відбувався вибір максимум 2 станцій вимірювання автомобільного трафіку на основі методу Random Forest з формуванням підмножин B^{SP}. Таким чином визначалися станції B^{SP}, обсяг автомобільного трафіку за якими мав найбільший вплив на забрудненість повітря діоксидом азоту за станцією D. Для визначення такого впливу використовувались або дані автомобільного трафіку за 1, 2, …, H^F годин для моделей з додатковими ознаками на основі минулих значень, або фактично зафіксовані значення обсягу автомобільного трафіку за $H^F + 1$, $H^F + 2$, …, $H^F + H^F$ годин.

Для перевірки ефективності запропонованого рішення було виконано експериментальне дослідження, для якого використано дані про автомобільний трафік [9] та забрудненість повітря діоксидом азоту [10] в місті Мадрид (Іспанія), які доступні через Портал відкритих даних Мадридської міської ради [11]. З цих даних виділено записи, які стосуються періоду з 1 січня 2019 року до 30 вересня 2022 року. Ці дані було розподілено на навчальні, валідаційні та тестові у співвідношенні відповідно 60 %, 20 %, 20 %. На основі цих даних було створено і навчено 3 типи моделей для кожної станції вимірювання забрудненості повітря діоксидом азоту:

– моделі прогнозування концентрації діоксиду азоту на наступні 6 годин на основі LSTM з використанням значень концентрації діоксиду азоту за минулі 6 годин (LSTM-base);

– моделі прогнозування концентрації діоксиду азоту на наступні 6 годин на основі LSTM з використанням значень концентрації діоксиду азоту та обсягу автомобільного трафіку за минулі 6 годин за станціями вимірювання, відібра-

ними для кожної моделі окремо (LSTM-traffic);

– моделі прогнозування концентрації діоксиду азоту на наступні 6 годин на основі LSTM з використанням значень концентрації діоксиду азоту за минулі 6 годин та значень обсягу автомобільного трафіку за наступні 6 годин, отриманих шляхом прогнозування за методом [8], за станціями вимірювання з підмножин B^{SP}, відібраними для кожної моделі окремо (LSTM-predicted-traffic).

Результати експериментального дослідження приведені в таблиці 1. Для оцінювання моделей використано показник середньої абсолютної похибки або mean absolute error (MAE).

Отримані результати продемонстрували, що середня абсолютна похибка для моделі без додаткових вхідних ознак (LSTM-base) була покращена на 3 % за використання як додаткових вхідних ознак значень обсягу автомобільного трафіку за минулі 6 годин (LSTM-traffic).

За використання прогнозованих значень автомобільного трафіку (LSTM-predicted-traffic) середня абсолютна похибка була покращена на 5 %, а в найкращому випадку – на 10 %. Порівнюючи використання значень трафіку за минулі години та прогнозованих значень, варто також вказати на те, що окрім зменшення середньої абсолютної похибки відбулось збільшення кількості станцій вимірювання, для яких було покращено значення середньої абсолютної похибки, яке виявилось меншим за базову модель тільки у 2 випадках. Усе це дозволяє стверджувати про доцільність створення інтегрованого середовища прогнозування забрудненості повітря замість побудови окремих незв'язаних моделей. При цьому отриманий результат прогнозування залежить також і від точності прогнозування автомобільного трафіку. Слід розуміти, що в даній постановці задачі розглядається саме випадок обмеженості даних та ресурсів, тому моделі, які використовуються для прогнозування автомобільного трафіку визначаються в умовах, коли складність таких моделей має бути обмеженою, а дані про трафік наявні на обмеженому просторі, що має певний вплив і на точність моделей прогнозування автомобільного трафіку. З іншого боку загальний автомобільний трафік тільки частково визначає забрудненість повітря діоксидом азоту. Відповідно дані експериментальні дослідження вказують на те, що саме в умовах обмеженості даних та ресурсів було досягнуто покращення отриманих результатів прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту за використання принципів системного аналізу та врахування наявних зв'язків між моделями прогнозування забрудненості повітря та автомобільного трафіку.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту

Номер станції вимірювання	MAE для LSTM-base	MAE для LSTM-traffic	MAE для LSTM-predicted-traffic
1	0,03156	0,03412	0,03642
2	0,03585	0,03535	0,03322
3	0,04641	0,04366	0,04436
4	0,03634	0,03607	0,03747
5	0,06193	0,05997	0,05825
6	0,05002	0,04921	0,0477
7	0,04449	0,04165	0,04231
8	0,05408	0,05167	0,05069
9	0,05137	0,05165	0,04783
10	0,04794	0,04431	0,04452
11	0,04491	0,04368	0,04322
12	0,05863	0,05724	0,05355
13	0,05451	0,05547	0,05379
14	0,06211	0,05703	0,05697
15	0,05283	0,04967	0,04889
16	0,0454	0,04532	0,04488
17	0,05254	0,05334	0,05086
18	0,03527	0,03854	0,0342
19	0,04348	0,0417	0,04087
20	0,04331	0,0421	0,04152
21	0,05669	0,05356	0,05351
22	0,04317	0,03836	0,03886
23	0,05001	0,04672	0,04567
24	0,05213	0,04989	0,04746

Висновки. Проведений аналіз проблеми прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту в контексті останніх проведених досліджень дозволив встановити, що тільки в деяких з запропонованих моделей трафік враховується як вхідні ознаки, але використовуються виключно значення, зафіксовані в минулі періоди часу. Тоді навіть якщо паралельно існують моделі прогнозування

автомобільного трафіку і забрудненості повітря діоксидом азоту, існуючі зв'язки між результатами використання цих моделей не враховуються системно.

Враховуючи, що на забрудненість повітря в певну годину впливає автомобільний трафік не за минулі години, а за поточну, у роботі було досліджено, як впливає використання прогнозованих значень автомобільного трафіку на прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту порівняно з використанням значень трафіку за минулі години. Для цього було створено моделі на основі LSTM тільки на основі концентрації забруднювача за минулі години, з додатковим використанням значень автомобільного трафіку за минулі години та отриманих шляхом прогнозування. Останній з перелічених варіантів моделей представляв системний підхід, оскільки безпосередньо застосовував інші існуючі в середовищі прогнозування моделі. Створені моделі були порівняні в процесі експериментального дослідження на основі даних, зібраних у місті Мадрид.

Використання підходу, що базується на принципах системного аналізу, дозволяє підвищити точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту, створюючи для цього інтегроване середовище прогнозування забрудненості повітря, яке об'єднує в собі інформаційні технології прогнозування автомобільного трафіку та прогнозування забрудненості повітря.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. World Health Organization, WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021.

2. P. Muthukumar, K. Nagrecha, D. Comer et al., "PM2.5 Air Pollution Prediction through Deep Learning Using Multisource Meteorological, Wildfire, and Heat Data", Atmosphere, vol. 13, no. 5, article 822, 2022. DOI: 10.3390/atmos13050822.

3. B. Liu, M. Wang M., and H. W. Guesgen, "A hybrid model for spatial–temporal prediction of PM2.5 based on a time division method", International Journal of Environmental Science and Technology, vol. 20, no. 11, pp. 12195 – 12206, 2023. DOI: 10.1007/s13762-023-04813-z.

4. A. AlShehhi, and R. Welsch, "Artificial intelligence for improving Nitrogen Dioxide forecasting of Abu Dhabi environment agency ground-based stations", Journal of Big Data, vol. 10, art. 92, 2023. DOI: 10.1186/s40537-023-00754-z.

5. M. I. Rodriguez-Garcia, M. C. Ribeiro Rodrigues, J. Gonzalez-Enrique, J. J. Ruiz-Aguilar, and I. J. Turias, "Forecasting air pollutants using classification models: a case

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

study in the Bay of Algeciras (Spain)", Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, vol. 37, pp. 4359-4383, 2023. DOI: 10.1007/s00477-023-02512-2.
6. D. Iskandaryan, F. Ramos, and S. Trilles, "Bidirectional convolutional LSTM for the prediction of nitrogen dioxide in the city of Madrid", PLoS One, vol. 17, no. 6, article e0269295, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0269295.
7. European Environment Agency, Explaining road transport emissions: A non-technical guide. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. doi: 10.2800/71804.
8. V. M. Lovkin, S. A. Subbotin, and A. O. Oliinyk, "Method for Agent-Oriented Traffic Prediction under Data and Resource Constraints", Radio Electronics, Computer Science, Control, vol. 4, pp. 99-110, 2023. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-4-10.
9. Aforos de trafico en la ciudad de Madrid permanentes – Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid, 2023. [Online]. Available: https://datos.madrid.es/sites/v/index.jsp?vgnextoid=fabbf3e1de124610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD.
10. Calidad del aire. Datos horarios desde 2001 – Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid, 2023. [Online]. Available: https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=f3c0f7d512273410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD.
11. En portada – Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid, 2023. [Online]. Available: https://datos.madrid.es/portal/site/egob.

Received 03.01.2024.
Accepted 08.01.2024.

Application of the principles of systems analysis for the development of environment for integrated air pollution forecasting

Air pollution forecasting is a well-known scientific problem, but nitrogen dioxide is not often considered as a pollutant in the problem. Traffic, presented by vehicle emissions, is one of the main sources of air pollution by nitrogen dioxide. Some existing investigations take traffic into account as input features for forecasting models but traffic is presented by values measured during previous hours. Therefore, separate models are created and trained for every air pollution measurement station. Trained forecasting models are not used systematically and models for forecasting other indicators are not applied. But air pollution over current hour is caused by traffic mostly at the same place over the same hour but not over previous hours. Therefore, it is important to investigate how usage of forecasted values of traffic impacts on air pollution by nitrogen dioxide in comparison with usage of traffic values measured over previous hours. This task is con-

sidered in the paper.

The objective of the study is to investigate impact of system approach on accuracy of forecasting air pollution by nitrogen dioxide. Three types of forecasting models based on long short-term memory were created to investigate such an impact. These types include models with concentration of nitrogen dioxide over previous hours as input features and two types of models with additional input features presented by values of traffic over previous hours and by forecasted values of traffic over output hours correspondingly. The last type of models presented application of systems approach, as it uses other models available in the integrated forecasting environment. Experimental investigation allowed to create and train models as well as to compare the results of the models on the datasets representing car traffic and air pollution in Madrid. Application of the approach based on the principles of systems analysis increases accuracy of forecasting air pollution by nitrogen dioxide. It enables to create integrated air pollution forecasting environment, which combines information technologies of traffic and air pollution forecasting.

Льовкін Валерій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Lovkin Valerii – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Tools, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

«Системні технології» 1 (150) 2024 «System technologies»
DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-03
УДК 616-093

В.В. Багрій, Р.В. Волошин, О.О. Жульковський, Ю.В.Ульяновська

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ НЕВЕРБАЛЬНИХ ЕКСТРАЛІНГВІСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Анотація. Під час розмови людина неоднаково сприймає невербальні сигнали. Одні – більш чутливі, інші – менш, що можна пов'язати зі сферою комунікації, досвіду з фіксацією та розшифровуванням невербальної комунікації. Невербальна комунікація та мовна комуні кація передбачають зворотній зв'язок. Він може бути позитивним, що сприятливо впли ває на взаємність між співрозмовниками, та негативний, що породжує деструктивні вза ємини. Мова людини оператора є дуже нерозбірливою та містить у собі багато переш код, для придушення яких необхідно використовувати адаптивну фільтрацію. Саме такі системи розглянуто в роботі.

Також проаналізовано фільтрацію на основі фільтру Вінера для розпізнавання, ідентифі кації та контролю психофізіологічного стану (ПФС) оператора на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик.

Ключові слова: імітаційне моделювання, людина оператор, невербальні екстралінгвісти чні характеристики, фільтр Вінера, схема ідентифікації, адаптивна фільтрація.

Постановка проблеми. На теперішній час постійного діалогу людини та комп'ютера, коли створюються системи штучного інтелекту, існує значний попит на системи інтелектуального контролю та системи «людина-машина». Такі системи є дуже складними і потребують аналізу та дослідження. Публікації, присвячені імітаційному комп'ютерному моделюванню системи контролю ПФС людини, представлені головним чином у роботах [1-3].

Основа системи діалогового спілкування людини та комп'ютера це система перетворення «мова-текст». Використання цієї системи є базою для створення систем мовного керування комп'ютером. На відміну від систем, що працюють за принципом ідентифікації однократної відповіді користувача на запит та пропозицію або питання з бази паролів, необхідно розширити мовний інтерфейс комп'ютера. Доцільно, аби комп'ютер приймав команди від оператора та виконував їх тільки у випадку, коли голос та його тембр відповідає зареєстрованому в базі. Така система дозволить розмежувати доступ до

© Багрій В.В., Волошин Р.В., Жульковський О.О., Ульяновська Ю.В., 2024

комп'ютера та забезпечити безпеку для користувача, зберегти його конфіденційність або зберегти його особисті данні. Провівши аналіз мовної активності оператора, стало зрозуміло, що необхідно розробити систему командного керування та перетворення «мова-текст» у потоці злитої мови. Це завдання вирішують за рахунок порівняння слів команд та є частиною проблеми автоматичного розпізнавання та розуміння мови людини-оператора [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши різні системи мовного діалогу «людина-машина», можливо прийти до висновку, що багато систем дозволяють оператору працювати без попереднього налаштування. Проте, такі системи налаштовані на поліпшення якості розпізнавання мови та голосу після навчання. Незалежність від оператора в таких системах досягається за рахунок використання звукових еталонів для найбільш використаних слів та тембрів голосів операторів. Для випадку частого та тривалого «спілкування» людини з персональним комп'ютером у БД накопичується статистика артикуляційної діяльності та особливості оператора на більших обсягах мовних даних. Для цих систем дуже важливим є значне скорочення кількість допущених помилок.

Проблема діалогу людини та комп'ютера є частиною загальної проблеми для систем штучного інтелекту. За основу таких систем діалогового спілкування людини та комп'ютера лягають системи перетворення «мова-текст». На базі таких систем може бути створена система мовного керування комп'ютером. Аналіз показав, що на відміну від текстово-залежних систем ідентифікації, у системах із діалоговим методом реалізується не тільки однократна відповідь оператора на запит або питання з бази паролів, але і розширення його повноцінного мовного інтерфейсу. Комп'ютер приймає команди від оператора та виконує їх тільки в тому випадку, якщо голос співпадає з зареєстрованим у БД. Цей аналіз є ефективним в умовах реальної мовної активності оператора.

Літературний огляд показав, що для розробки систем командного керування й перетворення «мова-текст» у потоці злитої мови необхідно використовувати «механізми» автоматичного розпізнавання та розуміння мови оператора. Проте, ці «механізми» мають деякі недоліки, пов'язані з великою кількістю завад. Відмітимо, що для рішення таких задач необхідно використовувати в них фільтрації голосових даних [3, 4].

Мета дослідження. Метою роботи є вирішення задач фільтрації голосових даних у системах моделювання контролю «людина-оператор» на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик для імітаційного моделювання

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

систем контролю ПФС людини.

Викладення основного матеріалу дослідження. Люди під час розмови неоднаково сприймають невербальні сигнали. Одні – більш чутливі, інші – менш. Сприйняття ще можна пов’язати зі сферою комунікації, досвіду з фіксацією та розшифровуванням невербальної комунікації. Невербальна комунікація та мовна комунікація передбачають зворотній зв'язок. Він може бути позитивним, який сприятливо впливає на взаємність між співрозмовниками, та негативний, який породжує деструктивні взаємини. Тоді партнери роздратовано спілкуються та подають негативні сигнали.

Одне і теж саме слово може бути вимовлене з використанням найрізноманітніших відтінків. Ці відтінки передаються за допомогою міміки, жестів та інтонацій. З використанням цього співрозмовники відображають найтонші переливи людського настрою та почуттів.

Дані дослідження проводилися в акустично ізольованій аудиторії, де були присутні два оператора – «експериментатор» та «диктор». При досліджені було використано програмне забезпечення: Wavelab (Demo version), Goldwave (Demo version), Matlab (Demo version).

Під час проведення роботи виконано запис командних слів за допомогою мікрофону у програмному середовищі Wavelab із частотою дискретизації 16 кГц, моно, 16 біт.

Будь-який сигнал, який змінюється в часі, можна представити у вигляді вектору з кількістю відліків, рівним добутку його довжини на частоту дискретизації. Використавши це можливо провести статистичні дослідження, а саму роботу зручно виконувати для масивів однакової довжини.

Одержимо 10000 відліків сигналу. Довжина тимчасового інтервалу у 0,6 с команди – це максимум. В якості статистичних характеристик вибиралися точкові оцінки. Результат виміру будь-якої фізичної величини – струму, напруги, щільності, тиску й інших – можливо трактувати, як значення деякої випадкової величини x, яка характеризується щільністю розподілу ймовірностей $W(x)$.

Найчастіше виправдані припущення про цілком конкретний вид функції:

$$W(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - M(x))^2}{2\sigma^2}}$$

де $M(x)$ та σ – відповідно математичне очікування (МО) і стандартне відхилення (СВ) x.

При цьому природно оцінювати не функцію $W(x)$, а всього два її параметри – $M(x)$ і σ, які вдало її характеризують. Зрозуміло, якщо закон $W(x)$ не є нор-

мальним, тоді параметрів $M(x)$ і σ недостатньо для повного подання про властивості СВ x. Однак й у цьому випадку дані параметри по своїй важливості стоять на першому місці.

Позначимо спостережувані значення випадкової величини СВ:

$$X_1, X_2, \ldots X_N . \quad (1)$$

Їх можна розглядати як N «екземплярів» СВ x, тобто N незалежних СВ, кожна з яких розподілена по тим же законам, що й СВ x. Позначимо $\tilde{a}$ оцінку параметра a. Будь-яка оцінка, що обчислює на основі матеріалу (1), представляє собою функцію величин X_1, X_2, X_N:

$$\tilde{a} = \tilde{a}(X_1, X_2, \ldots X_N)$$

і, отже, сама є випадковою величиною. Таку оцінку часто називають точковою, оскільки на практиці вона являє собою єдине випадкове число.

Розглянемо формули для обчислення точкових оцінок параметрів.

Математичне очікування є зваженим середнім арифметичним усіх значень випадкової величини:

$$M(x) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i$$

Дисперсія служить для характеристики СВ від центра розподілу. Дисперсія дорівнює математичному очікуванню квадрата СВ від центра її математичного очікування:

$$D(X) = M[X - M(X)]^2 .$$

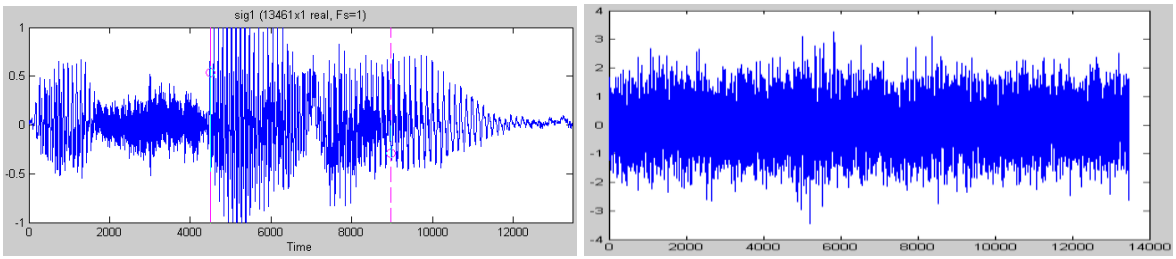
Також для оцінки відхилення СВ від цента розподілу використовується середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)} .$$

У нашому випадку N=1000. Тоді обчислимо дані оцінки, використовуючи Matlab. Для підвищення перешкодозахищеності підсистеми розпізнавання голосових команд оператора використовуємо вінерівську фільтрацію сигналів. Для вихідного сигналу виконаємо накладення білого шуму.

На рис. 1 зображені порівняльні результати проведених експериментів.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)



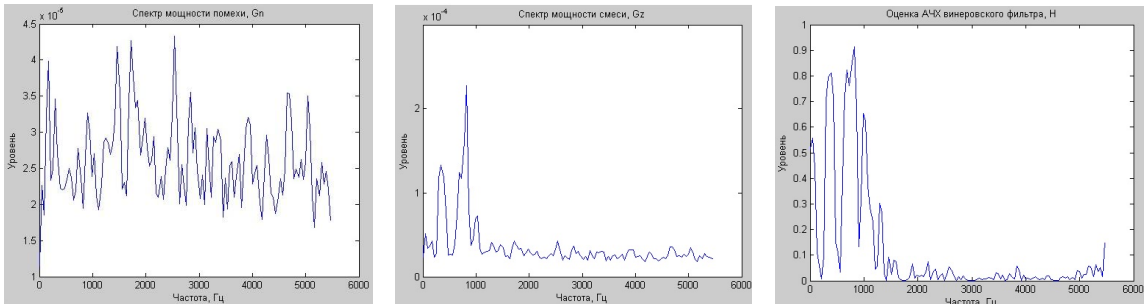
а) б)

Рисунок 1 – Порівняльні експериментальні дані:
а) – вихідний сигнал; б) – зашумлений сигнал

У подальшому розглянемо спектральні характеристики сигналу та обчислимо спектри суміші Gz(f) й перешкоди Gn(f) (рис. 2).

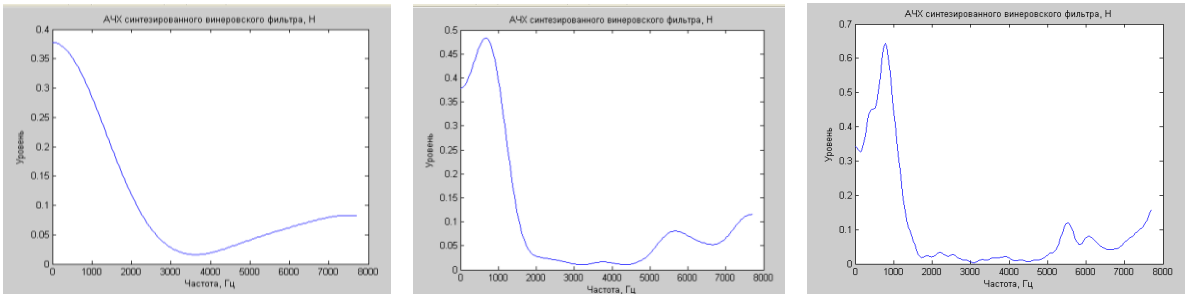
На рис. 3 представлено графіки апроксимації фільтру Вінера (34, 100, 250 порядків).

Як видно, найкраще наближення дає 250 порядок, для якого побудуємо графіки фільтрації (рис. 4).



а) б) в)

Рисунок 2 – Графіки оцінок суміші Gz(f) й перешкоди Gn(f).:
а) оцінка спектрів потужності перешкоди та суміші; б) оцінка АЧХ фільтру;
в) оцінка необхідної АЧХ фільтру Вінера



а) б) в)

Рисунок 3 – Залежність часу обчислень від розмірності матриці:
а) апроксимація АЧХ (34 порядок); б) апроксимація АЧХ (100 порядок);
в) апроксимація АЧХ (250 порядок)

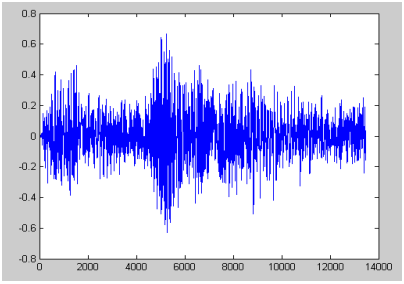
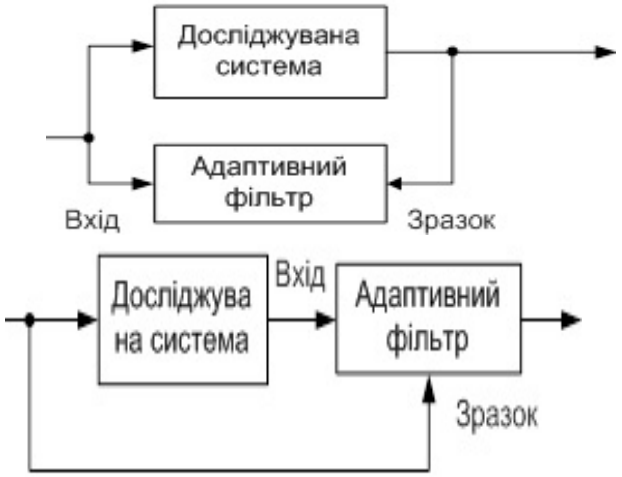


Рисунок 4 – Результат фільтрації

Результат далекий від ідеалу, тому що сигнал погано сприймається на слух [5]. Для того, аби покращати фільтрацію можна використати адаптивну фільтрацію. Вхідний сигнал є загальним для досліджуваної системи та для адаптивного фільтра. Він служить для адаптивного фільтру зразковим сигналом. Процес адаптації – тимчасовий, а частотні характеристики фільтру прагнуть до відповідних характеристик системи. Вихідний сигнал системи надходить на вхід адаптивного фільтру і є зразком для адаптивного фільтра.

Простежимо, як адаптивний фільтр використовує інформацію, для формування вихідних сигналів [6, 7].

Варіанти схем адаптивних фільтрів представлено на рис. 5.



а) б)

Рисунок 5 – Схеми адаптивних фільтрів:
а) прямий фільтр; б) зворотній фільтр

Адаптивний фільтр має два входи: на один вхід подається сигнал із входу досліджуваної системи, а на другий – з виходу. Таким чином, адаптивний фільтр має достатньо інформації щодо характеристик досліджуваної системи.

Далі простежимо, як адаптивний фільтр формує вихідний сигнал. Для цьо-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

го забезпечимо оператора системою мовного зв'язку. Мікрофон сприймає мовний сигнал, який неминуче є сильно зашумленим. Цей шум не можливо зняти з мовного сигналу, але можливо використовувати інший, контрольний мікрофон, як показано на загальній схемі (рис. 6). Ця схема фільтрує та перетворює різні спотворення [3, 5, 6].

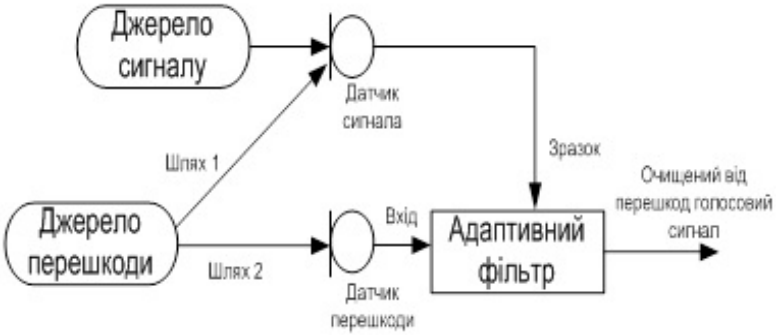


Рисунок 6 – Структурна схема придушення шуму
з використанням адаптивного фільтру

Випадкові шумові процеси, які сприймають два мікрофони будуть корельованими. Вони виходять із загального джерела, а шумовий сигнал не корелюється з корисним мовним сигналом.

Проаналізувавши рис. 5 і рис. 6, приходимо до висновку, що за допомогою адаптивного фільтру можна вирішити завдання прямої ідентифікації «досліджуваної системи». Ця ідентифікація дає можливість перетворить шум на шляху від джерела шуму до датчику сигналу («шлях 1»).

«Головний» вхідний сигнал – це сигнально-шумова суміш з виходу основного мікрофона, а шум з виходу додаткового мікрофона – «допоміжний». Шумовий сигнал від додаткового мікрофона (рис. 6) можна назвати «вхідним» (input) По-іншому його називають «опорний», в американській літературі – reference.

Відмітимо, що адаптивний фільтр намагається перетворити вхідний сигнал якнайближче до зразка. Оскільки в вхідному сигналі фільтра корельована лише шумова складова зразкового сигналу у режимі, що встановився, то на виході фільтра буде виходити оцінка шуму, що присутня в зразковому сигналі. Цей вихідний сигнал, потрібний лише як допоміжний засіб для одержання другого вихідного сигналу, так званого сигналу «помилки». Він розраховується як різниця між зразковим сигналом та вихідним сигналом адаптивного фільтру.

«Помилка» – це очищений від шуму мовний сигнал. Таким чином, адаптивний фільтр, крім двох входів, повинен мати два виходи. За поставленим за-

вданням, «головним» вихідним сигналом є очищений від шумів мовний сигнал. Він є різницевим (різниця між зразковим сигналом і другим вихідним сигналом адаптивного фільтру)

Другий вихідний сигнал адаптивного фільтра є «допоміжним». Він виконує роль оцінки шуму, який маскує мовний сигнал. Цей сигнал будемо називати «шумом, наведеним до входу головного мікрофона» y(k), його знімають з виходу керованого фільтру, також цей сигнал можливо визначити як «вихідний сигнал» або, output.

Структурна схема адаптивного фільтру представлена на рис. 7. Сам фільтр складається з трьох компонентів: фільтр, що перебудовується, блок (алгоритм) адаптації, керуючий параметрами фільтра, а також блок розрахунку.

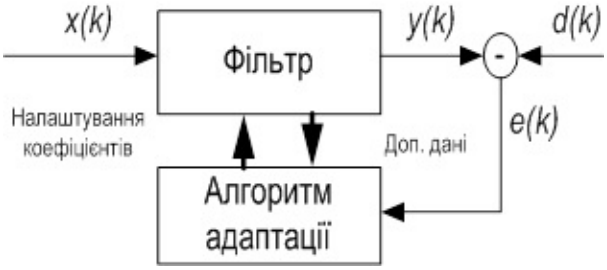


Рисунок 7 – Структура адаптивного фільтру

Опорний шумовий сигнал $x(k)$ обробляється фільтром. Після обробки в результаті виходить вихідний сигнал $y(k)$, який порівнюється зі зразковим сигналом $d(k)$. Різницю між ними утворює сигнал помилки $e(k)$. Основна задача адаптивного фільтра полягає у мінімізації помилок відтворення зразкового сигналу. Блок адаптації після обробки кожного відліку аналізує сигнал помилки. Додаткові дані, що надходять із фільтра, використовують як результати для аналізу та підстроювання параметрів (коефіцієнтів) фільтру.

Існує ще один варіант адаптації, при якому опорний шумовий сигнал не використовується. Цей режим роботи називається сліпою адаптацією (blind adaptation) або навчанням без вчителя (unsupervised learning). Тоді, у цьому випадку потрібно деяка інформація про структуру корисного вхідного сигналу (наприклад, знання типу й параметрів використовуваної модуляції). Сліпа адаптація є більш складним обчислювальним завданням, ніж адаптація з використанням зразкового сигналу.

Відмітимо, що фільтр, який показано на рис. 7, використовують найчастіше. Однією з переваг цього варіанта є стійкість при будь-яких значеннях коефіцієнтів. Проте алгоритм адаптації вносить до системи зворотний зв'язок. То-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ді адаптивна система в цілому може стати нестійкою.

Висновки. В роботі виконано вирішення задач фільтрації голосових даних системи моделювання контролю «людина-оператор» на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик для імітаційного моделювання систем контролю ПФС людини. Проаналізовано методи фільтрації голосу оператора для оцінки ПФС людини на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик.

Представлено фільтрацію на базі фільтру Вінера, розглянуто структурні схеми ідентифікації з використанням адаптивних фільтрів, схема придушення шуму з використанням адаптивного фільтру та схема для адаптивної фільтрації голосових команд оператора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корнацький В.М. Проблеми здоров'я суспільства та продовження життя / В.М.Корнацький. – К: Інститут кардіології ім. М.Д.Стражеска, 2006. – 46 с.

2. Шрюфер Е. Обробка сигналів. Цифрова обробка дискретизованих сигналів / Е.Шрюфер. – К: Либідь, 1992. – 294 с.

3. Бойко В.І. Стохастика електронних систем / В.І.Бойко. – К., 2007. – 380 с.

4. Бацевич Ф.С. Основи комунікативної лінгвістики: підручник / Ф.С.Бацевич. – К.: Вид. центр «Академія», 2004. – 344 с.

5. Мацько Л.І. Риторика: навч. пос. / Л.І.Мацько, О.М.Сидоренко, О.М.Мацько. – К.: Вища школа, 2003. – 311 с.

6. Chaudhari M. Study of Smart Sensors and their Applications / M.Chaudhari, S.Dharavath // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol.3, №1.

7. Antsiperov V.E. Multiscale correlation analysis of real medical and biological signals and their graphical-based representation / V.E.Antsiperov, Y.V.Obukhov // Proceedings of VIII International scientific conference «Physics and radioelectronics in medicine and ecology FREME'2008». – 2008. – Vol.1. – P.180-184.

8. Gupta V. A Study of Various Face Detection Methods / V.Gupta // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol.3, №5. – p.6694-6697.

9. Heikkilä M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects / M.Heikkilä, M.Pietikäinen // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – №28(4). – С.657-662.

10. Heikkil M. Description of Interest Regions with Center-Symmetric Local Binary Patterns / M.Heikkil, M.Pietikainen, C.Schmid // ICVGIP 2006. – p.58-69.

REFERENCES

1. Kornatskyi V.M. Problemy zdorovia suspilstva ta prodovzhennia zhyttia / V.M.Kornatskyi. – K: Instytut kardiolohii im. M.D.Strazheska, 2006. – 46 s.
2. Shriufer E. Obrobka syhnaliv. Tsyfrova obrobka dyskretyzovanykh syhnaliv / E.Shriufer. – K: Lybid, 1992. – 294 s.
3. Boiko V.I. Stokhastyka elektronnykh system / V.I.Boiko. – K., 2007. – 380 s.
4. Batsevych F.S. Osnovy komunikatyvnoi linhvistyky: pidruchnyk / F.S.Batsevych. – K.: Vyd. tsentr «Akademiia», 2004. – 344 s.
5. Matsko L.I. Rytoryka: navch. pos. / L.I.Matsko, O.M.Sydorenko, O.M.Matsko. – K.: Vyshcha shkola, 2003. – 311 s.
6. Chaudhari M. Study of Smart Sensors and their Applications / M.Chaudhari, S.Dharavath // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol.3, №1.
7. Antsiperov V.E. Multiscale correlation analysis of real medical and biological signals and their graphical-based representation / V.E.Antsiperov, Y.V.Obukhov // Proceedings of VIII International scientific conference «Physics and radioelectronics in medicine and ecology FREME'2008». – 2008. – Vol.1. – P.180-184.
8. Gupta V. A Study of Various Face Detection Methods / V.Gupta // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol.3, №5. – p.6694-6697.
9. Heikkilä M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects / M.Heikkilä, M.Pietikäinen // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – №28(4). – C.657-662.
10. Heikkil M. Description of Interest Regions with Center-Symmetric Local Binary Patterns / M.Heikkil, M.Pietikainen, C.Schmid // ICVGIP 2006. – p.58-69.

Received 03.01.2024.
Accepted 08.01.2024.

Simulation modeling of the system of managing the psychophysiological state of a person based on non-verbal extralinguistic characteristics

Today, when artificial intelligence systems are being created, the time of constant dialogue between humans and computer, there is a great demand for intelligent control systems and human-machine systems. These systems are very complex and require analysis and research. The publication is devoted to the simulation computer modeling of control of the psychological and physical state of a person.

The basis of the human-computer dialogue system is the speech-to-text conversion system. The use of this system is the basis for the creation of computer language control systems. Unlike systems that work on the principle of identifying a single user response to a request and a proposal or a question from a password database, it is necessary to expand the language interface of the computer. It is necessary for the computer to accept

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

commands from the operator and execute them only if the voice and its timbre match those registered in the database. Such a system will allow you to differentiate access to the computer and ensure security for the user, preserve his privacy or save his personal data. After analyzing the speech activity of the operator, it became clear that it was necessary to develop a system of command control and «speech-to-text» conversion in the fused speech stream. This task is solved by comparing the words of the commands and is part of the problem of automatic recognition and understanding of the operator's human language.

On the basis of such systems, a computer language control system can be created. The analysis has shown that unlike text-dependent identification systems, systems with a dialog method implement not only a one-time operator response to a query or question from the password database, but also the extension of its full-fledged language interface.

The computer receives commands from the operator and executes them only if the voice matches the one registered in the database. This analysis is effective in the context of real-life speech activity of the operator. The literature review showed that for the development of systems of command control and "speech-to-text" transformation in a stream of fused speech, it is necessary to use "mechanisms" of automatic recognition and understanding of the operator's language.

Багрій Віктор Васильович – к.т.н., доцент кафедри електроніки та електронних комунікацій, Дніпровський державний технічний університет; vvbagry@ukr.net; ORCID 0000-0001-8817-9217.

Волошин Руслан Віталійович – старший викладач кафедри електроніки та електронних комунікацій, Дніпровський державний технічний університет; volosinruslan4276@gmail.com; ORCID 0009-0002-0567-8630.

Жульковський Олег Олександрович – к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення систем, Дніпровський державний технічний університет; olalzh@ukr.net; ORCID 0000-0003-0910-1150.

Ульяновська Юлія Вікторівна – к.т.н., завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення, Університет митної справи та фінансів; yuliyauyv@gmail.com; ORCID 0000-0001-5945-5251.

Bagriy Viktor – PhD, Associate Professor of Department of Electronics and Electronic Communications, Dniprovsky State Technical University.

Voloshin Ruslan – Senior Lecturer of Department of Electronics and Electronic Communications, Dniprovsky State Technical University.

Zhulkovskyi Oleg – PhD, Associate Professor of Department of Software Systems, Dniprovsky State Technical University.

Ulianovska Yuliia – PhD, Head of Department of Computer Science and Software Engineering, University of Customs and Finance.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-04
УДК 528.235:681.3:628.1

В.Ю. Каштан, О.С. Шевцова

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. Останніми роками зросла потреба у супутникових зображення високої просторової роздільної здатності через їхню важливість у практичних застосуваннях, таких як землевпорядкування, навігація, екологічний моніторинг та розробка інфраструктурних проєктів. Методи паншарпенінгу є ефективними засобами збільшення просторової роздільної здатності багатоканальних зображень. Хоча існує значна кількість запропонованих алгоритмів паншарпенінгу, але жоден з них не може бути універсальним для всіх типів датчиків та демонструє різні результати. У статті проведено огляд методів злиття супутникових зображень високої просторової роздільної здатності, а також запропоновано інформаційну технологію попередньої обробки цифрових супутникових зображень з використанням згорткової нейронної мережі. Це дозволило ефективно вилучати деталі текстури та просторові залежності, а також локальну та нелокальну інформацію. В роботі порівнювалися результати запропонованої технології з існуючими методами паншарпенінгу, такими як Gram Shmidt, HSV, Wav+HSV, ATWT, AWLP, BDSD, Brovey, HPF. Результати тестування, проведеного на восьмиканальних зображеннях, отриманих супутником WorldView 2, підтверджують, що запропонована технологія (ERGAS=0.32, RMSE=0.28б SSIM=0.71, PSNR=37.60) дозволяє досягти високої спектральної та просторової якості багатоканальних зображень та перевершує існуючі методи.
Ключові слова: попередня обробка, злиття зображень, згорткова нейронна мережа, спектральна інформація, просторова здатність.

Постановка завдання. З урбанізацією та зростанням інтересу до геоінформаційних систем, точних картографічних досліджень та екологічного моніторингу, виникає необхідність у вдосконаленні методів злиття цифрових супутникових зображень високої роздільної здатності для отримання більш деталізованих та інформативних зображень [1]. Супутникові зображення високого просторового розрізнення мають великий потенціал для вирішення різноманітних завдань, але їхнє використання часто обмежується низькою динамікою контрасту та обмеженою спектральною інформацією. Одним із ключових ета-

© Каштан В.Ю., Шевцова О.С., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

пів попередньої обробки супутникових зображень є їхнє злиття, або паншарпенінг, що включає в себе поєднання панхроматичних (ПЗ) та багатоканальних зображень (БЗ), які хоч і мають нижче просторове розрізнення, ніж панхроматичні, проте містять спектральну інформацію, що є невід'ємною частиною аналізу земної поверхні [2, 3]. Методи паншарпенінгу не лише підвищують просторову роздільну здатність отриманих зображень, але і зберігають спектральну інформацію. Такий підхід дозволяє отримати повніші та більш інформативні дані для подальшого тематичного аналізу даних (виявлення, розпізнавання об'єктів, класифікацію земного покриву, тощо).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було проведено значну кількість наукових досліджень, присвячених вирішенню проблеми злиття супутникових зображень. Ці дослідження можна розділити на дві групи: традиційні методи оптимізації та методи**,** що базуються на глибокому навчанні. Метод інтенсивність-відтінок-насиченість (HSV) [4, 5], аналіз головних компонент (PCA) [6] та перетворення Грама-Шмідта (Gram–Schmidt) [7], метод Бровей (Brovey), тощо – традиційні методи. Ці методи дозволяють досягти високої просторової роздільної здатності, але призводять до значних спектральних спотворень. З іншого боку, методи, що базуються на аналізі множинної роздільної здатності, такі як вейвлет-перетворення [5], фільтри високих частот та узагальнена піраміда Лапласа [8], можуть зберігати спектральну інформацію, але мають просторові спотворення. Поширеним є методи паншарпенінгу на основі стискання (CS) [9]. Недоліком методу є те, що він потребує великої кількості навчальних зображень з високою роздільною здатністю, які можуть бути недоступними. Для вирішення цієї проблеми, було запропоновано використання комбінованих методів, таких як Revisited AWLP, керованого фільтра, тощо. Ці методи призначенні для збільшення просторової здатності зображень при збереженні спектральної інформації. Але, експериментально доведено, що ці методи все одно призводять до певних спектральних і просторових спотворень.

Останнім часом велика увага приділяється методам паншарпенінгу на основі глибокого навчання. Автори [10] запропонували методику самокодування з низьким рівнем шуму для отримання співвідношення між зображеннями з високою та низькою роздільною здатністю за допомогою глибоких нейронних мереж. В роботі [11] застосували згорткові нейронні мережі (CNNs) до області паншарпенінгу, що значно покращило продуктивність алгоритму порівняно з традиційними методами. Автори [12] вирішили проблему втрати інформації

під час вилучення ознак на основі нейронних мереж. В роботі [13] запропоновано модель PanNet для спектрального збереження та просторового покращення первинних даних.

Незважаючи на значні досягнення вирішення задач попередньої обробки супутникових зображень, існуючі методи паншарпенінгу все ще мають свої обмеження та недоліки. Недостатня точність, артефакти та втрата деталей можуть виникати через неповне врахування взаємодії спектральних та просторових характеристик зображень. Методи на основі глибокого навчання, покращують якість злитих зображень, ніж традиційні методи, але мають високу складність обчислень на зображеннях високої роздільної здатності та не враховують адаптацію розмірності каналу.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка інформаційної технології попередньої обробки цифрових супутникових зображень з використанням згорткової нейронної мережі, яка здатна ефективно вилучати деталі текстури та просторові залежності, а також локальну та нелокальну інформацію. Це дозволить покращити точність та деталізацію отриманих зображень.

Виклад основного матеріалу. Загальна структура запропонованої інформаційної технології представлена на рисунку 1 та включає такі етапи: завантаження первинних цифрових супутникових зображень; застосування геометричної, радіометричної, атмосферної корекцій; а також блоку нейронної мережі, який складається з вивчення глобальної інформації про текстуру та отримання просторової інформації з кожної смуги зображення по каналах.

Спочатку завантажуємо багатоканальне в композиції RGB (Канали 5-3-2) та панхроматичне зображення космічного апарату WorldView-2. Потім виконуємо ряд корекцій, спрямованих на усунення різноманітних спотворень, що можуть виникати під час зйомки та передачі зображень з космосу. Геометрична корекція цифрових супутникових зображень є важливим етапом попередньої обробки для усунення спотворень, що виникають у зображеннях через геометричні особливості процесу зйомки. Математично перерахунок значень пікселів можна виразити за допомогою формули [14, 15]:

$$\begin{aligned} X_{corr} &= X_{inp} \times \frac{S_x}{S_y} + \Delta x \\ Y_{corr} &= Y_{inp} \times \frac{S_x}{S_y} + \Delta y \end{aligned}, \quad (1)$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

де X_{inp}, Y_{inp} - координати пікселя первинного супутникового зображення, X_{corr}, Y_{corr} - координати пікселя після геометричної корекції, S_x, S_y - коефіцієнти по осях X та Y, Δx, Δy - зсув по відповідним осям.

Наступний етап включає процес передискретизації, який полягає у масштабуванні БЗ до розмірів ПЗ [5]:

$$P'(x', y') = a \cdot P(x, y) + b \cdot P(x + 1, y) + c \cdot P(x, y + 1) + d \cdot P(x + 1, y + 1) \quad (2)$$

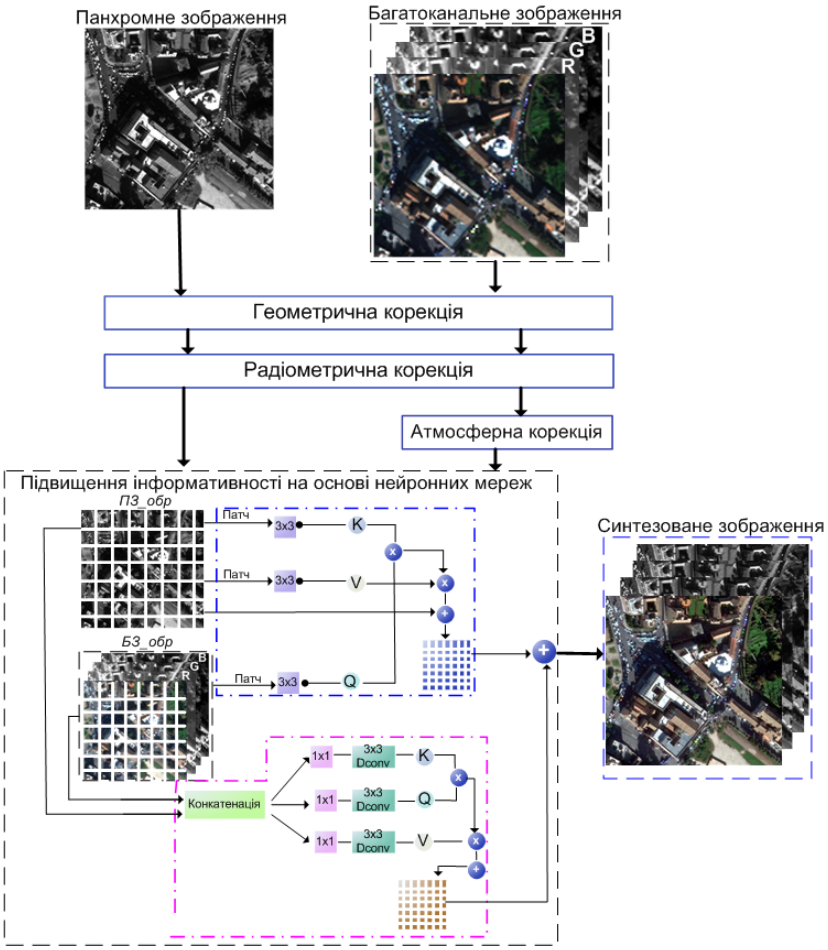


Рисунок 1 – Схема запропонованої інформаційної технології

Радіометрична корекція, спрямована на виправлення впливу атмосферних умов на оптичних зображеннях. Однією з поширених проблем в оптичному дистанційному зондуванні є хмарний покрив, який може заважати спостереженню земної поверхні. Перш за все, важливо виконати відносне радіометричне калібрування для мінімізації впливу цих артефактів [14]:

$$q = \frac{p - A}{B}, \quad (3)$$

де *q* - радіометрично виправлені дані датчика, *p* - необроблені дані датчика, *A* - зсув темряви для конкретного супутникового зображення, а *B* - відносний коефіцієнт підсилення датчика.

Атмосферна корекція БЗ полягає в перетворенні радіометрично скоригованих пікселів зображення на спектральну яскравість верхнього шару атмосфери з мінімальним значенням. Для цього використовується загальне рівняння, яке враховує параметри телескопа на висоті 770 км супутника WorldView-2 [14]:

$$B(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{\tau(\lambda)} + L_{atm}(\lambda)(1 - \frac{1}{\tau(\lambda)}) + L_p(\lambda) \quad (4)$$

де $B(\lambda)$ - спектральна яскравість верхнього шару атмосфери, $L(\lambda)$ - виміряне спектральне випромінювання на поверхні землі, $\tau(\lambda)$ - коефіцієнт пропускання атмосфери, $L_{atm}(\lambda)$ - спектральна яскравість атмосфери, $L_p(\lambda)$ - підсвічування атмосфери.

Після того, як виконано геометричну, радіометричну та атмосферну корекції, отримуємо нові багатоканальні (БЗ_обр) та панхроматичні (ПЗ_обр) зображення. Далі використовуємо ці зображення для підвищення їхньої інформативності за допомогою нейронної мережі. Спочатку зображення ПЗ_обр і БЗ_обр сегментуються на ділянки однакового розміру, що не перетинаються. Потім кодується їхнє положення для створення послідовності ділянок з обох зображень. Ці патчи зображень використовуються як вхідні ознаки текстури. Далі, ознаки виділяються за допомогою згортки 3 × 3, і проектуються на три компоненти, які необхідні для відповідного трансформатора: *Q* (запит), *K* (ключ) і *V* (значення) [16]:

$$Q = X \cdot W_q, \quad (5)$$

$$K = X \cdot W_k, \quad (6)$$

$$V = X \cdot W_v, \quad (7)$$

де *X* - вектор властивостей патча, W_q, W_v - матриця ваг області ПЗ, W_k - матриця ваг області БЗ.

Використовуючи *Q* та *K* для оцінки схожості між ознаками, ми формуємо матрицю асоціацій. Потім множимо цю матрицю асоціацій на матрицю асоціацій PAN-зображення (ознака *V*). Це дозволяє отримати остаточну зважену карту ознак карти. Додатково вводиться перехідний зв'язок, щоб уникнути втрати інформації. Нарешті, всі згенеровані карти особливостей патчів знову зшиваються разом за допомогою кодування позиції, щоб отримати остаточну карту особливостей текстури.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Наступна гілка нейронної мережі дозволяє тримати відповідну просторову інформацію кожного каналу зображення. Спочатку застосовуємо точкову згортку 1 × 1 для отримання контекстної інформації між різними каналами на рівні пікселів, а потім використовуємо глибинну згортку 3 × 3 для отримання просторового контексту вздовж напрямку каналу. Після цього отриману інформацію згортки розділяємо на глибину для подальшого використання у векторах *Q*, *K* і *V*:

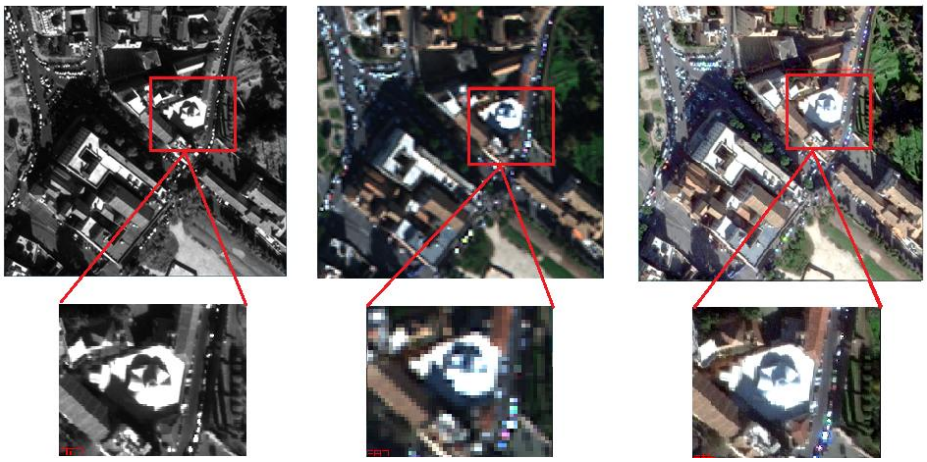
$$X = Concat\ (ПЗ_нов, БЗ_нов) \quad (8)$$

X - результуюче зображення після злиття ПЗ та БЗ.

Отримані зважені карти ознак кожного фрагмента інтегруються разом для створення нового синтезованого зображення. Це зображення представляє собою комбінацію інформації про текстуру та просторову здатність панхроматичного та багатоканального зображень. Це дозволяє отримати більш інформативне зображення, порівняно з первинними даними.

Експериментальні результати. В роботі використано 16-розрядні стандартні мультипослідовності рівня 2 зі супутника WorldView-2. Ці дані містять односмугові панхроматичні та 8-смугові багатоканальні зображення. Розмір кожного зображення складає 599 на 576 пікселів. На рисунку 2 наведено первинні супутникові зображення та після запропонованої в роботі технології. Синтезовані зображення характеризуються збільшеною роздільною здатністю, при цьому локальні збільшені частини не демонструють явного розмиття контурів, що свідчить про високу якість паншарпенінгу. Для оцінки ефективності запропонованої інформаційної технології з існуючими, обрано сім методів для порівняння: HSV (Hue, Saturation, Value), Adaptive Tonal Weighting Transformation (ATWT), Adaptive Weighted Linear Prediction (AWLP), Brightness-Difference-Based Saturation-Difference (BDSD), Brovey Transform, High Pass Filtering (HPF), та комбінацію вейвлет із методом HSV (Wavelet + HSV).

Використано критерій максимальної інформативності для оцінки якості зображень. Ентропія, поняття в теорії інформації, є одним з інструментів для вимірювання кількості інформації в зображеннях. Вона визначається на основі ймовірності виникнення різних значень пікселів у зображенні і характеризує імовірнісну поведінку джерела інформації [2, 15].



а) б) в)

Рисунок 2 – Супутникові зображення космічного апарату WorldView-2:
а) панхроматичне; б) багатоканальне (Канали 5-3-2);
в) після обробки запропонованої технології

На рисунку 3 наведено значення ентропії для традиційних методів обробки зображень та запропонованої технології.

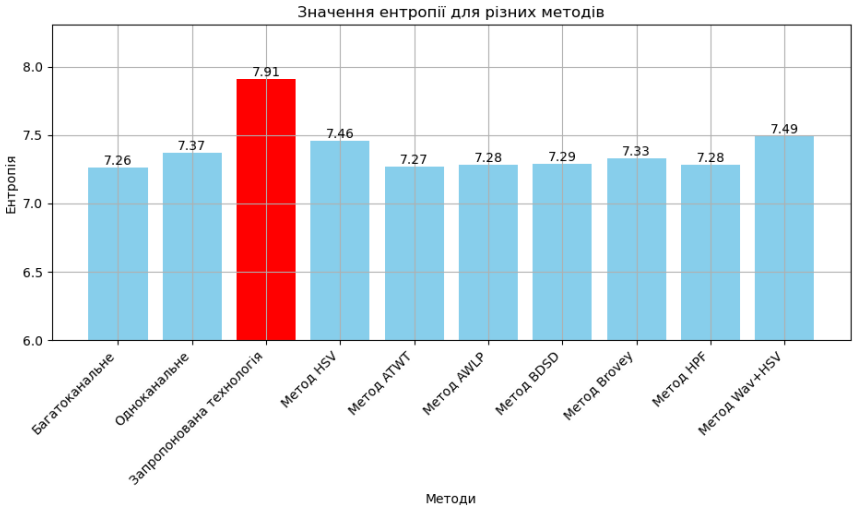


Рисунок 3 – Графічне представлення значень ентропії

За результатами значень рис.3 можна зробити висновок, що запропонована технологія має найвище значення ентропії, що свідчить про більшу різноманітність та складність інформації в отриманому зображенні порівняно з іншими методами обробки.

Коефіцієнт кореляції (CORR) є важливим інструментом для кількісної оцінки ступеня відповідності між двома наборами даних, у нашому випадку - між синтезованим та оригінальними зображеннями. Цей показник дозволяє визна-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

чити, наскільки злите зображення відтворює оригінальні дані. Високий коефіцієнт кореляції свідчить про те, що злите зображення добре відтворює оригінальні дані, тобто воно має високу схожість з оригіналом [4, 5]. У таблиці 1 наведено значення коефіцієнту CORR.

Таблиця 1

Значення коефіцієнту CORR

Методи	Канали		
	R	G	B
HSV	0.87	0.84	0.85
ATWT	0.59	0.61	0.63
AWLP	0.64	0.65	0.66
BDSD	0.60	0.61	0.64
Brovey	0.53	0.50	0.54
HPF	0.55	0.56	0.58
Wavelet+ HSV	0.90	0.86	0.86
Запропонована технологія	**0.97**	**0.96**	**0.96**

Аналізуючи дані з табл.1, метод HSV демонструє високий рівень кореляції для всіх трьох каналів (R, G, B), що свідчить про добре збережену спектральну інформацію після злиття зображень. Методи ATWT, AWLP, BDSD, Brovey та HPF мають нижчі значення кореляції порівняно з методом HSV. Це вказує на меншу ефективність цих методів у збереженні спектральної інформації під час злиття зображень. Метод Wavelet+HSV має високий рівень кореляції, що свідчить про добре збереження спектральної інформації. Запропонована технологія демонструє найвищий рівень кореляції для всіх трьох каналів, що свідчить про її високу ефективність у збереженні спектральної інформації та збереження деталізації зображення.

Коефіцієнти структурної схожості зображень (SSIM) та PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) є важливими метриками для оцінки якості зображень. SSIM аналізує структурну подібність між оригінальним та обробленим зображеннями, визначаючи ефективність методів обробки, тоді як PSNR вимірює якість відтворення зображення після компресії або обробки. Значення цих метрик наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів SSIM та PSNR

Методи	SSIM			PSNR		
	Канали			Канали	Канали	Канали
	R	G	B	R	G	B
HSV	0.49	0.46	0.45	17.85	16.75	17.35
ATWT	0.48	0.50	0.51	13.92	14.45	14.93
AWLP	14.32	14.77	15.22	0.46	0.48	0.48
BDSD	0.50	0.51	0.51	13.85	14.38	14.88
Brovey	0.40	0.40	0.41	13.14	13.16	14.07
HPF	0.44	0.46	0.47	13.30	13.82	14.29
Wavelet+ HSV	0.56	0.54	0.52	23.12	22.96	22.95
Запропонована технологія	**0.71**	**0.65**	**0.67**	**37.60**	**38.38**	**38.93**

Коефіцієнт SSIM має кращі показники для запропонованої технології, що свідчить про високий рівень структурної подібності між синтезованим та оригінальним зображеннями. Значення коефіцієнту PSNR для запропонованої технології вказують на високу якість відтворення оброблених зображень порівняно з оригінальними. А для методів AWLP і Brovey, демонструють значно менші значення PSNR, що вказує на більш великі втрати якості відтворення.

Метрики ERGAS (Relative Dimensionless Global Error in Synthesis) і RMSE (Root Mean Square Error) використовуються для оцінки точності обробки та відтворення зображень. На рис.4 наведено кількісні показники метрик ERGAS та RMSE.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

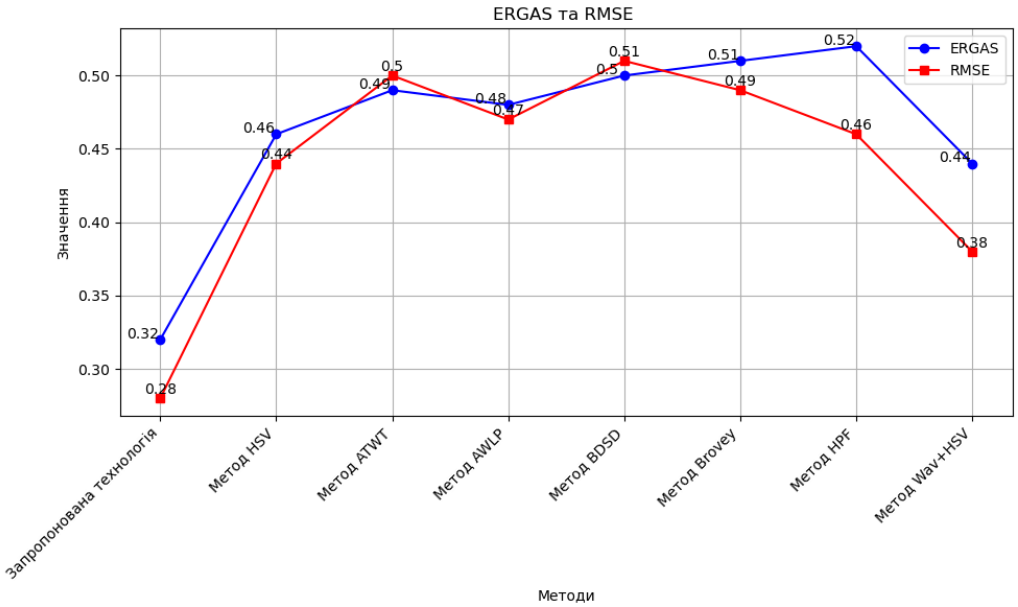
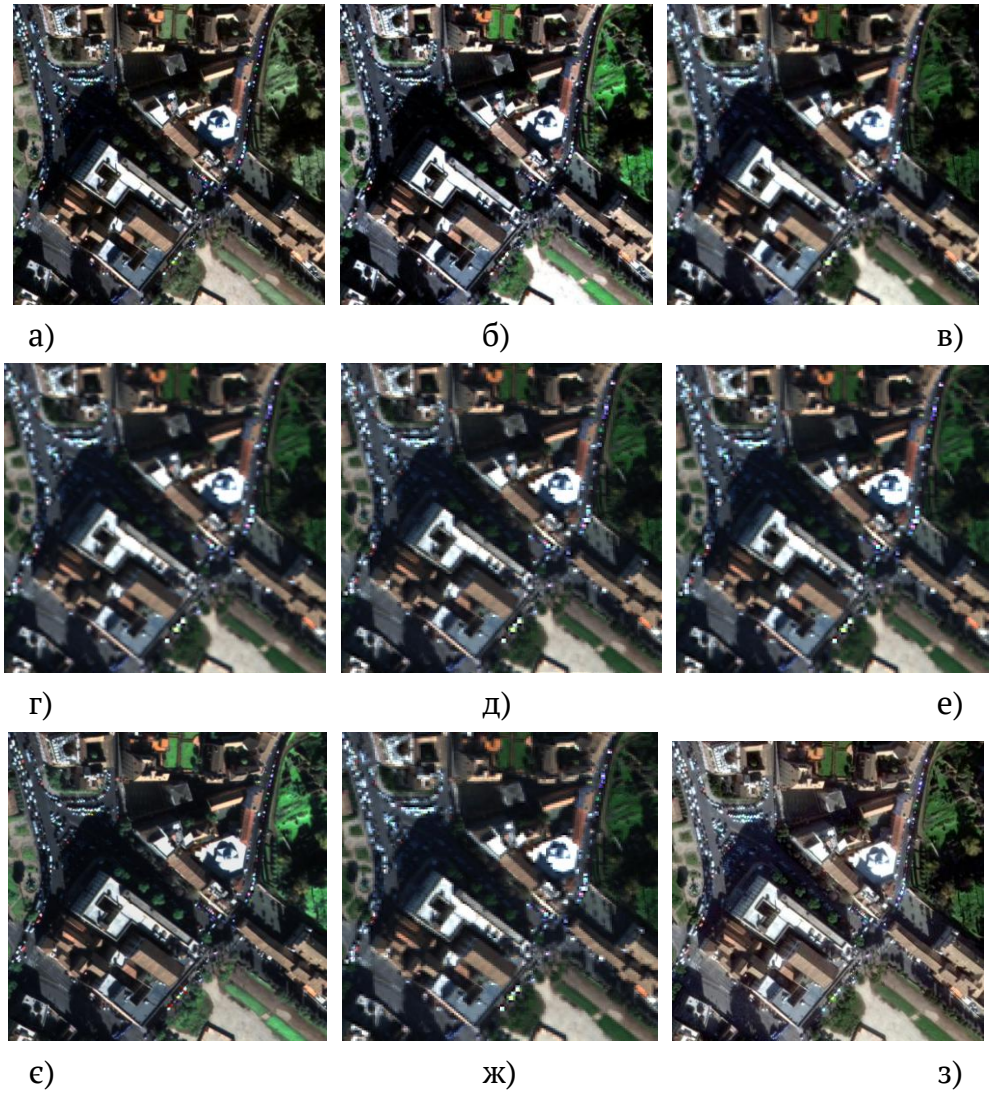


Рисунок 4 – Графічне представлення метрик ERGAS та RMSE

Аналізуючи отримані результати з рис.4, значення ERGAS та RMSE для запропонованої технології та методу Wav+HSV є найменшими порівняно з іншими методами. Це свідчить про високу точність синтезу та відтворення зображень за допомогою цих методів. З іншого боку, значення ERGAS та RM SE для методів HSV, ATWT, AWLP, BDSD, Brovey і HPF свідчать про меншу точність злиття зображень.

У порівняльному аналізі різних методів злиття WorldView-2 зображень (Рис.5), можна помітити відмінності у якості синтезованих зображень. Методи ATWT, AWLP, BDSD та HPF демонструють значні просторові спотворення, і загальне зображення виглядає розмитим. Brovey і HSV – розмиття кольорів, а спотворення первинних кольорів трави на зображеннях стають очевидними. Ці артефакти знижують інформативність зображення та роблять його менш придатним для подальшого використання в додатках, де важлива точність кольору та деталізація. Gram-Shmidt та Wav+HSV, хоча ближчі за просторовою структурою та спектральним збереженням, але все ще демонструють просторове розмиття. Синтезоване зображення після запропонованої технології демонструє високу інформативність, чіткість та деталізацію без помітного розмиття кольорів або просторових спотворень.



а) б) в)

г) д) е)

є) ж) з)

Рисунок 5 – Порівняння різних методів злиття:
а) Gram-Shmidt; б) HSV; в) Wav+ HSV; г) ATWT; д) AWLP; е) BDSD; є) Brovey;
ж) HPF; з) запропонована технологія

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі запропоновано інформаційну технологію попередньої обробки цифрових супутникових зображень з використанням загорткової нейронної мережі, яка здатна ефективно вилучати деталі текстури та просторові залежності, а також локальну та нелокальну інформацію. Це дозволило, у порівнянні з класичними методами злиття, зменшити артефакти та автоматизувати процес обробки супутникових зображень.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ЛІТЕРАТУРА

1. Luo Xin, Tong Xiaohua, Hu Zhongwen. Improving Satellite Image Fusion via Generative Adversarial Training // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. – P. 1-14. DOI:10.1109/TGRS.2020.3025821.

2. Kashtan V.Yu., Hnatushenko V.V. Automated pansharpening information technology of satellite images // The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control». - №2 (57). - Zaporizhzhia, 2021. – P.123-133.

3. Mateo-Sanchis, Anna Piles, Maria Muñoz, Jordi Adsuara, Jose Pérez-Suay, Adrián Camps-Valls, Gustau. Synergistic Integration of Optical and Microwave Satellite Data for Crop Yield Estimation // Remote Sensing of Environment. - Volume 234, 2019

4. Rahimzadeganasl A, Alganci U, Goksel C. An Approach for the Pan Sharpening of Very High Resolution Satellite Images Using a CIELab Color Based Component Substitution Algorithm // Applied Sciences. - 9(23):5234, 2019. DOI: 10.3390/app9235234

5. Kahtan V.Yu., Hnatushenko V.V. A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images // Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security IntelITSIS 2020. - Khmelnytskyi, Ukraine, June 10-12, 2020. – P. 67-766.

6. Duran J., Buades A. Restoration of pansharpened images by conditional filtering in the PCA domain // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. - 16 (3), 2019. – P. 442–446

7. Alcaras E, Parente C. The Effectiveness of Pan-Sharpening Algorithms on Different Land Cover Types in GeoEye-1 Satellite Images // Journal of Imaging. - 9(5):93, 2023. DOI:10.3390/jimaging9050093.

8. Addesso P., Restaino R., Vivone G. An Improved Version of the Generalized Laplacian Pyramid Algorithm for Pansharpening // Remote Sensing. - 13(17):3386, 2021. DOI:10.3390/rs13173386.

9. Ghahremani M., Ghassemian H. A Compressed-Sensing-Based Pan-Sharpening Method for Spectral Distortion Reductio //. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - 54, 2016.- P. 2194 - 2206. 10.1109/TGRS.2015.2497309.

10. Huang W., Xiao L., Liu H., Wei Z., Tang S. A New Pan-Sharpening Method With Deep Neural Networks // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 12, 2015. – P. 1037–1041.

11. Imani M. Texture feed based convolutional neural network for pansharpening // Neurocomputing. - 398, 2020. – P. 117–130.

12. Wei Y., Yuan Q., Shen H., Zhang L. Boosting the Accuracy of Multispectral Image Pansharpening by Learning a Deep Residual Network // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. - 14, 2017. – P. 1795–1799.
13. Yang J., Fu X., Hu Y., Huang Y., Ding X., Paisley J. PanNet: A Deep Network Architecture for Pan-Sharpening // In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). - Venice, Italy, 22–29 October 2017. – P. 1753–1761.
14. Li H., Jing L., Tang Y. Assessment of Pansharpening Methods Applied to WorldView-2 Imagery Fusion // Sensors. - 17(1):89. – 2017. DOI:10.3390/s17010089.
15. Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. Дослідження ефективності методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення // Прикладні питання математичного моделювання. - Том 3.- Херсон, 2020. – С.117-127.
16. Yang, F.; Yang, H.; Fu, J.; Lu, H.; Guo, B. Learning texture transformer network for image super-resolution // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. . - 2020. – P. 5790–5799.

REFERENCES

1. Luo Xin, Tong Xiaohua, Hu Zhongwen. Improving Satellite Image Fusion via Generative Adversarial Training // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. – P. 1-14. DOI:10.1109/TGRS.2020.3025821.
2. Kashtan V.Yu., Hnatushenko V. V. Automated pansharpening information technology of satellite images // The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control». - №2 (57). - Zaporizhzhia, 2021. – P.123-133.
3. Mateo-Sanchis, Anna Piles, Maria Muñoz, Jordi Adsuara, Jose Pérez-Suay, Adrián Camps-Valls, Gustau. Synergistic Integration of Optical and Microwave Satellite Data for Crop Yield Estimation // Remote Sensing of Environment. - Volume 234, 2019
4. Rahimzadeganasl A, Alganci U, Goksel C. An Approach for the Pan Sharpening of Very High Resolution Satellite Images Using a CIELab Color Based Component Substitution Algorithm // Applied Sciences. - 9(23):5234, 2019. DOI: 10.3390/app9235234
5. Kahtan V.Yu., Hnatushenko V. V. A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images // Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security IntelITSIS 2020. - Khmelnytskyi, Ukraine, June 10-12, 2020. – P. 67-766.
6. Duran J., Buades A. Restoration of pansharpened images by conditional filtering in the PCA domain // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. - 16 (3), 2019. – P. 442–446.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

7. Alcaras E, Parente C. The Effectiveness of Pan-Sharpening Algorithms on Different Land Cover Types in GeoEye-1 Satellite Images // Journal of Imaging. - 9(5):93, 2023. DOI:10.3390/jimaging9050093.
8. Addesso P., Restaino R., Vivone G. An Improved Version of the Generalized Laplacian Pyramid Algorithm for Pansharpening // Remote Sensing. - 13(17):3386, 2021. DOI:10.3390/rs13173386.
9. Ghahremani M., Ghassemian H. A Compressed-Sensing-Based Pan-Sharpening Method for Spectral Distortion Reductio //. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - 54, 2016.- P. 2194 - 2206. 10.1109/TGRS.2015.2497309.
10. Huang W., Xiao L., Liu H., Wei Z., Tang S. A New Pan-Sharpening Method With Deep Neural Networks // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 12, 2015. – P. 1037–1041.
11. Imani M. Texture feed based convolutional neural network for pansharpening // Neurocomputing. - 398, 2020. – P. 117–130.
12. Wei Y., Yuan Q., Shen H., Zhang L. Boosting the Accuracy of Multispectral Image Pansharpening by Learning a Deep Residual Network // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. - 14, 2017. – P. 1795–1799.
13. Yang J., Fu X., Hu Y., Huang Y., Ding X., Paisley J. PanNet: A Deep Network Architecture for Pan-Sharpening // In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). - Venice, Italy, 22–29 October 2017. – P. 1753–1761.
14. Li H., Jing L., Tang Y. Assessment of Pansharpening Methods Applied to WorldView-2 Imagery Fusion // Sensors. - 17(1):89. – 2017. DOI:10.3390/s17010089.
15. Kashtan V.Yu., Hnatushenko V.V. Doslidzhennia efektyvnosti metodiv zlyttia suputnykovykh znimkiv vysokoho prostorovoho rozriznennia // Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. - Tom 3.- Kherson, 2020. – C.117-127.
16. Yang, F.; Yang, H.; Fu, J.; Lu, H.; Guo, B. Learning texture transformer network for image super-resolution // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. . - 2020. – P. 5790–5799.

Received 03.01.2024.
Accepted 08.01.2024.

Information technology of satellite imagery pre-processing using convolutional neural network

With urbanization and the growing interest in geographic information systems, precision mapping, and environmental monitoring, there is a need to improve methods of fusing high-resolution digital satellite images to obtain more detailed and informative data. Satellite images with high spatial resolution hold significant promise for addressing

a variety of issues. However their utility is frequently constrained by limited contrast dynamics and restricted spectral data. Pansharpening methods are effective means of increasing the spatial resolution of multichannel images using panchromatic ones. Although there are a significant number of proposed pansharpening algorithms, none can be universal for all types of sensors and demonstrate different results. The paper reviews the fusion methods of high spatial resolution satellite images and proposes an information technology for preprocessing digital satellite images using a convolutional neural network. It made it possible to effectively extract texture details and spatial dependencies for local and non-local information. The paper compares the results of the proposed technology with existing pan-sharpening methods, such as Gram-Shmidt, HSV, Wav+HSV, ATWT, AWLP, BDSD, Brovey, and HPF. The results of testing conducted on eight-channel images acquired by the WorldView-2 satellite confirm that the proposed technology (ERGAS=0.32, RMSE=0.28b SSIM=0.71, PSNR=37.60) allows for achieving high spectral and spatial quality of multichannel images and outperforms existing methods.

Каштан Віта Юріївна - к.т.н., доцент, доцентка кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

Шевцова Ольга Сергіївна - аспірантка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

Kashtan Vita - Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Technology and Computer Engineering,, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Shevtsova Olha - postgraduate of Department of Computer Systems Software,, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

«Системні технології» 1 (150) 2024 «System technologies»
DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-05
УДК 004.021, 004.042, 519.688

О. Сизоненко, Л. Божуха

ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННІ В ПОТОКОВОМУ РЕЖИМІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ YOLOv5 і FASTER R-CNN

Анотація. Для виконання щоденних завдань (виявлення порушень правил дорожнього ру ху, щоденне виявлення натовпу та тощо) можуть використовуватися безпілотних лі тальних апаратів. Порівняння підходів YOLOv5 і Faster R CNN надає можливість вирішення проблеми низької точності безпілотних літальних апаратів у виявленні цілей.

У цій роботі розглядається можливості збору та анотування відповідного набору даних для навчання, наведено опис найбільш поширених моделей YOLOv5 і Faster R CNN виявлення об'єктів, а також наведені результати навчання і валідації на зібраному наборі даних. Для порівняння результатів двох різних моделей глибокого навчання для виявлення цілей застосовано низку стандартних метрик. На основі отриманих під час експерименту ре зультатів пропонується вибір найбільш відповідної моделі для вирішення визначеної проблеми.

Ключові слова: машинне навчання, виявлення об'єктів, Faster R CNN, YOLOv5, виявлення в потоковому режимі, комп'ютерний зір, БпЛА.

Постановка проблеми

Починаючи з 20-го століття, виявлення об'єктів стало важливим результатом досліджень в комп'ютерному зорі. Ця задача широко розвивається і застосовується для виявлення транспорту, виявлення пішоходів і безпілотного водіння. З підвищенням точності зображення алгоритми виявлення об'єктів на основі згорткових нейронних мереж поступово стають актуальним напрямком досліджень.

Технологія безпілотних літальних апаратів (БпЛА) стала важливою сферою застосування дронів з поглибленим вивченням відповідної теорії та практики. Зі створенням високоточних датчиків і розвитком суміжних технологій продуктивність БпЛА постійно покращується.

Використання інформаційних технологій та підходів машинного навчання може вирішити завдання автономного польоту БпЛА за умов зникнення сигналу GPS, орієнтуючись лише на ціль.

© Сизоненко О., Божуха Л., 2024

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Машинне навчання широко застосовується в комп'ютерному зорі та обробці зображень. Рівень розвитку машинного навчання та наявність різноманітних комплексних моделей можуть дозволити з достатньою точністю виявляти на зображенні потрібну ціль.

Точність моделі може бути одним з основних показників, на основі якого можна зробити висновок про придатність моделі для її практичної експлуатації. Однак з урахуванням специфіки виявленого завдання, також варто звернути увагу на швидкість роботи моделі, оскільки є необхідність оброблення даних у потоковому режимі. При занадто довгому обробленні даних моделлю можна отримати неактуальну інформацію.

Для дослідження можливостей використання машинного навчання в прикладній задачі розглянуто дві групи моделей розпізнавання об'єктів: YOLOv5 і Faster R-CNN. Розглянуто такі характеристики цих підходів, як швидкість і точність виявлення для вибору найкращої моделі для вирішення прикладного завдання або для подальшої комбінації їх.

Обидві архітектури належать до групи згорткових нейронних мереж, які є найбільш поширеними алгоритмами глибокого навчання, що застосовують кілька надточних шарів і обчислень. Алгоритми надають ефективні способи вилучення ознак, а також є найкращим вибором для вирішення проблем виявлення об'єктів.

Поточні підходи з використанням методів глибокого навчання для задач класифікації та регресії об'єктів можна розділити на дві категорії.

Двоетапні методи, які представлені такими архітектурами, як R-CNN, Fast R-CNN і Faster R-CNN. Спочатку використовується селективний пошук або мережу регіональних припущень (RPN) для виділення регіонів інтересу - областей, які з високою ймовірністю містять усередині себе об'єкти. Надалі за допомогою класифікатора визначається клас об'єкта та за допомогою регресора визначаються обмежувальні рамки. Цей метод має високу точність [3], але при цьому обмежений у швидкості виявлення.

До іншої категорії належать одноетапні алгоритми, які представлені різними версіями YOLO та ін. Ці алгоритми не використовують окрему мережу для генерації регіонів і ґрунтуються на методах регресії, переглядаючи зображення цілком. Оскільки ці алгоритми не використовують RPN, швидкість виявлення вища, але точність виявлення, особливо малих об'єктів, не така висока, як у двоетапних методів.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Мета дослідження

Метою дослідження є аналіз архітектурних рішень найбільш поширених моделей виявлення об'єктів YOLOv5 і Faster R-CNN для побудови моделі щодо покращення швидкості і точності виявлення об‘єктів в прикладній задачі або для подальшої комбінації їх. Метою дослідження є отримання результатів навчання і валідації на зібраному наборі даних.

Faster R-CNN є алгоритмом виявлення об'єктів та складається із чотирьох частин: мережа вилучення ознак (feature extraction network), мережа регіональних припущень (region proposal network), об'єднання регіонів інтересу (RoI Pooling) і повнозв'язний шар. Faster R-CNN це покращена версія алгоритмів R-CNN і Fast R-CNN. Різниця між ними в тому, що алгоритм Faster R-CNN уникає використання обчислювально дорогого алгоритму селективного пошуку [2]. Замість цього використовує RPN для створення областей кандидатів. RPN дає змогу визначати припущення на основі ознак всього зображення за один прохід, що дає змогу уникнути повторних обчислень і збільшує швидкість виявлення.

YOLO пропонує нову ідею розв'язання задачі виявлення об'єктів завдяки перетворенню задачі на регресійну. YOLO - одноетапний алгоритм глибокого навчання, який використовує надточні нейронні мережі для виявлення об'єктів [1]. Існують різні версії цього алгоритму. YOLOv1 ділить зображення на комірки розміром n на n однакового розміру. Кожна комірка сітки відповідає за виявлення центру об'єкта всередині комірки. Кожна комірка може передбачити фіксовану кількість обмежувальних рамок зі значенням достовірності (confidence score). Кожна обмежувальна рамка містить у собі 5 значень: координата центру за віссю абсцис, координата центру за віссю ординат, висота рамки, ширина рамки та значення достовірності. Після визначення обмежувальних рамок YOLO використовує перетин над об'єднанням (IoU), щоб вибрати найбільш підходящі. Для видалення зайвих рамок використовується немаксимальне придушення (NMS). У YOLOv2 було додано пакетну нормалізацію (batch normalization) разом зі згортковими шарами для збільшення точності та зменшення можливості перенавчання. У YOLOv3 магістральна мережа вилучення ознак (feature extraction backbone) Darknet19, яка погано виявляла маленькі об'єкти, була замінена на Darknet53 для вирішення цієї проблеми. У YOLOv4 знову було замінено магістральну мережу вилучення ознак на CSPDarknet53, що значно поліпшило швидкість і точність алгоритму. YOLOv5 - найбільш полегшена версія з попередніх, яка використовує фреймворк PyTorch замість

Darknet. Також у неї було додано новий шар фокусу (focus layer), який замінив перші три шари магістральної мережі YOLOv3, що дозволило збільшити швидкість при мінімальних втрат у точності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Підготовка навчального набору даних.

Для навчання моделей глибокого навчання потрібна велика вибірка зображень для отримання досить ефективної моделі. Існує безліч різних наборів даних, однак було обрано набір даних Kitti.

Загалом було зібрано 550 зображень для навчання і 105 зображень для валідації (рис. 1).

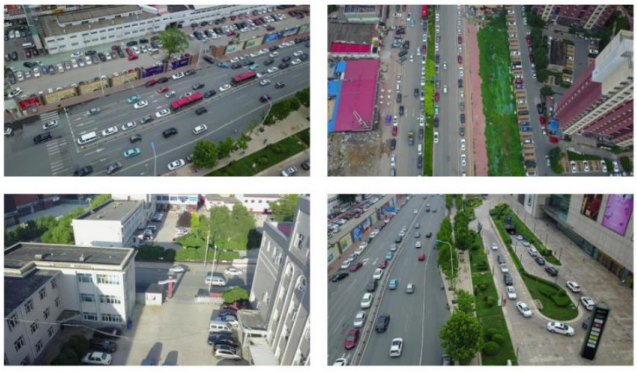


Рисунок 1 – Приклади зображень навчального набору даних

Також було зібрано набір даних із 573 зображень з нового місця розташування для остаточної валідації моделей.

Анотування зображень.

Оскільки використовуваний метод розпізнавання об'єктів є різновидом методу навчання з вчителем, виникає необхідність передавати моделі інформацію про місце розташування обмежувальних рамок цілей на зображенні. Тому, для анотування зображень передбачено використання Roboflow, який дає можливість не тільки розмічати зображення, а й експортувати анотовані набори даних у різних форматах. Цей підхід прискорює процес, оскільки YOLOv5 і Faster R-CNN мають різні формати анотацій.

Початкова конфігурація експериментального стенда.

Навчання і валідацію моделей проводено на платформі Google Colab, яка має конфігурацією: ОС Ubuntu 18.04, графічний процесор NVIDIA Tesla T4, процесор Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.20ГГц. На платформі використовується мова програмування Python і фреймворк PyTorch. Для навчання та валідації моделей

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

використано бібліотеки yolov5 і detecron2 для YOLOv5 і Faster R-CNN відповідно.

Для покращення результатів навчання обрано вже попередньо навчені моделі. Бібліотекою YOLOv5 надаються 5 різних переднавчених на наборі даних Kitti моделей, які відрізняються розміром, швидкістю виконання і точністю.

Обрано YOLOv5m, тому що вона порівняно з YOLOv5s має набагато більшу точність і не втрачає швидкості, а порівняно з YOLOv5l має трохи меншу точність, втрачаючи при цьому в швидкості. Бібліотекою detecron2 надається велика кількість переднавчених моделей на різних наборах даних (кількість епох-20, розмір пакету-16, швидкість навчання-0.001, моментум-0.9, скорочення вагів-0.0005).

Критерії оцінювання.

Для порівняння результатів двох різних моделей глибокого навчання для виявлення цілей застосовано низку стандартних метрик, які використовують для оцінювання моделей машинного навчання. Є всього 4 можливі результати під час виділення обмежувальних рамок і виявлення об'єкта: істинно позитивні (TP) - результат означає, що модель коректно визначила позитивний клас, істинно негативні (*TN*) - результат означає, що модель коректно визначила негативний клас, хибно позитивні (*FP*) - результат означає, що модель некоректно визначила позитивний клас і хибно негативні *(FN*) - результат означає, що модель некоректно визначила негативний клас.

У цій задачі однокласового виявлення позитивним класом є об’єкт, а негативним задній фон. Таким чином, *TP* - вірне виявлення об’єкта, *TN* - вірне виявлення фону (цей показник не використовується, оскільки область заднього фону не виділяється під час анотування), *FP* - некоректне виявлення об’єкта, *FN* - відсутність виявлення.

Для визначення належності результату до однієї з чотирьох груп використовується метрика *IOU*, яка є відношенням області перетину до області об'єднання коректної та передбаченої обмежувальних рамок.

На основі отриманих результатів *TP*, *FP* і *FN* обчислені стандартні показники: точність (*Precision*), повнота (*Recall*) і середня точність (*AP*). Також розраховано окремо кількість кадрів, яку здатна обробити модель за одну секунду (*FPS*).

Точність визначає відношення числа коректно виявлених об'єктів до всієї кількості виявлених об'єктів і обчислюється за формулою *Precision=TP/(TP+FP*).

Повнота визначає відношення числа коректно виявлених об'єктів до всіх об'єктів класу і обчислюється за формулою *Recall =TP/(TP+FN)*. Середня точність *AP* визначається площею під кривою точності-повноти і визначається як інтеграл від функції *p(r)* на відрізку *[0;1]*, де *p* –точність, *r* –повнота.

Крива точності-повноти показує залежність зміни точності при зміні повноти для різних порогових значень. У цьому дослідженні графіки кривих точності-повноти побудовано на основі широко використовуваного порогового значення *IOU*, що дорівнює 0.6.

Середня точність є однією з найбільш використовуваних метрик для визначення якості моделі виявлення об'єктів. При цьому середня точність може містити різні метрики залежно від *IOU*. Найбільш використовуваними є значення *AP* при *IOU* не менше 0.5 і середнє значення *AP* при порогових значеннях *IOU* в діапазоні від 0.5 до 0.95 з кроком 0.5, які позначаються AP@.5 і AP@.5:.95 відповідно.

Кількість кадрів на секунду - це основний показник швидкості моделі. Здебільшого вважається, що показник FPS вище 30 достатній для виконання виявлення в потоковому режимі.

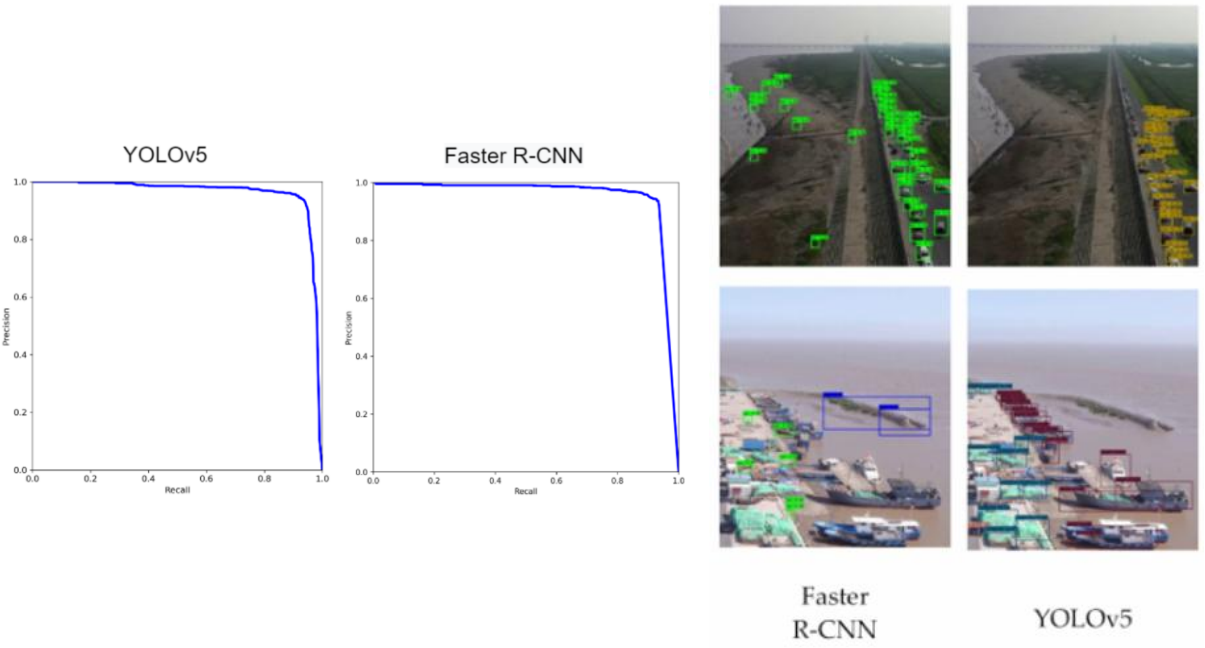
Порівняння результатів роботи моделей. Розмір навчених моделей YOLOv5 і Faster R-CNN склав 40.2 МБ і 230.8 МБ відповідно. Після навчання моделі протестовані на першому валідаційному наборі (табл. 1, рис. 2) .

Таблиця 1

Результати валідації моделей на першому наборі даних

Архітектура	**Точність, %**	**Повнота, %**	**AP@.5, %**	**AP@.5:.95, %**	**FPS, к/с**
YOLOv5	93,6	93,7	96	50,2	56,5
Faster R-CNN	94,2	92,8	95,1	51	6,56

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)



(а) (б)

Рисунок 2 – (а) Криві точності-повноти моделей після валідації на першому наборі даних; (б) Візуалізація після валідації на першому наборі даних

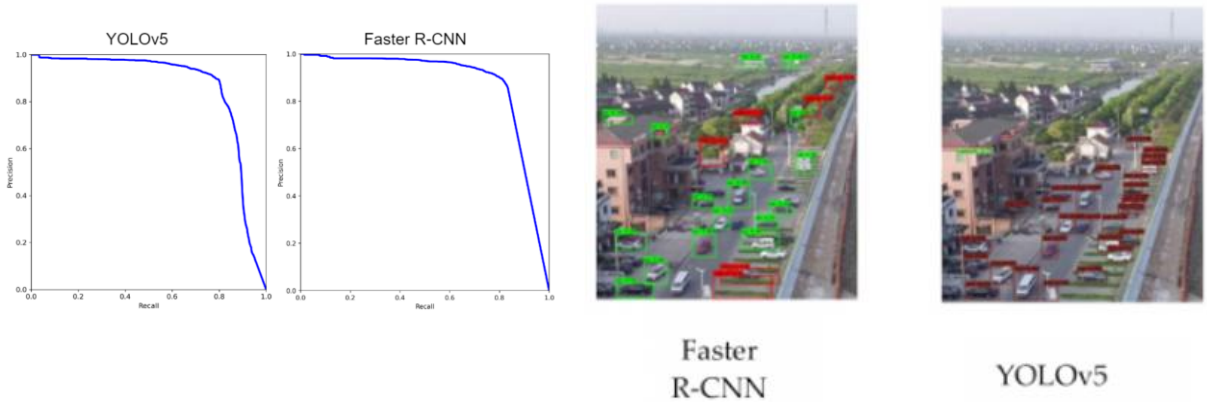
YOLOv5 має показники AP@.5 і FPS вищі на 0.9% і 49.94 к/с відповідно, ніж у Faster R-CNN. При цьому Faster R-CNN має показник AP@.5:.95 вищий на 0.8%, ніж у YOLOv5. Можна зробити висновок, що YOLOv5 швидше справляється з виявленням і має більшу точність за невеликого порогового значення *IoU*, а Faster RCNN зберігає більшу точність під час передбачення рамок, які більше збігаються.

Далі моделі були протестовані на другому валідаційному наборі (табл. 2, рис. 3) .

Таблиця 2

Результати валідації моделей на другому наборі даних

Архітектура	**Точність, %**	**Повнота, %**	**AP@.5, %**	**AP@.5:.95, %**	**FPS, к/с**
YOLOv5	89,3	79,9	86,1	34,1	100
Faster R-CNN	89,2	81,4	87,7	40,9	6,1



(а) (б)

Рисунок 3 – (а) Криві точності-повноти моделей після валідації на другому наборі даних; (б) Візуалізація після валідації на другому наборі даних

При отриманні зображення з нового місця розташування точність двох моделей зменшилася, проте Faster R-CNN має показник середньої точності вищий, ніж YOLOv5 на 1.6% та 6.8% для AP@.5 та AP@.5:.95 відповідно. З цього можна зробити висновок, що Faster R-CNN має більш глибоке навчання, що дозволяє не так сильно втрачати точність при отриманні зображення з новим середовищем.

Faster R-CNN не задовольняє вимогам виявлення в потоковому режимі, проте дає змогу досить точно визначати об'єкти в новому середовищі без донавчання. Цей алгоритм підходить у тих випадках, коли потрібно виявлення точних обмежувальних рамок і виявлення в різних середовищах без попереднього донавчання.

YOLOv5 задовольняє вимогам виявлення в потоковому режимі, при цьому зберігає досить високу точність. Однак при отриманні зображень з іншим середовищем може втратити точність виявлення як при порогового значення *IoU*, що дорівнює 0.5, так і за великих.

Висновки

У результаті дослідження зібрано набір даних із камер відеоспостереження і проанотоване за допомогою RoboFlow. Головні представники двох груп алгоритмів виявлення об'єктів YOLOv5 і Faster R-CNN навчені з використанням підготовленого набору даних. Експериментальним чином отримано метрики моделей. Результати показали, що обидві моделі мають свої переваги та недоліки, обидві моделі застосовні для різних завдань. Faster R-CNN зберігає високу точність за різних вхідних даних, але при цьому має повільну швидкість оброб-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ки, що не дає змоги її використовувати для виявлення в потоковому режимі. YOLOv5 трохи втрачає точність на нових наборах даних, маючи AP@.5 і AP@.5:.95 на 1.6% і 6.8% відповідно, ніж Faster R-CNN, проте володіє швидкістю оброблення в кілька разів вищою, ніж Faster R-CNN, що дає змогу використовувати її для обробки в потоковому режимі. Незважаючи на те, що YOLOv5 втрачає точність на новому наборі даних, показника AP має бути достатньо для вирішення завдання обчислення кількості об'єктів, похибка обчислення з такою точністю вважається допустимою. Якщо взяти до уваги, що досліджуване середовище з плином часу не змінюється, то можна донавчити модель для отримання більш точних результатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. B. Li, M. M. Fu, and Q. Li Runway crack detection basedon YOLOV5 // in Proc. IEEE 3rd International Conferenceon Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), Changsha, China, 2021, pp. 1252–1255.

2. B. Liu, W.C. Zhao, and Q. Q. Sun Study of object detection based on Faster R-CNN // in Proc. Chinese Automation Congress (CAC), Ji'nan, China, 2017, pp.6233–6236

3. Голенко М.Ю., Воротніков В.В., Єфіменко А.А. Методи покращення розпізнавання малих об'єктів алгоритму faster r-cnn для застосування на безпілотних літальних апаратах // Тези XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології», м. Житомир, 30–31 березня 2023 р. – Житомир: Житомирська політехніка, 2023. – с. 5-6. - URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/povnyy-tekst.pdf

REFERENCES

1. B. Li, M. M. Fu, and Q. Li Runway crack detection basedon YOLOV5 // in Proc. IEEE 3rd International Conferenceon Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), Changsha, China, 2021, pp. 1252–1255.

2. B. Liu, W.C. Zhao, and Q. Q. Sun Study of object detection based on Faster R-CNN // in Proc. Chinese Automation Congress (CAC), Ji'nan, China, 2017, pp.6233–6236

3. Golenko M.Yu., Vorotnikov V.V., Yefimenko A.A. Methods of improving the recognition of small objects of the faster r-cnn algorithm for use on unmanned aerial vehicles // Abstracts of the XIII International Scientific and Technical Conference "Information and Computer Technologies", Zhytomyr, March 30-31, 2023 - Zhytomyr: Zhytomyr Polytechnic, 2023. - p. 5-6. - URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/povnyy-tekst.pdf.

Received 08.01.2024.
Accepted 10.01.2024.

Detection of objects in the image in streaming mode using YOLOv5 i Faster R-CNN

The accuracy of the model can be one of the main indicators, on a basis of which it is possible to conclude about the suitability of the model for its practical operation. However, taking into account the specifics of the identified task, it is also worth paying attention to the speed of the model, since there is a need to process data in streaming mode.

To investigate the possibilities of using machine learning in an applied problem, two groups of object recognition models considered: YOLOv5 and Faster R-CNN.

The purpose of the study is to analyze the architectural solutions of the most common object detection models YOLOv5 and Faster R-CNN to build a model to improve the speed and accuracy of object detection in an applied task or further combine them.

A total of 550 training images and 105 validation images collected. A dataset of 573 images from the new location also collected for final validation of the models. The use of Roboflow provided for image annotation, which allows not only to mark images, but also to export annotated data sets in various formats. Training and validation of the models carried out on the Google Colab platform. The platform uses the Python programming language and the PyTorch framework. The yolov5 and detecron2 libraries for YOLOv5 and Faster R-CNN, respectively, used for model training and validation.

To determine whether the result belongs to one of the four groups, the IOU metric is used, which is the ratio of the intersection area to the area of the union of the correct and predicted bounding frames.

The size of the trained YOLOv5 and Faster R-CNN models was 40.2 MB and 230.8 MB, respectively. The models tested on the second validation set.

As result of the study, a set of data from video surveillance cameras collected and annotated using RoboFlow. The main representatives of two groups of object detection algorithms YOLOv5 and Faster R-CNN trained using the prepared data set. The results showed that both models have their advantages and disadvantages, both models are applicable for different tasks.

Божуха Лілія Миколаївна - к.ф.-м., доцент Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Сизоненко Олександра Дмитрівна – аспірант, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Bozhukha Liliia - Dnipro National University named after Oles Gonchar.

Syzonenko Oleksandra - Dnipro National University named after Oles Gonchar.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

«Системні технології» 1 (150) 2024 «System technologies»
DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-06
УДК 519.2:330.4

А.Ф. Доровці

ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО ДОБРОБУТУ НАСЕЛЕННЯ

Анотація. Стаття розкриває новий підхід до аналізу добробуту населення за допомогою теорії нечітких множин. Мета дослідження полягає в розробці та застосуванні методо логії, заснованої на нечіткій логіці, для кількісної оцінки та аналізу соціально економічного добробуту громадян. Основне завдання включає розробку методологічного підходу, побудову моделі для оцінки добробуту та розробку рекомендацій для планування соціально економічних стратегій. В якості рішення пропонується використання нечіткої логіки, яка дозволяє краще враховувати неоднозначності та невизначеності в даних про добробут населення. У дослідженні представлено детальний опис розробленої моделі, що включає формування лінгвістичних змінних, визначення терм множин і розробку правил виводу. Ці компоненти дозволяють моделі адаптуватися до різних умов і типів даних, забезпечуючи гнучкість і широке поле застосування методу. Дослідження також підкре слює важливість аналізу чинників, що впливають на добробут населення, таких як дохо ди домогосподарств, витрати на медикаменти та харчування, рівень освіти, стан жит ла, значення особистого господарства та інші. Автори вказують на динамічність впливу цих факторів і на необхідність їх регулярного оновлення для підвищення точності про гнозів. Результати дослідження демонструють, що розроблена модель забезпечує більш точні та обґрунтовані прогнози рівня соціально економічного добробуту порівняно з традиційними методами. Отримані дані можуть бути використані для планування соці ально економічних стратегій на мікро та макрорівнях, сприяючи розробці ефективних заходів для підвищення добробуту населення. Стаття вносить значний вклад у розви ток методів аналізу соціально економічного добробуту, показуючи потенціал нечіткої логіки як інструменту для підвищення точності прогнозування та розробки обґрунто ваних соціально економічних політик.
Ключові слова: нечітка логіка, добробут населення, доходи домогосподарств, фаззифіка ція даних, лінгвістична змінна, критеріальна матриця.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження полягає в тому, що забезпечення соціально-економічного добробуту населення є однією з ключових задач державної політики будь-якої країни. Сучасні економічні умови, характеризуються високим рівнем невизначеності та динамічністю, що вимагає від

© Доровці А.Ф., 2024

науковців та практиків розробки нових інструментів аналізу та прогнозування. Нечітка логіка, як метод аналізу даних, дозволяє ефективно працювати з нечіткими, неоднозначними даними та інформацією, що не може бути точно квантифікована, але відіграє важливу роль в оцінці соціально-економічного стану. Цей метод може забезпечити більш точне та гнучке моделювання соціально-економічних процесів, дозволяючи аналітикам краще розуміти та прогнозувати наслідки різних політичних рішень на добробут населення. В контексті глобалізації, змін у світовій економіці та постійного зростання соціальної нерівності, дослідження, що використовують нечітку логіку для аналізу соціально-економічного добробуту, стають особливо актуальними. Вони допомагають ідентифікувати та аналізувати складні взаємозв'язки між економічними показниками та соціальним добробуту, враховуючи різні групи населення та їх потреби.

Таким чином, використання нечіткої логіки в аналізі соціально-економічного добробуту дозволяє зробити оцінку більш комплексною та мультідисциплінарною, враховуючи не тільки економічні, але й соціальні, культурні та інші аспекти, що впливають на якість життя людей. Це сприяє розробці більш ефективних стратегій соціально-економічного розвитку та покращенню умов життя населення на національному та регіональному рівнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначають [1, 4] забезпечення соціально-економічного добробуту населення є узгодженою діяльністю суспільства щодо зменшення впливу соціальних ризиків з метою запобігання погіршенню умов соціальної безпеки загалом та найбільш уразливих верств населення. Для визначення рівня добробуту застосовується система об'єктивних показників, (заснованих на соціальних стандартах), та суб'єктивних, (враховують як кількісні, а й якісні оцінки рівня соціальної захищеності, які виміряти важко).

Теоретико-методологічні засади економетричного моделювання оцінювання соціально-економічного добробуту населення розробляють: [2, 3]. Серед робіт у галузі нечіткої логіки слід відзначити публікації [10], з нечіткої кластеризації та розпізнавання образів з нечіткого висновку та нечіткого інтегралу [11, 13] за нечіткою логікою. Але, незважаючи на велику кількість теоретичних робіт, прикладне значення нечітких моделей тривалий час ставилося під сумнів. Недостатньо розкритим аспектом тематики залишається комплексний та систематичний аналіз соціальних ризиків, їх якісна оцінка та про-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

гнозування; інтегральна оцінка досягнутого рівня добробуту населення на засадах використання нечіткої логіки.

Мета дослідження. Основною метою дослідження є розробка та аплікація методології на основі нечіткої логіки для оцінки та аналізу соціально-економічного добробуту населення.

Завдання дослідження: розробити методологічний підхід на основі нечіткої логіки, що включає формування лінгвістичних змінних, визначення термножин та розробку правил виводу для аналізу даних про добробут населення; побудувати модель на основі нечіткої логіки для оцінки рівня соціально-економічного добробуту населення, яка може адаптуватися до різних умов та типів даних; розробити рекомендації щодо застосування розробленої моделі для покращення процесів планування та втілення соціально-економічних стратегій на мікро- та макрорівнях.

Викладення основного матеріалу дослідження. У сфері економіки вивчення проблеми добробуту включає ідентифікацію кількості людей, які потребують підтримки, аналіз їхніх матеріальних умов та оцінку фінансових засобів, необхідних для забезпечення цієї підтримки. Особливо це стає важливим, коли бюджетні кошти обмежені, що робить цілеспрямованість надання допомоги критичним аспектом. У цьому контексті з'являється складність адекватної оцінки добробуту як на рівні окремих осіб, так і домогосподарств в цілому, враховуючи неповноту та неоднозначність доступної інформації. Наприклад, може існувати значна розбіжність між суб'єктивним сприйняттям індивідом свого добробуту та його об'єктивною оцінкою [8]. Хоча стандартні статистичні методи можуть бути корисними, ми пропонуємо використовувати методи нечіткої логіки для розв'язання подібних задач.

В роботі представлено набір критеріїв для оцінки добробуту, включаючи визначення їх властивостей, а також приклади конкретних розрахунків. Основа запропонованого підходу полягає в використанні концепції нечіткої лінгвістичної змінної, діапазон значень якої представлений через набір термінів, наприклад, використання змінної «Рівень доходу» з можливими значеннями «Низький», «Середній» та «Високий».

Дослідження виділяє ряд чинників, що впливають на добробут населення, включаючи визначення добробуту за різними критеріями, тип домогосподарства, у якому живе пенсіонер, витрати на медикаменти та харчування відносно доходу, пропорцію непрацюючих членів у домогосподарстві, освіту, стан жит-

ла, значення особистого господарства, тип населеного пункту, ризик алкоголізму та стать особи.

Варто підкреслити, що перелік факторів, що впливають на оцінку добробуту, та їх вплив може змінюватися з плином часу. Зокрема, домогосподарства з працюючими членами мають найвищий дохід на душу населення, який на третину перевищує дохід у домогосподарствах без пенсіонерів. Найменший дохід відзначається в домогосподарствах, де голова є непрацюючим пенсіонером, особливо якщо в сім'ї є залежні особи, такі як інваліди чи неповнолітні, при цьому пенсія стає головним джерелом доходу. Доходи таких домогосподарств можуть значно підвищуватися за рахунок допомоги на дітей, цільової соціальної підтримки, доходів від особистого господарства, фінансової підтримки від родичів та іншого [2]. Однак, відсутність статистичних даних значно ускладнює аналіз ситуації серед пенсіонерів.

Для розробки моделі оцінки рівня добробуту на основі нечіткої логіки ми пропонуємо використовувати наступні вхідні лінгвістичні змінні з трапецієвидними або трикутними функціями приналежності [5]:

– рівень доходів громадянина;
– загальний дохід домогосподарства;
– рівень заощаджень, включно з вартістю особистого майна;
– частку витрат на медичні потреби;
– частку витрат на харчування.

На початковому етапі ці фактори будуть вважатися однаково важливими. Функції приналежності можуть бути представлені за допомогою трапецієвидних функцій з визначенням термінів як «Низький», «Середній» та «Високий». Для формування трапецієвидної функції приналежності потрібно визначити чотири параметри: a, b, c, d [14].

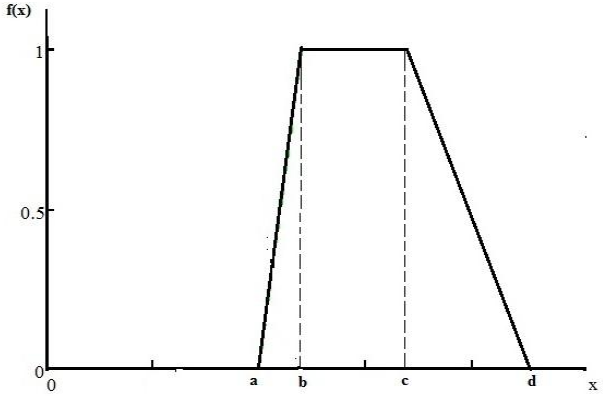


Рисунок 1 – Параметри трапецієподібної функції оцінки рівня добробуту [14]

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

На рисунку 2 представлено ілюстрацію графіків функцій приналежності для лінгвістичної змінної «Рівень доходу» із набором термінів {Низький, Середній, Високий}. Важливо відмітити, що трикутна функція приналежності може бути розглянута як спеціальний випадок трапецієподібної функції, де параметри b і c є ідентичними. Для категорії «Середній» параметри функції приналежності (виражені в тисячах гривень) встановлюються наступним чином: a = 8, b = 15, c = 15, d = 24 [7].

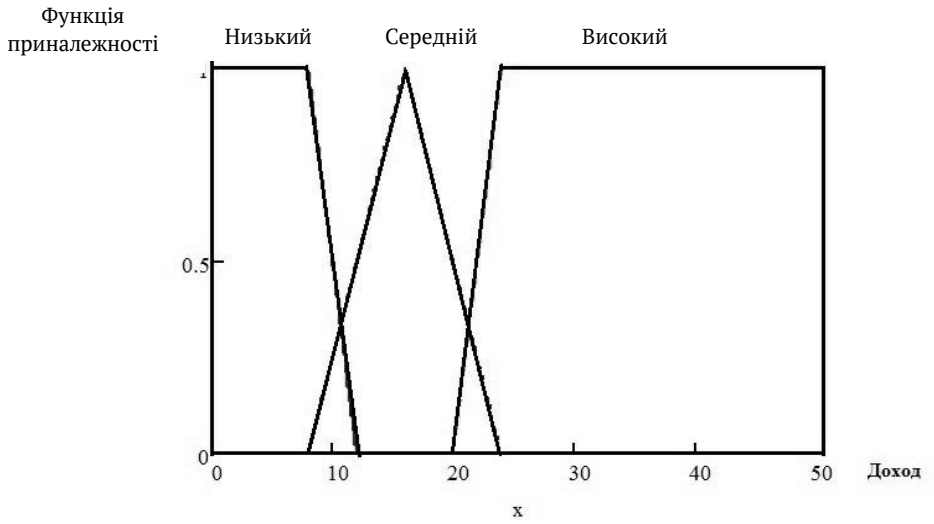


Рисунок 2 – Приклад функцій власності лінгвістичної змінної «Рівень доходу» [7]

Розробка моделей з використанням нечіткої логіки може бути здійснена за допомогою різних методик. У сфері економіки для аналізу рентабельності інвестицій часто вдаються до методу, який базується на встановленні набору евристичних правил, або так званих продукційних правил, типу «якщо-то». Основна проблема такого підходу полягає у потребі визначення великої кількості евристичних правил, обсяг яких складно передбачити заздалегідь. В роботі ми обрали методику, яка спирається на алгоритм, оптимальний з точки зору простоти та зручності використання, який легко імплементується у програмному забезпеченні, такому як Excel, та не потребує створення великої кількості продукційних правил [5].

Оцінка ризику потрапляння в категорію бідних визначається за допомогою змінної *g*, обчислення якої здійснюється згідно з формулою, придатною для програмного забезпечення Matlab. Також важливо зазначити, що результати моделювання значною мірою залежать від вибору типу та параметрів функції приналежності. Деталі класифікації цієї змінної представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Класифікація вихідної змінної моделі оцінки рівня добробуту

Інтервал значень змінної	Нечітка підмножина		
[0 - 0,3]	Ступінь низький	ризику	Добробуту
(0,3 – 0,7)	Ступінь середня	ризику	Добробуту
[0,7 - 1]	Ступінь високий	ризику	добробуту

В межах поставленої задачі представляється метод прогнозування, що включає наступні періоди [12]:

1) Встановлення універсальної множини *U*, яка представляє собою діапазон між мінімальними та максимальними варіаціями рівня життєвого стандарту населення.

2) Поділ універсальної множини *U* на декілька рівних за довжиною інтервалів, що покривають значення варіацій, асоційовані з різними рівнями зростання рівня добробуту населення.

3) Задання для опису варіацій рівня життя населення за допомогою лінгвістичної змінної та визначення відповідних лінгвістичних значень цієї змінної, тобто створення набору нечітких множин F(t).

4) Фаззифікація вхідних даних, яка передбачає перетворення точних числових значень у нечіткі. Цей процес дозволяє відобразити якісне розуміння темпів зростання рівня добробуту населення у вигляді функцій приналежності. Встановлення параметра *w>1,* що відображає часовий проміжок, що передує поточному році; розрахунок матриці нечітких відношень $R_W(t)$ та визначення прогнозу рівня добробуту населення на наступний рік.

5) Дефаззифікація отриманого результату, а саме перетворення нечітких значень назад у точні числові показники. Приклад реалізації зазначеної методики для аналізу рівня добробуту населення представлено через приклад з обмеженою кількістю даних, як перший крок у вирішенні задачі прогнозування [6].

У таблиці 2 наведено динаміку змін у рівні добробуту населення країни, яка слугує основою для створення «ретроспективного прогнозу», а також показано зміни в добробуті населення від періоду до періоду.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 2

Динаміка та відповідні варіації рівня добробуту населення

Період	Рівень доходу на 1 людину (грн.)	Варіація (грн.)	Фаззифікація варіації
A1	7282,6	0	
A2	7437,2	154,6	A2={(0.02/u1), (0.03/u2), (0.04/u3), (0.06/u4), (0.12/u5), (0.27/u6), (0.79/u7)}
A3	7464,8	27,6	A3={(0.6/u1), (0.92/u2), (0.34/u3), (0.14/u4), (0.07/u5), (0.04/u6), (0.03/u7)}
A4	7487,6	22,8	A4={(0.75/u1), (0.78/u2), (0.27/u3), (0.12/u4), (0.06/u5), (0.04/u6), (0.03/u7)}
A5	7496	8,4	A5={(0.98/u1), (0.39/u2), (0.15/u3), (0.08/u4), (0.05/u5), (0.03/u6), (0.02/u7)}
A6	7496,4	0,4	A6={(0.78/u1), (0.27/u2), (0.12/u3), (0.06/u4), (0.04/u5), (0.03/u6), (0.02/u7)}
A7	7526,8	30,4	A7={(0.52/u1), (0.98/u2), (0.39/u3), (0.15/u4), (0.08/u5), (0.05/u6), (0.03/u7)}

Під «варіацією» за певний період розуміють зміну в рівні добробуту порівняно з попереднім роком. Для встановлення універсального набору *U* спочатку потрібно визначити мінімальне та максимальне значення змін протягом аналізованого періоду, після чого для встановлення зручних границь інтервалу слід вибрати значення D_1 та D_2 (які є додатними числами). Відповідно, універсальний набір U можна визначити як $U: U = [V_{min} - D_1, V_{max} + D_2]$, де $V_{min} = 200$ є мінімальною зміною (у 7 періоді), Vmax = 154,6 є максимальною зміною (у 2 періоді), $D1 = 200, D_2 = 400$. Таким чином, універсальний набір U буде мати вигляд: $U=[0, 77700]$.

На другому етапі потрібно поділити універсальний набір U на декілька інтервалів, які мають однакову довжину. У цьому випадку, універсальний набір *U* поділено на сім інтервалів з однаковою довжиною: *u1=[0, 11100], u2=[11100, 22200], u3=[22200, 33300], u4=[33300, 44400], u5=[55500, 66600], u6=[55500, 66600], u7=[66600, 77700].* Важливо відмітити, що середня похибка прогнозування за методом нечітких часових рядів є мінімальною, тому слід вказати середні точки цих інтервалів.

Третій крок полягає в створенні набору нечітких множин в універсальному наборі *U*. «Варіація рівня добробуту населення» є лінгвістичною змінною, яка включає лінгвістичні значення, такі як дуже низький (ДН), низький (Н), без змін (БЗ), середній (С), нормальний (Н), високий (В) та дуже високий (ДВ) рівень зростання добробуту населення. Кожне лінгвістичне значення асоціюється з нечіткою множиною, яка за певним правилом відображає зміст змінної [9]. Наприклад, лінгвістичне значення «дуже низький рівень зростання добробуту населення» представлене нечіткою множиною <ДН, *[0, 11100], A_1*>, де A_1 – це нечітка множина, що охоплює діапазон *[0, 11100]* з універсального набору *U*.

Нечіткі множини *A1, A2,..., A7* у універсальному наборі *U* визначаються за допомогою формули:

$$\mu_{Ai}(u_i) = \frac{1}{1 + \left[C \times (V - u_{cp}^{i})^2 \right]}, \quad (1)$$

де:

V – варіації, вказані в таблиці 2;

u^i_{cp} – середні точки відповідних інтервалів, значення яких представлені (1);

C – це стала величина, вибрана таким чином, щоб забезпечити перехід від точних числових значень до нечітких, тобто їх вміщення в діапазон [0,1].

Кожна нечітка множина A_i представлена через відношення *(μ A (ui)/ui),* де *ui* належить *U*, і *μ A (ui)* варіюється в межах [0,1].

$$A_i = \mu_{Ai}(u_i / u_i), u_i \in U, \mu_{Ai}(u_i) \in [0,1]. \quad (2)$$

Якщо у формулі (1) як значення змінної *V* прийняти середні точки відповідних інтервалів, тоді нечіткі множини A_i *(i=1,7)* будуть визначені таким чином:

$$A1 = \{(1/u1),(0.45/u2),(0.17/u3),(0.08/u4),(0.05/u5),(0.03/u6),(0.02/u7)\}$$
$$A2 = \{(0,45/u1),(1/u2),(0.45/u3),(0.17/u4),(0.08/u5),(0.05/u6),(0.03/u7)\}$$
$$A3 = \{(0,17/u1),(0.45/u2),(1/u3),(0.45/u4),(0.17/u5),(0.08/u6),(0.05/u7)\}$$
$$A4 = \{(0,08/u1),(0,17/u2),(0,45/u3),(1/u4),(0,45/u5),(0,17/u6),(0\,об08/u7)\} \quad (3)$$
$$A5 = \{(0,05/u1),(0,08/u2),(0,17/u3),(0,45/u4),(1/u5),(0,45/u6),(0,17/u7)\}$$
$$A6 = \{(0,03/u1),(0.05/u2),(0.08/u3),(0.17/u4),(0.45/u5),(1/u6),(0.45/u7)\}$$
$$A7 = \{(0,02/u1),(0.03/u2),(0.05/u3),(0.08/u4),(0.17/u5),(0.45/u6),(1/u7)\}$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

На рисунку 3 показано приклади безперервних функцій приналежності для нечітких множин A_i, які демонструють різні рівні варіації добробуту населення, описані через лінгвістичну змінну.

Четвертий крок полягає у фазифікації варіацій, отриманих на першому кроці. Для цього, якщо варіація для періоду і становить V_i , і V_i належить до інтервалу u_j з універсальної множини U, то функція приналежності $\mu A_i\ (uj)$ для даного інтервалу u_j визначається відповідно до формули, з врахуванням $V = V_i$. Це означає, що з універсальної множини виділяється інтервал, який включає обрану варіацію. Результати фазифікації для всіх аналізованих періодів представлені в таблиці 1, де A^{mn} є нечіткими множинами, що відповідають варіаціям за рік $t = mn$. Для спрощення у таблиці 1 показані лише останні дві цифри кожного періоду.

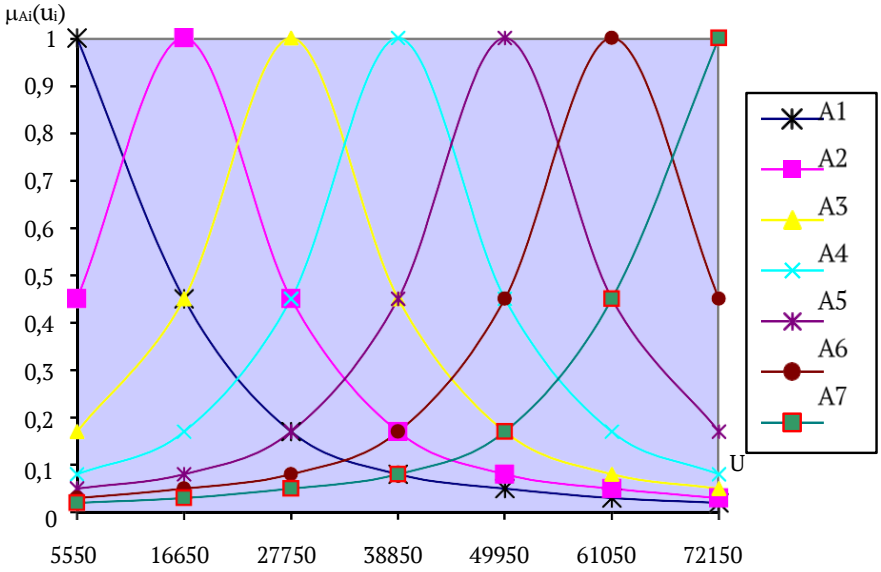


Рисунок 3 – Функції належності значень нечітких множин лінгвістичної змінної «варіація рівня добробуту населення» (побудовано авторами)

На п’ятому кроці потрібно визначити базовий період w, який варіюється в межах $1<w<l$, де l – загальна кількість періодів, що включаються до аналізу і передують поточному періоду. Виходячи з цього базису, тобто історичних даних, розраховується матриця нечітких відносин $R_w(t)$, на підставі якої формується прогноз. Після встановлення w створюється операційна матриця – $i \times j$ $O^w(t)$ (де i – кількість рядків, що відповідає кількості періодів в послідовності $t - 2$, $t - 3$, ..., $t - w$; j – кількість стовпців, що відповідає кількості інтервалів варіацій) та критеріальна матриця $1 \times j$ $K(t)$ для періоду, що прогнозується t (однорядкова матриця, яка відображає нечітку варіацію рівня добробуту населення за рік $t - 1$). Наприклад, вибираючи $w=5$, можливо побудувати операційну матрицю 4×7,

$O^7(t)$ для аналізу нечіткої варіації рівня добробуту населення за останні 4 періоди до *t*, а також критеріальну матрицю *1×7 K(t),* яка представляє собою нечітку варіацію за рік *t – 1*. Таким чином, при w=5 аналізується інформація за 6 попередніх періодів.

Сталий прогноз є ключовим аспектом соціально-економічного планування, оскільки він дозволяє прогнозувати майбутній дохід населення, структуру за віком та статтю в працездатному віці, а також економічно активну частину населення. Ці параметри враховуються при розробці науково обґрунтованої стратегії соціально-економічного розвитку та визначенні комплексу заходів для її втілення, зокрема в контексті прогнозування ситуації на ринку праці в майбутньому.

Висновки. Дослідження визначає як застосування теорії нечітких множин може сприяти кращому розумінню складних соціально-економічних процесів та феноменів, надаючи можливість врахувати неоднозначність і невизначеність, що часто супроводжують доступні дані про добробут населення. Метод оцінки рівня добробуту населення, представлений у дослідженні, надає можливість прогнозування демографічних змін на ринку праці, включаючи зміни в загальній чисельності населення, кількості працездатних осіб та економічно активного населення, використовуючи нечіткі часові ряди. Однією з ключових особливостей цього методу є його спроможність робити прогнози на основі обмеженої або нечіткої початкової інформації. Використаний підхід дозволяє враховувати історичні дані про динаміку населення для будь-якого періоду, що підвищує точність прогнозів щодо майбутнього стану ринку праці. На основі цього методу були розроблені спеціалізовані алгоритми та програмне забезпечення, які дозволили аналізувати великий обсяг статистичних даних, порівнювати отримані за допомогою нечіткої прогностичної моделі результати з даними, отриманими за іншими методами прогнозування, і зробити висновок про ефективність запропонованого методу для аналізу рівня добробуту населення країни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богуславська С.І. Трансформація регіонального менеджменту в умовах глобалізації для забезпечення сталого розвитку регіонів України. *Бізнес Інформ*. 2021. № 4. С. 90–97.

2. Капінос Г., Ларіонова К. Проблеми управління сталим розвитком україни в умовах війни. *Modeling the development of the economic systems*. 2023. №(1). С. 93-103. DOI: https://doi.org/10.31891/mdes/2023-7-13.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

3. Македон В.В., Маковецька А.О. Інформаційне забезпечення економічної безпеки підприємств в умовах ринкової нестабільності. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: «Економічні науки»*. 2023. №12. DOI: https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477.
4. Ольшанська О.В., Хмелевський М.О. Регіонально-системна організація економіки як чинник реалізації цілей сталого розвитку. *Імперативи економічного зростання в контексті реалізації глобальних цілей сталого розвитку*. 2021. С. 17–21.
5. Ashok S., Krishna S., Ponnambalam S. Fuzzy Logic-Based Multi-Objective Decision-Making Model for Design Evaluation in an Open Innovation Environment. *Innovation Analytics*. 2023. DOI: 10.1142/9781786349989_0011.
6. Doroudi H., Goudarzi F., Kandel B.K. The effect of the competitiveness index on economic growth, with an emphasis on institutional and structural variables: 10 selected countries exporting oil. *Philosophy, Economics and Law Review*. 2022. Volume 2. no. 2. pp. 85-95. DOI 10.31733/2786-491X-2022-2-85-95.
7. Hernández-Hernández M., Alfonso Bonilla Cruz L., Cobián-Romero L. Improvement of Validated Manufacturing Processes with Fuzzy Logic. *IntechOpen*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.113302.
8. Makedon V., Hetman O., Yemchuk L., Paranytsia N., Petrovska S. Human resource management for secure and sustainable development. *Journal of security and sustainability issues*. 2019. № 8(3). pp. 345-354.
9. Mendez G.M., Lopez-Juarez I., Montes-Dorantes P.N. and Garcia M.A. A New Method for the Design of Interval Type-3 Fuzzy Logic Systems With Uncertain Type-2 Non-Singleton Inputs (IT3 NSFLS-2): A Case Study in a Hot Strip Mill. *IEEE Xplore*. 2023 vol. 11, 44065-44081. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272531.
10. Peckol J.K. *Introduction to Fuzzy Logic*. Nashville, TN, Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, 2021. 442 p.
11. Sabounchi M., Wei-Kocsis J. FLTRL: A Fuzzy-Logic Transfer Learning Powered Reinforcement Learning Method for Intelligent Online Control in Power Systems. *Explainable AI and Other Applications of Fuzzy Techniques*. Proceedings of the 2021 Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS 2021. 2022. pp. 368-379. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82099-2_33.
12. Servin C., Becker B., Eaton E., Kumar A. Fuzzy Logic++: Towards Developing Fuzzy Education Curricula Using ACM/IEEE/AAAI CS2023. *Fuzzy Information Pro-*

cessing 2023 Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. pp. 184-193. DOI: 10.1007/978-3-031-46778-3_17.

13. Shang K., Hossen Z. *Applying Fuzzy Logic to Risk Assessment and Decision-Making*. Casualty Actuarial Society, Canadian Institute of Actuaries, Society of Actuaries. 2013. 168 p.

14. Sivanandam S.N. Sumathi S.D.S. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 190 p.

REFERENCES

1. Boguslavska, S.I. (2021). Transformatsiia rehionalnoho menedzhmentu v umovakh hlobalizatsii dlia zabezpechennia staloho rozvytku rehioniv Ukrainy [Transformation of regional management in the conditions of globalization for maintenance of sustainable development of regions of Ukraine]. *Business Inform*, 4, 90-97.

2. Kapinos, H., Larionova, K. (2023). Problemy upravlinnya stalym rozvytkom ukrayiny v umovakh viyny [Problems of managing the sustainable development of Ukraine in conditions of war]. *Modeling the development of the economic systems*, 1, 93-103. DOI: https://doi.org/10.31891/mdes/2023-7-13.

3. Makedon, V.V., Makovets′ka, A.O. (2023). Informatsiyne zabezpechennya ekonomichnoyi bezpeky pidpryyemstv v umovakh rynkovoyi nestabil′nosti. [Information provision of economic security of enterprises in conditions of market instability]. *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal "Internauka". Seriya: "Ekonomichni nauky"*, 12. DOI: https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477.

4. Olshanska, O.V., Khmelevskyi, M.O. (2021). Rehionalno-systemna orhanizatsiia ekonomiky yak chynnyk realizatsii tsilei staloho rozvytku [Regional and systemic organization of the economy as a factor in realizing the goals of sustainable development]. *Imperatyvy ekonomichnoho zrostannia v konteksti realizatsii hlobalnykh tsilei staloho rozvytku*, 17–21.

5. Ashok, S., Krishna, S., Ponnambalam, S. (2023). Fuzzy Logic-Based Multi-Objective Decision-Making Model for Design Evaluation in an Open Innovation Environment. *Innovation Analytics*. DOI: 10.1142/9781786349989_0011.

6. Doroudi, H., Goudarzi, F., Kandel, B.K. (2022). The effect of the competitiveness index on economic growth, with an emphasis on institutional and structural variables: 10 selected countries exporting oil. *Philosophy, Economics and Law Review*, 2, 2, 85-95. DOI 10.31733/2786-491X-2022-2-85-95.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

7. Hernández-Hernández, M., Alfonso Bonilla Cruz, L., Cobián-Romero, L. (2023). Improvement of Validated Manufacturing Processes with Fuzzy Logic. *IntechOpen*. DOI: 10.5772/intechopen.113302.
8. Makedon, V., Hetman, O., Yemchuk, L., Paranytsia, N., Petrovska, S. (2019). Human resource management for secure and sustainable development. *Journal of security and sustainability issues*, 8(3), 345-354.
9. Mendez, G.M., Lopez-Juarez, I., Montes-Dorantes, P.N. and Garcia, M.A. (2023). A New Method for the Design of Interval Type-3 Fuzzy Logic Systems With Uncertain Type-2 Non-Singleton Inputs (IT3 NSFLS-2): A Case Study in a Hot Strip Mill. *IEEE Xplore*, 11, 44065-44081. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3272531.
10. Peckol, J.K. (2021). *Introduction to Fuzzy Logic*. Nashville, TN, Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
11. Sabounchi, M., Wei-Kocsis, J. (2022). FLTRL: A Fuzzy-Logic Transfer Learning Powered Reinforcement Learning Method for Intelligent Online Control in Power Systems. *Explainable AI and Other Applications of Fuzzy Techniques*. Proceedings of the 2021 Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS 2021, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-82099-2_33.
12. Servin, C., Becker, B., Eaton, E., Kumar, A. (2023). Fuzzy Logic++: Towards Developing Fuzzy Education Curricula Using ACM/IEEE/AAAI CS2023. *Fuzzy Information Processing 2023 Lecture Notes in Networks and Systems*. 184-193. DOI: 10.1007/978-3-031-46778-3_17.
13. Shang, K., Hossen, Z. (2013). *Applying Fuzzy Logic to Risk Assessment and Decision-Making*. Casualty Actuarial Society, Canadian Institute of Actuaries, Society of Actuaries.
14. Sivanandam, S.N. Sumathi, S.D.S. (2006). *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Received 08.01.2024.
Accepted 11.01.2024.

Use of fuzzy logic for analyzing the socio-economic well-being of the population

The article reveals a new approach to the analysis of population welfare using the theory of fuzzy sets. The purpose of the study is to develop and apply a methodology based on fuzzy logic to quantify and analyze the social and economic well-being of citizens. The main task includes the development of a methodological approach, the construction of a model for assessing well-being and the development of recommendations for planning socio-economic strategies. As a solution, the use of fuzzy logic is proposed,

which allows better consideration of ambiguities and uncertainties in the data on the well-being of the population. The study presents a detailed description of the developed model, which includes the formation of linguistic variables, the definition of term sets, and the development of inference rules. These components allow the model to adapt to different conditions and types of data, providing flexibility and a wide field of application of the method. The study also emphasizes the importance of analyzing factors that affect the well-being of the population, such as household income, expenditure on medicine and food, education level, housing conditions, the importance of personal economy and others. The authors indicate the dynamic influence of these factors and the need for their regular updating to increase the accuracy of forecasts. The results of the study demonstrate that the developed model provides more accurate and reasonable forecasts of the level of socio-economic well-being compared to traditional methods. The obtained data can be used to plan socio-economic strategies at the micro and macro levels, contributing to the development of effective measures to improve the well-being of the population. The article makes a significant contribution to the development of socio-economic welfare analysis methods, showing the potential of fuzzy logic as a tool for increasing the accuracy of forecasting and developing sound socio-economic policies.
Keywords: fuzzy logic, population welfare, household income, data fuzzification, linguistic variable, criterion matrix.

Доровці Адам Федорович - аспірант кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського Національного Університету.

Dorovtsi Adam - Phd student of the Department of cybernetics and applied mathematics, Uzzhorod National University.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

«Системні технології» 1 (150) 2024 «System technologies»
DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-07
УДК 519.6:656.1

С.О. Кирилов

ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОПРОДУКТОВИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ З ДИСКРЕТНИМИ ПОТОКАМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ДАННИХ

Анотація. Стаття зосереджується на аналізі існуючих досліджень і публікацій у цій галузі, звертаючи увагу на внесок закордонних та вітчизняних вчених у розробку моделей та методів управління мережевими ресурсами. Більшість досліджень фокусується на детермінованих моделях та моделях, що базуються на математичних засадах теорій масового обслуговування та випадкових марківських процесів. Автор вказує на недостатність існуючого математичного інструментарію для моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж з дискретними потоками, що вимагає розробки нових математичних моделей і методів. Метою дослідження є розробка та аналіз ефективних підходів до проєктування багатопродуктових транспортних мереж з особливим фокусом на дискретних потоках магістральних даних. Автор зазначає, що це включає в себе розробку нових підходів та методів для ефективного управління та оптимізації розподілу ресурсів, а також моделювання специфіки дискретних потоків у контексті магістральних транспортних систем. Важливою частиною дослідження є створення ієрархічної структури системи для автоматизованого управління ресурсами та розподілом потоків у великомасштабних мережах. Автор наголошує на необхідності розробки методології, яка інтегрує вже існуючі досягнення у цій галузі та дозволяє ефективно розв'язувати практичні задачі, пов'язані з довгостроковим розвитком, поточним плануванням та оперативним управлінням у масштабних мережах. Така методологія має включати моделі різних рівнів агрегування та бути придатною для всіх рівнів ієрархічної структури мережі. Дослідження також включає розгляд математичних моделей та алгоритмів для моделювання та аналізу функціонування многопродуктових мереж з дискретними потоками.
Ключові слова: транспортні мережі, магістральні дані, клас потоку, кооперація транспортних потоків, математична модель

Постановка проблеми. Транспорт та зв'язок було визначено як ключові сектори для розвитку економіки України. Для підвищення їх ефективності необхідно створити прикладне математичне програмне забезпечення, яке допоможе в оптимізації транспортних процесів та розробці інформаційно-аналітичних систем для покращення управління, обробки та розподілу транспортних потоків. Важливість цієї проблеми для прискорення ринкових транс-

© Кирилов С.О., 2024

формацій в Україні, особливо у сфері перевезень дрібнопартійних вантажів, призвела до вивчення математичного моделювання та проєктування багатопродуктових комунікаційних мереж із дискретними потоками дрібнопартійних відправлень. Сучасні та заплановані комунікаційні мережі зазвичай мають багаторівневу структуру, що визначається адміністративним розподілом території, управлінською ієрархією, технологіями обробки та розподілу вантажів та інформації [7]. Такі мережі, як правило, складаються з верхнього рівня — магістральної розподіленої мережі та нижніх рівнів — зональних та внутрішніх мереж. Проектування багаторівневих комунікаційних мереж має враховувати особливості складних систем, таких як неможливість повної централізації обробки інформації та управління в одній ланці. Це вимагає створення ієрархічної структури системи для автоматизованого управління ресурсами та розподілом потоків у мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі теорії проєктування масштабних мережевих структур наука збагатилася значним теоретичним та практичним досвідом у вирішенні завдань структурного аналізу, синтезу, оптимізації та управління потоками в багатопродуктових мережах. Важливий внесок у розробку моделей та методів управління мережевими ресурсами розглянуто в роботах [1, 2, 4, 11]. Більшість досліджень цих авторів фокусується на детермінованих моделях та моделях, заснованих на математичних засадах теорій масового обслуговування та випадкових марківських процесів. У цих роботах зазвичай передбачається, що потоки або детерміновані, або стаціонарні протягом певних часових періодів розподілу ресурсів. Однак реальні потоки не мають цих властивостей. До того ж у більшості випадків потоки та параметри елементів мережі є дискретними величинами [3]. Існуючий математичний інструментарій для моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж із дискретними потоками ще недостатньо розвинений. Потрібно створення нових математичних моделей і методів вирішення, що враховують немарківський характер випадкових процесів, неоднорідність, нестаціонарність та дискретність потоків у таких мережах.

Мета дослідження. Головною метою дослідження у статті є розробка та аналіз ефективних підходів до проєктування багатопродуктових транспортних мереж. Особлива увага приділяється мережам, що оперують з дискретними потоками, з акцентом на магістральні дані. Це передбачає вивчення специфіки дискретних потоків в контексті транспортних систем та розробку моделей для оптимізації розподілу ресурсів та управління потоками.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Викладення основного матеріалу дослідження. Важливим стає завдання розробки прикладного інструментарію для проєктування багатопродуктових транспортних мереж. Ця методологія має інтегрувати вже існуючі досягнення в цій галузі та надати можливості для ефективного розв'язання різноманітних практичних задач. Особливий акцент робиться на задачах, що стосуються довгострокового розвитку, поточного планування, а також оперативного управління великомасштабними мережами, які оперують з дискретними потоками та мають дискретні параметри своїх елементів. Така розрахункова практика повинна включати моделі різних рівнів агрегування та бути придатною для всіх рівнів ієрархічної структури мережі. Для збереження єдності структури формалізації будемо використовувати для визначення простору транспортних потоків термінологію алгебраїчних систем. Тоді, простір «активних транспортних потоків» в межах багатопродуктової транспортної мережі можна представити у вигляді багатоосновної моделі [6]:

$$S_A = (P_A, C_A, F, T, L, R_A, \Omega_A), \quad (1)$$

де P_A – безліч транспортних потоків, які використовуються при синтезі, C_A – безліч класів транспортних потоків, F – семантичний гіперграф-решітка кооперації, T – безліч типів взаємодії транспортних потоків, L – мова обміну повідомленнями в багатопотоковій системі, RA – безліч відносин між потоками, Ω_A – безліч операцій, визначених над потоками. Основою системи є об'єднання $P_A \cup C \cup T \cup Z \cup L$.

На цьому рівні формалізації клас потоку можна розглядати синонімом поняття «ролі», взятої на себе потоком. Потік, що розглядається як «активний об'єкт», в процесі синтезу використовується для моделювання об'єктів предметної області, наділених деякими характеристиками, такими, як [8, 11]:

1) активність, здатність до організації та реалізації дій;

2) реактивність, здатність сприймати стан міжнародного та макроекономічного середовища;

3) автономність, відносна незалежність від навколишнього середовища;

4) товариськість, що випливає з необхідності вирішувати свої завдання спільно з іншими учасниками транспортної мережі;

5) цілеспрямованість, яка передбачає наявність власних джерел мотивації, а в більш широкому плані, особливих інтенціональних характеристик.

Перераховані характеристики підкреслюють характер потоку як відкритої, активної системи, основна увага в якій приділяється «процесу взаємодії транспортних потоків як причини виникнення системи з новими якостями» [4]. Потік включає набір властивостей, або якостей, що дозволяють інтерпретувати деякі сутності з моде-

лі предметної області, і набір правил поведінки, що дозволяють потоку робити активні дії для досягнення поставлених цілей. Визначимо елемент безлічі транспортних потоків як окремого потоку:

$$P_A^i = (o_a^i, z_i, c_i, M_a^i, \upsilon, O), \tag{2}$$

де o_a^i – вихідна система потоку, що представляє модель об'єкта з предметно-орієнтованої бази або іншого об'єкта з позначеними множинами вхідних і вихідних впливів, представником інтересів якого потік є, в окремому випадку, $o_a^i \in S_E$, z_i – стан потоку, яке визначається як набір значень характеристик o_a^i; c_i – клас потоку, $c_i \in C_A$; υ – покажчик положення потоку в просторі, O – процедура переговорів з потоками, які перебувають на тому ж рівні простору υ, з метою встановлення комунікацій, або, в більш загальному сенсі, модель кооперації потоку. Потік може представляти як модель мети, окрему підсистему $S_E \in S_E$, так і безліч транспортних потоків, які представляють підсистеми або безлічі інших транспортних потоків [9]. Клас потоку C_A визначимо наступним чином:

$$C_A = (C^N, C^T, M_a). \tag{3}$$

де $C^N = \{c_1, c_2, c_3\}$ – найменування класу, C^T – безліч типів взаємодії, підтримуваних потоками даного класу, M_a – модель ментальних характеристик потоку, тобто опис позиції та прагнень потоку в процесі синтезу, які накладають обмеження на процес встановлення комунікацій з іншими потоками та поведінку потоку в процесі досягнення поставленої мети.

Виділення класів транспортних потоків відповідає визначенню виконуваних потоком ролей і підтримуваних взаємодій. Для вирішення завдань проектування будемо виділяти три класи транспортних потоків [2]: *ATA* – поток абстрактної мети $(o_a^i = E)$, *ACA* – поток конкретної мети $(o_a^i = \vartheta_\omega)$, *AP* – поток реалізації $(o_a^i = S_E^k)$. Ієрархія взаємодії класів транспортних потоків може бути представлена наступною схемою (рис. 1.).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

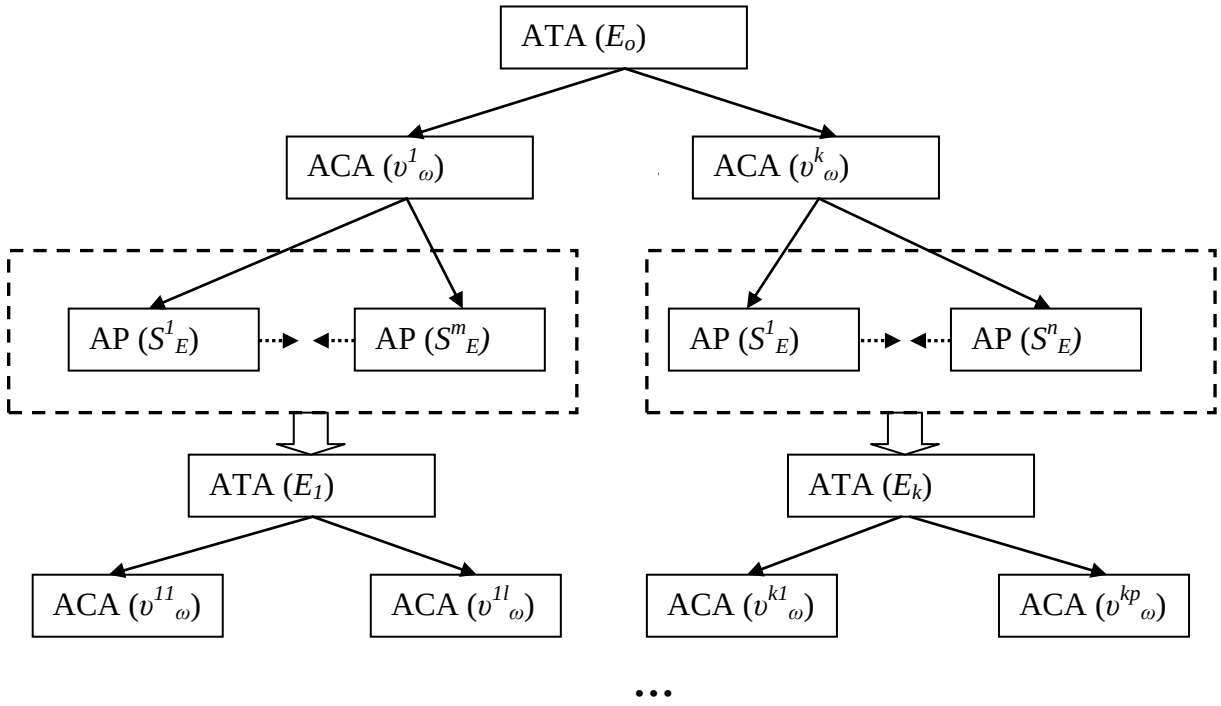


Рисунок 1 - Структура взаємодіючих транспортних потоків
у багатопродуктових транспортних мережах

Для визначення ментальних транспортних потоків пропонуємо використовувати семантику можливих світів в CTL-логіці. Представляємо модель ментальних характеристик транспортних потоків з підтримкою моделі Kripke:

$$M = (W, E, U, B, G, I, \Phi), \tag{4}$$

де W – необмежена кількість «світів», E – велика кількість типів, U – множина формул, B, G, I – відношення, показують поточну ситуацію на множину «безлічі світів» (переконань, бажань і намірів) транспортних потоків ($B, G, I: w \rightarrow 2^{\Phi}$), Φ – множина атомарних висловлювань.

Елемент з «безліччю світів» дописується четвіркою:

$$w = (T_w, A_w, S_w, F_w) \tag{5}$$

де T_w – великі моменти часу, в яких існує «безліч світів», A_w – частинний порядок на T_w, S_w, F_w задає вказані $T_w x\ T_w \rightarrow E$ і визначає результати, пов'язані з тим, що визначаються між двома моментами часу.

У множині відношення R_s визначимо множини нечітких відносин еквівалентностей R і нечітких відношень часткового порядку P на X_S. Важливість виділення саме цих двох класів відносна з точки зору можливостей аналізу отриманих результатів була показана раніше [5]. Відкриття можливо використовувати між елементами всередині виділених підпросторів, так і між елементами різних підпросторів і

безпосередньо між самими приватними просторами, тобто задають топологію [10, 12]. Кожна ітерація змін станції проектування складається з наступних етапів:

1). Кожний з елементів побудованої множини $\{S_E\}_E$ є комбінацією об'єктів і делегує повноваження окремому потоку.

2). Безліч транспортних потоків, що представляють об'єкти даної комбінації $\{S_E\}_{E^i}$ створює підпростір $\vartheta_\omega^{\,i}$.

3). Потоки однієї частини простору $\vartheta_\omega^{\,i}$ вимагають побудови кооперативної структури відносно поєднання декількох вільних вхідних та вихідних впливів.

4). У випадку неможливості продовження кооперацій, кожний з кооперативних матеріалів породжує модель цілих «активних транспортних потоків».

5). У випадку неможливості участі в кооперативних структурах поток формує нову множину транспортних потоків у відповідності з моделями цілих.

Побудуємо модель ментальних характеристик транспортних потоків, конструктивної послідовності дій за досягненням цілих проєктів. Поток може знаходитись в одному з кількох станів:

$$W = \{\text{«Free»}, \text{«Ready»}, \text{«Collaboration process»}, \text{«Installation»}, \text{«Legal Collaboration»}, \text{«Generation»}\}. \quad (6)$$

Модель «активних транспортних потоків» пропонується описувати наступним чином (табл. 1).

В таблиці 2 представлена модель перехідних станів «активних транспортних потоків» при забезпеченні розвитку складних економічних систем.

Між «активними потоками» в межах багатопродуктової транспортної мережі встановлюються взаємодії типу «з'єднання». Для моделювання кооперацій транспортних потоків використовується модифікований протокол контрактних мереж, який відкриває в процесі відбору заявки на запитання, як ініціатор, так і учасник кооперації. Ініціює кооперацію «активний потік», що має власні вільні виходи, який розширює пропозицію всіх інших транспортних потоків у межах системи. Учасники ранжують прийняті заявки та виконують найкращу пропозицію, про що повідомляє ініціатор [1]. Ініціатор ранжує отримані відповіді та піднімає на вищі рівні більш вигідну пропозицію, про що повідомляє учасників.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 1

Опис ментальних характеристик транспортних потоків
в складних транспортних системах

$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$	w_1	‘free’
	w_2	‘ready’
	w_3	‘collaboration process’
	w_4	‘connection’
	w_5	‘end collaboration’
	w_6	‘aim generation’
$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$	e_1	‘job received’
	e_2	‘send request’
	e_3	‘request received’
	e_4	‘partner selected’
	e_5	‘communicate need’
$\Phi = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$	a_1	‘model defined’
	a_2	‘free impacts’
	a_3	‘have a question’
	a_4	‘have a request’
	a_5	‘cooperation is possible’
U	$B(\text{have}(X,E) \wedge \sim \text{super}(X,E,Y) \rightarrow \text{reject_proposal}(X,E,Y))$	
	$B(\text{have}(X,E) \rightarrow \text{call_proposal}(X,E,Y))$	
	$B(\text{have}(X,E) \wedge \text{propose}(Y,X,E) \rightarrow \text{collect}(X,E,Y))$	
	$B(\text{have}(X,E) \wedge \textit{refuse}(Y,X,E) \rightarrow \text{reject}(X,E,Y))$	
	$B(\text{have}(X,E) \wedge \text{super}(X,E,Y) \rightarrow \textit{accept}_\text{proposal}(X,E,Y))$	
	$B(\textit{accept}_\text{proposal}(X,E,Y) \rightarrow \textit{connect}(X,E,Y))$	
	$I(\textit{connect}(X,E,Y))$	
	….	

Таблиця 2

Модель перехідних станів «активних транспортних потоків» при забезпеченні
розвитку в складних транспортних системах

Поточний стан	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	Новий стан
w_1	***t***	–	–	–	–	w_2
w_2	–	***T***	–	–	***t***	w_3
w_3	–	***T***	–	***t***	***t***	w_4
	–	***F***	–	–		w_5
	–	–	–	–	***f***	w_5
w_4	–	***t***	–	***f***	–	w_3
w_5	–	***t***	–	–	–	w_6
w_6	–	–	–	–	–	w_1

Висновки. В межах проведеного дослідження було узагальнено методичний та аналітико-прикладний досвід формального опису процесів концептуального проектування складних багатопродуктових транспортних мереж з дискретними потоками магістральних даних на засадах моделювання та представлення. Було розроблено алгоритмічні варіанти формалізації для побудови інтелектуальної потокової багатопродуктової транспортної мережі, яка одночасно може синтезувати різні економічні сфери або ініціативи за принципом відбору кращих вхідних параметрів економічних підсистем. Запропоновано формалізований опис «середовища проектування», на основі виділення просторів об'єктів і транспортних потоків. Побудована модель бази знань системи синтезу у вигляді «простору об'єктів», в якій виділяються простір інваріантних понять і простір предметно-орієнтованих понять, що включає базу структурних елементів, які використовуються при синтезі транспортних потоків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Agadaga G.O., Akpan N.P. A Transshipment Model of Seven-Up Bottling Company, Benin Plant, Nigeria. *American Journal of Operations Research*. 2019. 9(3). pp. 129. 129-145. URL: https://10.4236/ajor.2019.93008 (дата звернення 09.01.2024).

2. Alshamsi A., Diabat, A. A reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. №37(3). pp. 589–598.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.006.

3. Anderluh A., Nolz P.C., Hemmelmayr V.C., Crainic T.G., Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and "grey zone" customers arising in urban logistics. *The European Journal of Operational Research*. 2021. №289. pp. 940–958.

4. Herrera O., Jerez V., Arrieta N., Camacho G. Transshipment and routing model for multi-product planning and distribution at a refreshment company in Bogota, Colombia. *Journal of applied research and technology*. 2022. №20(4). pp. 408-417. DOI: https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1330.

5. Keshavarz-Ghorabaee Mehdi, Amiri Maghsoud, Olfat Laya, Khatami Firouzabadi Ali. Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Technological and Economic Development of Economy*. 2017. №23. pp. 520-548.
DOI: https://doi.org/10.3846/20294913.2017.1312630.

6. Ma R., Yao L., Jin M., Ren P., Lv Z. Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2016. 89. pp. 195–202. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

7. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Volume 29. Issue 1. pp. 73-91.
8. Ruvalcaba Sandoval D., Olivares-Benitez E., Rojas R., Sosa-Gómez G. Matheuristics for the Design of a Multi-Step, Multi-Product Supply Chain with Multimodal Transport. *Applied Science*. 2021. 11. P. 10251.
DOI: https://doi.org/10.3390/app112110251.
9. Selsam D., Lamm M., Bunz B., Liang P., de Moura L., Dill D.L. Learning a SAT solver from Single-Bit supervision. 7th International Conference on Learning Representations, ICLR May 6 – 9, 2019. New Orleans, USA. 2019. 278 p.
10. Shaw K., Irfan M. Shankar R. and Yadav S.S. Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a benders decomposition based approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2016. №98. pp. 483–497.
11. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Volume 25. Issue 6. URL: https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html (дата звернення 09.01.2024).
12. Tarvin D.A., Wood R.K., Newman A.M. Benders decomposition: Solving binary master problems by enumeration. *Operations Research Letters*. 2016. №44. pp. 80–85.

REFERENCES

1. Agadaga, G.O., & Akpan, N.P. (2019). A Transshipment Model of Seven-Up Bottling Company, Benin Plant, Nigeria. *American Journal of Operations Research*, 9(3), 129, 129-145. Available at: https://10.4236/ajor.2019.93008 (accessed January 09, 2024).
2. Alshamsi, A., & Diabat, A. (2015). A reverse logistics network design, Journal of Manufacturing Systems, 37(3), 589–598
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.006.
3. Anderluh, A., Nolz, P.C., Hemmelmayr, V.C. & Crainic, T.G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and "grey zone" customers arising in urban logistics. *The European Journal of Operational Research*, 289, 940–958.
4. Herrera, O., Jerez, V., Arrieta, N., & Camacho, G. (2022). Transshipment and routing model for multi-product planning and distribution at a refreshment company in

Bogota, Colombia. *Journal of applied research and technology*, 20(4), 408-417. DOI: https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1330.
5. Keshavarz-Ghorabaee, Mehdi, Amiri, Maghsoud, Olfat, Laya, & Khatami, Firouzabadi, Ali. (2017). Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Technological and Economic Development of Economy*, 23, 520-548.
DOI: https://doi.org/10.3846/20294913.2017.1312630.
6. Ma, R., Yao, L., Jin, M., Ren, P., & Lv, Z. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*, 89, 195–202. DIOI: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028.
7. Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., & Nazarenko I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 29(1), 73-91.
8. Ruvalcaba Sandoval, D., Olivares-Benitez, E., Rojas, R., & Sosa-Gómez, G. (2021). Matheuristics for the Design of a Multi-Step, Multi-Product Supply Chain with Multimodal Transport. *Applied Science*, 11, 10251.
DOI https://doi.org/10.3390/app112110251.
9. Selsam, D., Lamm, M., Bunz, B., Liang, P., de Moura L., & Dill D.L. (2019). Learning a SAT solver from Single-Bit supervision. 7th International Conference on Learning Representations, ICLR May 6 – 9, 2019. New Orleans, USA.
10. Shaw, K., Irfan, M. Shankar, R. & Yadav, S.S. (2016). Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a benders decomposition based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 483–497.
11. Shelukhin, M., Kupriichuk, V., Kyrylko, N., Makedon, V., & Chupryna, N. (2021). Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*, 25(6), Available at: https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html (accessed January 09, 2024).
12. Tarvin, D.A., Wood, R.K., & Newman, A.M. (2016). Benders decomposition: Solving binary master problems by enumeration. *Operations Research Letters*, 44, 80–85.
Received 10.01.2024.
Accepted 15.01.2024.

Design of multi-product transport networks with discrete bus data flows

The article considers the importance of transport and communication as key sectors for the development of the economy of Ukraine, as well as the need to create applied mathematical software for the optimization of transport processes and the development of information and analytical systems. Special attention is paid to the development and study of multi-product communication networks with discrete flows of small

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

consignments, which have a significant impact on market transformations in Ukraine, especially in the field of transportation of small consignments. The study focuses on modern and future communication networks, which, as a rule, have a multi-level structure determined by the administrative division of the territory, management hierarchy and technologies for the processing and distribution of goods and information. The authors of the article emphasize the need to design multi-level communication networks, which would take into account the complexity of the system, as well as the impossibility of complete centralization of information processing and management in one link. The article also focuses on the analysis of existing research and publications in this field, paying attention to the contribution of foreign and domestic scientists to the development of models and methods of network resource management. Most research focuses on deterministic models and models based on the mathematical foundations of mass service theories and random Markov processes. The authors indicate the inadequacy of the existing mathematical tools for modeling and analyzing the functioning of multi-product networks with discrete flows, which requires the development of new mathematical models and methods.The purpose of the research is the development and analysis of effective approaches to the design of multi-tracks pipeline transport networks with a special focus on discrete trunk data flows. The authors note that this includes the development of new approaches and methods for effective management and optimization of resource allocation, as well as modeling the specifics of discrete flows in the context of trunk transport systems. An important part of the research is the creation of a hierarchical system structure for automated resource management and flow distribution in large-scale networks. The authors emphasize the need to develop a methodology that integrates already existing achievements in this field and allows to effectively solve practical problems related to long-term development, ongoing planning and operational management in large-scale networks. Such a methodology should include models of different levels of aggregation and be suitable for all levels of the network's hierarchical structure. The study also includes consideration of mathematical models and algorithms for modeling and analyzing the functioning of multi-product networks with discrete flows.

Keywords: artificial intelligence, cloud computing, neural networks, fuzzy sets, network parameters, input connections, combinatorial model, reference situations.

Кирилов Сергій Олександрович - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики, фізики та астрономії Одеського національного морського університету.

Kyrylov Serhii - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor of the Mathematics, Physics and Astronomy department Odessa National Maritime University.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-08
УДК 519.8

Л.С. Коряшкіна, Д.Є. Лубенець

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТКОВО-ДВОЕТАПНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗПОДІЛУ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ

Анотація. Розглянуто частково двоетапний процес розподілу матеріальних потоків у логістичній системі, елементами якої є підприємства, що виробляють певну продукцію і здійснюють її збут або безпосередньо споживачам, або через розподільчі центри. При цьому передбачається, що попит на продукцію неперервно розподілений по всій території деякого регіону. Мета роботи забезпечення зниження транспортних та організаційних витрат, пов'язаних із збутом та зберіганням готової продукції, для мережі виробничих підприємств шляхом розроблення моделей і методів оптимізаційних задач, які дозволять визначати кількість, місткість і координати розміщення розподільчих центрів і проводити організацію логістичних процесів, раціонально розподіляючи транспортні та матеріальні потоки між усіма учасниками логістичного процесу. Актуальність роботи обумовлена створенням територіально розподілених багаторівневих компаній, які здійснюють повний цикл виробництва від заготівлі сировини з його комплексним використанням, випуском продукції до транспортування кінцевим споживачам через розподільчі центри.

Математичне забезпечення сформульованих задач розміщення розподілу розроблено з використанням основних положень теорії неперервних задач оптимального розбиття множин, теорії двоїстості, методів лінійного програмування транспортного типу, сучасних алгоритмів недиференційованої оптимізації. Представлені моделі і алгоритми дозволяють вирішувати низку проблем стратегічного планування, що виникають у виробничій, соціальній та економічній сферах діяльності.

Ключові слова: багатоетапні логістичні процеси, зонування територій, математична модель, задачі розміщення розподілу, системний аналіз, оптимізація.

Постановка проблеми. У сучасному світі ключову роль у забезпеченні ефективності та сталого розвитку різноманітних галузей відіграє логістика, яка визначається як діяльність з наскрізного управління матеріальними потоками, що включає управління процесом доведення потоку до виробництва, проходження потоку всередині виробництва, доведення готової продукції до споживача, як на трьох зазначених ділянках, так і усередині кожної з них. Останній

© Коряшкіна Л.С., Лубенець Д.Є., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

етап, причому не у відриві, а в глибокому системному взаємозв'язку з попередніми етапами, є предметом вивчення розподільчої логістики. Задачі оптимізації багатоетапних розподільчих процесів складають нині актуальний напрямок наукових досліджень в цій сфері, оскільки включають в себе комплексні процеси розподілу та розміщення ресурсів.

Розподільча логістика охоплює планування, контроль та управління транспортуванням, складуванням та іншими матеріальними та нематеріальними операціями, що здійснюються в процесі доведення готової продукції до споживача у відповідності з інтересами та вимогами останнього, а також передачі, зберігання та обробки відповідної інформації. Принципова відмінність розподільчої логістики від збуту та продажу полягає в системному взаємозв'язку розподільчих процесів з виробничими та закупівельними (у сенсі управління матеріальними потоками), системний взаємозв'язок усіх функцій усередині самого розподілу.

Склад задач розподільчої логістики на мікро- та макрорівнях різний. На рівні підприємства, тобто на мікрорівні, логістика ставить і вирішує конкретні завдання: планування процесу реалізації; організація отримання та обробки замовлення; вибір виду упаковки, організація виконання інших операцій, що безпосередньо передують відвантаженню; організація відвантаження продукції; доставка та контроль транспортування інше.

На макрорівні розподільча логістика вирішує питання про: вибір схеми розподілу матеріального потоку; визначення оптимальної кількості розподільчих центрів (складів) на території, що обслуговується; визначення оптимального місця розташування розподільчого центру (складу), ряд інших завдань, пов'язаних з управлінням процесом проходження матеріального потоку по території району, області, країни. Саме розв’язанню задач пошуку схеми оптимального розподілу продукції на шляху від виробника до споживача та ефективної організації транспортних перевезень між учасниками цього процесу присвячена дана робота.

Об'єкт дослідження – частково-двоетапний розподіл матеріальних потоків на стадії реалізації готової продукції.

Предмет дослідження – моделі та методи оптимального розміщення структурних елементів логістичних систем з частково-двоетапним розподілом матеріальних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наведемо огляд декількох наукових публікацій, який демонструє різноманітність підходів та методів, що

застосовуються для розв'язання багатоетапних задач логістики. Від дискретних до неперервних моделей, від стохастичного програмування до динамічних підходів, ці дослідження вносять важливий внесок у розуміння та оптимізацію складних логістичних процесів.

В роботі [1] автори акцентують увагу на різних аспектах моделювання багатоетапних задач розміщення, включаючи вплив географічного положення, інфраструктури, доступності робочої сили та інших факторів на ефективність виробництва. Окремо зазначено проблему розмірності, що виникає при розв’язанні задач у дискретній постановці, коли кількість об’єктів, що розміщуються, є великою.

У дослідженні [2] розроблено математичний апарат для двоетапних задач оптимального розподілу множин з додатковими обмеженнями. Автори пропонують ітеративний алгоритм для розв'язання сформульованої задачі, що базується на використанні модифікації алгоритму Шора та методу потенціалів для розв'язання транспортної задачі.

В статті [3] розглядається багатоетапна стохастична задача, яка інтегрує невизначеність розвитку хвороби та розподіл ресурсів для контролю за спалахом інфекційної хвороби. Модель оптимізує розподіл центрів лікування та ресурсів, мінімізуючи загальну очікувану кількість нових інфікованих, враховуючи при цьому справедливість розподілу ресурсів.

Дослідження [4] пропонує багатоетапну, багатоперіодичну модель зворотної логістики з рішеннями щодо розмірів партій. Основні невизначені фактори включають кількість та якість повернень, попит. Використання методу моментів для генерації дискретного набору сценаріїв дозволяє представити оригінальний неперервний розподіл стохастичних параметрів.

Динамічний підхід щодо розміщення міських розподільчих центрів розглядається в роботі [5]. Автори пропонують метод, який перетворює багатоетапну динамічну задачу розміщення на задачу найкоротшого шляху в теорії графів, що дозволяє знайти оптимальну послідовність динамічного розміщення з найнижчою сукупною вартістю за весь планувальний період.

У роботі [6] проведено систематичний огляд літератури з управління операціями в сфері розумної логістики. Автори визначають прогалини в дослідженнях та пропонують напрями майбутніх досліджень у цій галузі.

Аналіз різних методів розв'язання задач багатоетапної оптимізації під невизначеністю проведено у статті [7]. Автори намагаються інтегрувати методи

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

в єдине ціле, що дозволяє більш комплексно підходити до прийняття послідовних рішень в умовах невизначеності.

Дана робота присвячена моделюванню частково-двоетапного розподілу матеріальних ресурсів в дворівневих логістичних системах. На відміну від задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками, які розроблено для час опису двоетапних евакуаційних процесів і представлено в роботі [8], тут розглядається процес розподілу матеріальних потоків у системі, структурними елементами якої є виробничі підприємства, які можуть збувати свою продукцію або безпосередньо, або через свої розподільчі центри (РЦ), оптимальна кількість і місткість яких має бути оцінена у процесі аналізу попиту на продукцію і вподобання щодо вибору способу його задоволення (безпосередньо від виробника або через РЦ) споживачів, які мешкають у певному регіоні.

Мета дослідження. Зниження транспортних та організаційних витрат, пов'язаних із збутом та зберіганням готової продукції, для мережі виробничих підприємств шляхом розроблення моделей і методів оптимізаційних задач, які дозволять визначати кількість, місткість і координати розміщення розподільчих центрів і проводити організацію логістичних процесів, раціонально розподіляючи транспортні та матеріальні потоки.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо мережу виробничих підприємств, які випускають один і той самий продукт, попит на який неперервно розподілений на заданій території . Частина споживачів має можливість і віддає перевагу закупати продукт безпосередньо у виробника, решта користується послугами найближчого розподільчого центру. Задача полягає в розміщенні певної кількості розподільчих центрів на території регіону і визначенні матеріальних потоків в ланцюжках типу «виробник – споживач» та «виробник – розподільчий центр – споживач» так, аби мінімізувати загальні транспортні і виробничі витрати усіх учасників розподільчого процесу.

Відповідно до термінології, прийнятої в логістиці щодо визначення рівня каналів розподілу в ланцюжках поставок, будемо називати виробників центрами нульового рівня, а розподільчі центри – центрами першого рівня.

Для побудови математичної моделі будемо використовувати такі позначення: Ω – територія регіону, задана географічними координатами границь; $\hat{\Omega} \subseteq \Omega$ – територія, де можуть бути розміщені центри першого рівня; $\rho(x)$ – функція, що описує попит на продукцію в точці x множини Ω (визначається шляхом маркетингових досліджень населенню), один./м^2; $\mu(x)$ – безрозмірна функція, яка приймає значення від 0 до 1 і задає частку населення, яка

задовольняє свої потреби у продукції, закуповуючи її у виробника і самостійно транспортуючи; N – кількість центрів першого рівня; M – кількість центрів нульового рівня; S – загальний попит на продукцію на заданій території Ω, од.; $\tau_i^r = (\tau_i^{(1)r}, \tau_i^{(2)r})$ – координати i-го центру r-го рівня; b_i^r – потужність\місткість i-го центру r-го рівня, $r = 0, I$, од.; $c_i^I(x, \tau_i^I)$ – вартість транспортування продукції від i-го центру I-го рівня до точки $x \in \Omega$, грн./од.; $c_{ij}^0(x, \tau_j^0)$ – транспортні витрати на доставку продукції від центру τ_j^0 в точку $x \in \Omega_i$, де Ω_i – територія, яка охоплює найближчих до τ_i^I споживачів; $c_{ij}\,(\tau_i^I, \tau_j^{II})$ – вартість перевезення продукції від центру τ_j^0 до центру τ_i^I, грн./од.; a_i^I – вартість зберігання продукції на складах центру τ_i^I, розрахована на одну одиницю попиту, грн/од.; Ω_i – зона відповідальності центру τ_i^I; Ω_{ij} – територія, закріплена за центром τ_i^I, з якої споживачі можуть задовольняти свій попит безпосередньо за рахунок центру τ_j^0, так що $\cup_{j=1}^M \Omega_{ij} = \Omega,\ mes(\Omega_{is} \cap \Omega_{ij}) = 0,\ \ s \neq j,\ s, j = \overline{1, M};\ \ \ \nu_{ij},\ \ \ i = \overline{1, N};\ j = \overline{1, M}$ – кількість продукції, яка транспортується від τ_j^0 до τ_i^I, од.

Задля оцінки місткості центрів першого рівня τ_i^I потрібно визначити зону їх обслуговування Ω_i, , $i = 1,2, \dots, N$, які складають розбиття Ω і, у свою чергу, розбиваються на зони $\Omega_{i1}, \Omega_{i2}, \dots, \Omega_{iM}$, з яких деякі споживачі самостійно закуповують продукцію у відповідних центрах $\tau_1^0, \tau_2^0, \dots, \tau_M^0$.

Нехай Σ_Ω^N – клас всіх можливих розбиттів $\bar{\omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N\}$ множини Ω на N підмножин, а для кожного $i = 1,2, \dots, N$ клас $\Sigma_{\Omega_i}^M$ – клас всіх можливих розбиттів множини Ω_i на M підмножин:

$$\Sigma_{\Omega_i}^M = \left\{\bar{\varsigma}_i = \{\Omega_{i1}, \dots, \Omega_{iM}\}: \cup_{j=1}^M \Omega_{ij} = \Omega_i,\ mes(\Omega_{is} \cap \Omega_{ij}) = 0,\ \ \ s \neq j,\ s, j = \overline{1, M}\right\}$$

Тоді

$$\Sigma_\Omega^{NM} = \left\{\bar{\varsigma} = \{\bar{\varsigma}_1, \dots, \bar{\varsigma}_N\}: \bar{\varsigma}_i \in \Sigma_{\Omega_i}^M, i = \overline{1, N},\ \cup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega,\ mes(\Omega_i \cap \Omega_q) = 0,\ i \neq q;\ i, q = \overline{1, N}\right\}$$

визначає клас всіх можливих розбиттів Ω на NM підмножин.

Задача: потрібно знайти таке розбиття $\bar{\varsigma} = \{\bar{\varsigma}_1, \bar{\varsigma}_2, \dots, \bar{\varsigma}_N\}$ множини Ω на NM підмножин і визначити такі $\tau^I = (\tau_1^I, \dots, \tau_N^I)$, $\nu = \{\nu_{11}, \dots, \nu_{ij}, \dots, \nu_{NM}\}$ та $V_Num = \{V_Num_{ijk}\}$, $i = \overline{1, N}, i = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$, за яких

$$F(\bar{\varsigma}, \tau^I, \nu, V_Num) \to min, \tag{1}$$

$$F(\bar{\varsigma}, \tau^I, \nu, V_{Num}) = \beta_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \int_{\Omega_{ij}} (c_i^I(x, \tau_i^I) + a_i^I)\left(1 - \mu(x)\right)\rho(x)dx +$$

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

$$+\beta_2 \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M} c_{ij}^0(\tau_i^I,\tau_j^0)\nu_{ij} + \beta_3 \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\int_{\Omega_{ij}}(c_{ij}^0(x,\tau_j^0)+a_j^0)\,\mu(x)\rho(x)dx,$$

і виконуються обмеження

$$\int_{\Omega_i}\big(1-\mu(x)\big)\rho(x)dx = \sum_{j=1}^{M}\nu_{ij}, \quad i=\overline{1,N}, \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\int_{\Omega_{ij}}\mu(x)\rho(x)dx + \nu_{ij} = b_j^0, \quad j=\overline{1,M}, \tag{3}$$

$$\bar{\varsigma}\in\Sigma_{\Omega}^{NM},\ \nu\in R_{NM}^{+},\ \tau^I\in\hat{\Omega}^N, \tag{4}$$

де $\beta_1,\ \beta_2,\ \beta_3 \geq 0,\ \beta_1^2+\beta_2^2+\beta_3^2\neq 0$ – задані коефіцієнти, які визначають пріоритет доданків; Σ_{Ω}^{NM} – клас всіх можливих розбиттів множини Ω на NM підмножин; $\bar{\varsigma}$ – елемент класу Σ_{Ω}^{NM}; R_{NM}^{+}– NM-вимірний простір невід'ємних дійсних чисел.

В функціоналі перший і третій доданки враховують витрати на транспортування безпосередньо до споживачів, відвантаження та зберігання продукції для центрів τ_i^I та τ_j^0 відповідно; другий доданок описує транспортні витрати, пов'язані з доставкою продукції від τ_j^0 до τ_i^I. Умови (2) і (3) означають, що весь попит має бути задоволений у повному обсязі; (4) – умови допустимості шуканих величин.

Початкова інформація про структуру логістичної системи і попит на продукцію обумовлює різні варіанти задачі (1) – (4), наприклад: з фіксованими центрами першого рівня, з обмеженнями на їх потужності і без таких умов. Можна припустити, що РЦ взагалі непотрібні. Тоді моделлю буде звичайна неперервна задача оптимального розбиття множин [10].

Задача (1) – (4) передбачає необов'язкове використання проміжних центрів в багатоетапній транспортно-логістичній мережі, а тому є розширенням класу неперервних задач оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками [2].

Виокремимо випадок задачі (1) - (4), коли можна здійснити декомпозицію задачі, тобто розбити її на декілька послідовних задач. Така ситуація можлива за припущення про те, що споживач, який безпосередньо закуповує товар у виробника, надає перевагу тому з них, який забезпечує мінімальні витрати на транспортування і відвантаження. Тоді задача може бути розв'язана у 2 етапи:

1. Вся територія розбивається на M зон, кожна з яких закріплюється за центром 0-го рівня. З них здійснюється транспортування продукції власно споживачами. Відповідно до оптимального розбиття території обчислюються потоки, які виходять з центрів 0-го рівня. Звісно, їх обсяги не можуть перевищувати потужність центрів.

2. Визначається кількість ресурсу, який може бути додатково прийнятий центром першого рівня, знаходимо місця їх розташування (якщо вони невідомі заздалегідь) і розбиваємо територію на N зон для збору продукту в центрах першого рівня і подальшого розподілу і відправки до споживачів.

Запишемо математичні постановки вказаних задач.

Задача 1. Знайти таке розбиття $\bar{w}_* = \{\bar{\Omega}_{*1}, \bar{\Omega}_{*2}, \dots, \bar{\Omega}_{*M}\}$ множини Ω на M підмножин, за яких

$$F_1(\bar{w}) \to min,$$

$$F_1(\bar{w}) = \sum_{j=1}^{M} \int_{\bar{\Omega}_j} c_j^0\left(x, \tau_j^0\right) \mu(x)\rho(x)dx;$$

$$\int_{\bar{\Omega}_j} \mu(x)\rho(x)dx \le b_j^0, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\bar{w} \in \Sigma_\Omega^M.$$

За оптимальним розв'язком задачі 1 розраховуємо невикористану потужність центрів 2-го рівня:

$$\hat{b}_j^0 = b_j^0 - \int_{\bar{\Omega}_{*j}} \mu(x)\rho(x)dx, \quad j = \overline{1, M},$$

і формулюємо наступну задачу.

Задача 2. Потрібно визначити такі $\tau_1^I, \dots, \tau_N^I$, знайти таке розбиття $\bar{\omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N\}$ множини Ω на N підмножин і величини $\nu = \{\nu_{11}, \dots, \nu_{ij}, \dots, \nu_{NM}\}$, $i = \overline{1, N}, i = \overline{1, N}$, за яких

$$F_2(\bar{\omega}, \tau^I, \nu) \to min,$$

$$F_2(\bar{\omega}, \tau^I, \nu) = \beta_1 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_{\Omega_i} (c_i^I(x, \tau_i) + a_i^I)\left(1 - \mu(x)\right)\rho(x)dx +$$

$$+\beta_2 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} c_{ij}^0\left(\tau_i^I, \tau_j^0\right) \cdot \nu_{ij};$$

$$\int_{\Omega_i}\left(1 - \mu(x)\right)\rho(x)dx = \sum_{j=1}^{M} \nu_{ij}, \quad i = \overline{1, N},$$

$$\sum_{i=1}^{N} \nu_{ij} = \hat{b}_j^0, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\bar{\omega} \in \Sigma_\Omega^N, \quad \nu \in R_{NM}^+, \quad \tau^I \in \hat{\Omega}^N.$$

Необхідними і достатніми умовами розв'язності вихідної задачі, а також задач 1 і 2, є наступне співвідношення:

$$\int_\Omega \rho(x)dx = \sum_{j=1}^{M} b_j^{II}.$$

Якщо умова не виконується, то, можна ввести або фіктивний центр 0-го рівня, або розширити множину, що розбивається, до певної зваженої площі, за аналогією переходу від відкритої до закритої моделі транспортної задачі.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Задача 1 є класичною неперервною задачею оптимального розбиття множин з обмеженнями на потужності центрів, для її розв'язання використовуємо відповідний метод з [10]. Математичне забезпечення двоетапних задач розміщення-розподілу типу задачі 2 розроблено з використанням основних положень теорії неперервних лінійних задач оптимального розбиття множин, теорії двоїстості, а також методів розв'язання задач лінійного програмування транспортного типу. В роботі [2] показано, що формулювання багатоетапної транспортно-логістичної задачі у вигляді задачі нескінченновимірної оптимізації доцільно, коли кількість споживачів дуже велика. Застосування розробленого у вищезазначеній роботі математичного апарату дає можливість знайти оптимальний розв'язок двоетапної задачі розміщення-розподілу в аналітичному вигляді, який містить параметри, що є розв'язком допоміжної оптимізаційної задачі з негладкою цільовою функцією декількох змінних. Ітераційний алгоритм розв'язання задачі 2 розроблено на основі інтеграції r-алгоритму Н.З. Шора та методу потенціалів.

Алгоритми розв'язання вихідної задачі за умови можливості її декомпозиції програмно реалізовані в середовищі Visual Studio 2022 на мові C#. Продемонструємо роботу алгоритмів на модельних задачах.

Підготовчий етап обробки електронних карт полягає у видаленні з карти місць, що не належать території регіону за допомогою графічного редактора. Далі вводиться прямокутна система координат, обравши початок відліку і масштабну одиницю так, аби регіон, що розглядається, повністю містився в прямокутнику $\Pi = \{(x_1, x_2):\ 0 \le x_1 \le 12;\ 0 \le x_2 \le 12\}$. Область Ω, яка має бути поділена на зони відповідальності центрів першого рівня, на всіх рисунках далі виділена яскравими кольорами.

Чисельна реалізація алгоритмів передбачає дискретизацію заданої області. Для обчислення кратних інтегралів застосовується кубатурна формула трапецій. Обчислювальні експерименти були проведені за наступних значень похибки та параметрів *r*(α)-алгоритму: $\alpha = 3,\ \varepsilon = 0.0001$.

В усіх наведених нижче модельних прикладах вважається, що центри обох рівнів задані; сумарні потужності підприємств нульового рівня становлять одну умовну одиницю; сумарний попит на території, що розглядається, також дорівнює 1 ум. од. Для обчислення функцій $c_i^I(x, \tau_i)$ та $c_{ij}^0(\tau_i, \tau_j)$ використовується метрика Мінковського $c(x, y) = ((x_1 - y_1)^p + (x_2 - y_2)^p)^{1/p}$ з конкретним параметром p. Функція $\rho(x) = 1$, $\mu(x) = 1/3$ для всіх точок області

Ω, що означає рівномірний попит на продукцію і переваги (можливості) споживачів щодо способу його задоволення, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_2 = 0.5$.

Модельна задача 1.

Вихідні дані: $N = 5,\ M = 4;$ τ_1^I= (6.336; 3.234), τ_2^I = (7.634; 3.124), τ_3^I = (9.482; 3.806), τ_4^I = (9.394; 4.928), τ_5^I = (8.404; 4.466); τ_1^0= (2.681; 3.432), τ_2^0= (1.672; 5.676), τ_3^0 = (5.556; 5.302), τ_4^0 = (10.12; 4.224); b^0 = (0.281; 0.082; 0.407; 0.228).

Для функцій $c_i^I(x, \tau_i)$ та $c_{ij}^0(\tau_i, \tau_j)$ параметр метрики Мінковського $p = 1$ та $p = 2$ відповідно, $a_i^I = 0,\ i = \overline{1,5};\ a_j^0 = 0,\ j = \overline{1,4};$

На рис. 1 представлено оптимальне розбиття території Ω. При цьому праворуч зазначено відповідність кольору зони центрів [i, j] = (τ_i^I, τ_j^0), що її обслуговують. А саме, та частина населення, яка воліє закуповувати самостійно продукції у виробника, користується послугами центру τ_j^0. Перший індекс i у позначці означає, що споживачі зони відповідного кольору скористаються послугами розподільчого центру τ_i^I.

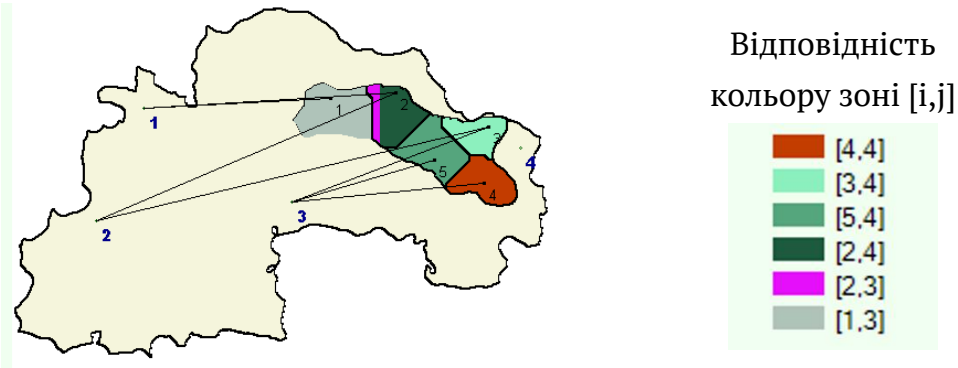


Рисунок 1 – Оптимальне розбиття території та схема перевозок ресурсу між центрами першого та нульового рівнів у задачі модельній задачі 1

Значення цільового функціоналу 7.48703. Умовна кількість проданого продукту центрами першого рівня при цьому склала з точністю 0.001: b^I = (0.173; 0.133; 0.092; 0.118; 0.148). На рис.1 також зазначені істотні зв'язки між центрами нульового та першого рівнів. Кількісна величина продукту, що прямує від центрів нульового рівня до центрів першого рівня отримана наступна: $\nu_{11} = 0.1731, \nu_{21} = 0.1045,$
$\nu_{22} = 0.029,\ \nu_{32} = 0.056,\ \nu_{33} = 0.036,\ \nu_{43} = 0.118,\ \nu_{55} = 0.1486,$ решта $\nu_{ij} = 0$. Про коректність роботи алгоритмів свідчить сума цих величин, яка дорівнює 0.667 (дві третини від усього попиту, розподіленого на території).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Модельна задача 2.

Вихідні дані: $N = 4,\ M = 7$; τ_1^I= (5.918; 3.718), τ_2^I = (9.46; 3.85, τ_3^I = (8.646; 4.818), τ_4^I = (7.942; 2.508); τ_1^0= (5.83; 1.936), τ_2^0= (2.618; 3.586), τ_3^0 = (4.312; 2.684), τ_4^0 = (10.01; 4.356), τ_5^0 = (9.284; 6.292), τ_6^0 = (6.864; 4.95), τ_7^0 = (4.334; 5.478); b^0 = (0.086; 0.249; 0.201; 0.112; 0.055; 0.077; 0.217). Для функцій $c_i^I(x, \tau_i)$ та $c_{ij}^0(\tau_i, \tau_j)$ параметр метрики Мінковського $p = 1$ та $p = 1$ відповідно, $a_i^I = 0,\ i = \overline{1,4};\ a_j^0 = 0,\ j = \overline{1,7}$.

На рис. 2 представлено оптимальне розбиття території Ω і вказано зв'язки центрів першого та нульового етапів. Умовна кількість вивезеного продукту з центрів першого рівня при цьому склала з точністю 0.001: b^I = (0.206; 0.145; 0.203; 0.11). Значення цільового функціоналу 9.44497. Кількісні величини істотних зв'язків між центрами нульового та першого рівнів отримані такими: $v_{12} = 0.0851, v_{13} = 0.1215,$
$v_{25} = 0.0339, v_{22} = 0.1117, v_{37} = 0.176, v_{35} = 0.0278, v_{41} = 0.0669, v_{43} = 0.0439,$ решта $v_{ij} = 0$.

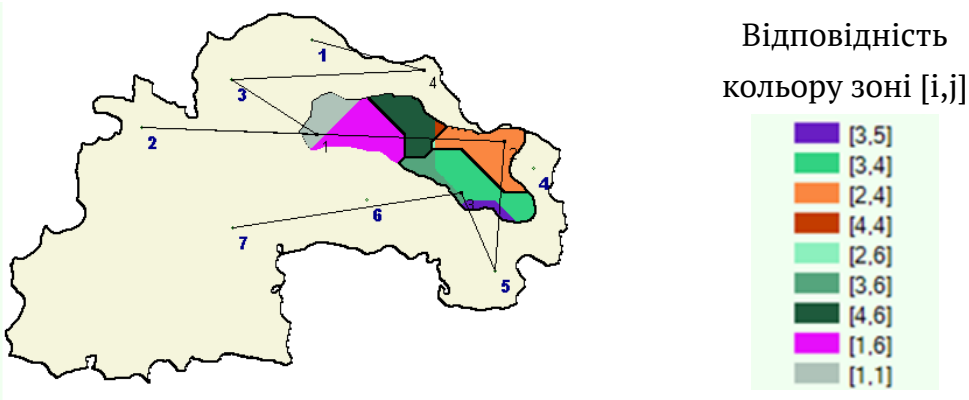


Рисунок 2 – Оптимальне розбиття території і схема перевозок ресурсу між центрами першого та нульового етапів модельній задачі 2

Задача 3.

Вихідні дані: $N = 3,\ M = 6$; τ_1^I= (7.392; 3.124), τ_2^I = (7.766; 4.18, τ_3^I = (9.438; 3.938); τ_1^0= (5.852; 1.738), τ_2^0= (4.444; 3.102), τ_3^0 = (2.948; 4.62), τ_4^0 = (10.23; 5.698), τ_5^0 = (8.844; 6.67), τ_6^0 = (6.006; 5.412); b^0 = (0.211; 0.058; 0.127; 0.176; 0.238; 0.188); $p = 2$ та $p = 1$ відповідно для $c_i^I(x, \tau_i)$ та $c_{ij}^0(\tau_i, \tau_j)$, $a_i^I = 0,\ i = \overline{1,3};\ a_j^0 = 0,\ j = \overline{1,6}$.

На рис. 3 представлено оптимальне розбиття території Ω і вказано зв'язки центрів першого та нульового етапів; решта отриманих величин: b^I = (0.225;

0.208; 0.232); значення цільового функціоналу 15.28643; $v_{11} = 0.1434, v_{12} = 0.0438,$
$v_{13} = 0.0379, v_{23} = 0.0892, v_{34} = 0.028, v_{25} = 0.0242, v_{35} = 0.2048,, v_{26} = 0.0955,$
інші $v_{ij} = 0$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Представлена математична модель частково-двоетапного процесу розподілу матеріальних потоків у транспортно-логістичній системі, структурними елементами якої є виробничі підприємства, що здійснюють виробництво одного й того самого продукту і реалізують його або безпосередньо, або через розподільчі центри. При цьому передбачається, що попит на продукції розподілений неперервно на деякій території.

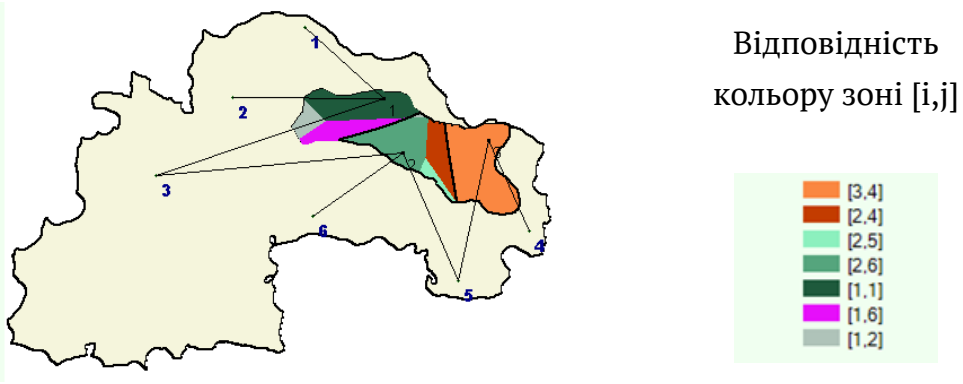


Рисунок 3 – Оптимальне розбиття території і схема перевозок продукту між центрами першого та нульового етапів модельній задачі 3

Реалізовано метод розв’язання окремого випадку побудованої моделі, коли вона зводиться до двох послідовних оптимізаційних задач: класичної неперервної задачі оптимального розбиття множин з обмеженнями і двоетапної задачі розміщення розподілу. Реалізація моделі забезпечує зниження транспортних та організаційних витрат на збут та зберігання готової продукції на всіх етапах логістичного процесу, дозволяють вирішувати низку проблем стратегічного планування у виробничій, соціальній та економічній сферах діяльності.

Подальші дослідження пов’язані з розробкою і теоретичним обґрунтуванням методу розв’язання сформульованої задачі з розміщенням центрів, і розробка програмного забезпечення вирішення таких завдань із залученням ГІС-технологій.

Роботу виконано у рамках державної бюджетної тематики за номером 0123U100011.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ЛІТЕРАТУРА

1. Сергєєв, О., Ус, С. (2023). Аналіз сучасних підходів до розв'язання дискретних та неперервних багатоетапних задач розміщення. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2, 59–70, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-7

2. Us, S. A., Koriashkina, L. S., & Stanina, O. D. (2019). An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 256–271. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24

3. Yin, X., Büyüktahtakın, İ.E. (2021). A multi-stage stochastic programming approach to epidemic resource allocation with equity considerations. *Health Care Manag Sci*, 24, 597–622. https://doi.org/10.1007/s10729-021-09559-z

4. Azizi, V., Hu, G.A. (2021). Multi-Stage Stochastic Programming Model for the Multi-Echelon Multi-Period Reverse Logistics Problem. *Sustainability*, 13. https://doi.org/10.3390/su132413596

5. Yan, L., Grifoll, M., Feng, H., Zheng, P., Zhou, C. (2022). Optimization of Urban Distribution Centres: A Multi-Stage Dynamic Location Approach. *Sustainability*,14, 4135. https://doi.org/10.3390/su14074135

6. Feng, B., Ye, Q. (2021). Operations management of smart logistics: A literature review and future research. *Front. Eng. Manag.*, 8, 344–355. https://doi.org/10.1007/s42524-021-0156-2

7. Bakker, H., Dunke, F., Nickel, S. (2020). A structuring review on multi-stage optimization under uncertainty: Aligning concepts from theory and practice. *Omega*, Vol. 96. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.06.006

8. Дзюба, С., Коряшкіна, Л., Станіна, О., Лубенець, Д. (2023). Математичні моделі оптимізаційних задач частково-двоетапної евакуації населення із зонуванням постраждалої території. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 13–21, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2.

9. Koriashkina, L., Us, S., Odnovol, M., Stanina, O., Dziuba, S. (2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 1.

10. Kiseleva, E.M., Koriashkina, L.S. (2015). Theory of continuous optimal set partitioning problems as a universal mathematical formalism for constructing Voronoi diagrams and their generalizations. II. Algorithms for constructing Voronoi diagrams

based on the theory of optimal set partitioning. *Cybernetics and Systems Analysis*, 51(4), 489-499. https://doi.org/10.1007/s10559-015-9740-y

REFERENCES

1. Serhieiev, O., Us, S. (2023). Analysis of modern approaches to solving discrete and continuous multi-stage allocation problems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 59–70, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-7.

2. Us, S. A., Koriashkina, L. S., Stanina, O. D. (2019). An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 256–271, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24

3. Yin, X. A multi-stage stochastic programming approach to epidemic resource allocation with equity considerations / Yin, X., Büyüktahtakın, İ.E. // Health Care Manag Sci, 2021, 24, 597–622, https://doi.org/10.1007/s10729-021-09559-z

4. Azizi, V., Hu, G.A. (2021). Multi-Stage Stochastic Programming Model for the Multi-Echelon Multi-Period Reverse Logistics Problem. *Sustainability*, 13, https://doi.org/10.3390/su132413596

5. Yan, L., Grifoll, M., Feng, H., Zheng, P., Zhou, C. (2022). Optimization of Urban Distribution Centres: A Multi-Stage Dynamic Location Approach. *Sustainability*,14, 4135, https://doi.org/10.3390/su14074135

6. Feng, B., Ye, Q. (2021). Operations management of smart logistics: A literature review and future research. *Front. Eng. Manag.*, 8, 344–355, https://doi.org/10.1007/s42524-021-0156-2

7. Bakker, H., Dunke, F., Nickel, S. (2020). A structuring review on multi-stage optimization under uncertainty: Aligning concepts from theory and practice. *Omega*, 96, https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.06.006

8. Dziuba, S., Koriashkina, L., Stanina, O., Lubenets, D. (2023). Mathematical models of optimization problems of partially two-stage population evacuation with territory segmentation. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 13–21, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2

9. Koriashkina, L., Us, S., Odnovol, M., Stanina, O., Dziuba, S. (2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 1.

10. Kiseleva, E.M., Koriashkina, L.S. (2015). Theory of continuous optimal set partitioning problems as a universal mathematical formalism for constructing Voronoi diagrams and their generalizations. II. Algorithms for constructing Voronoi diagrams

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

based on the theory of optimal set partitioning. *Cybernetics and Systems Analysis*, 51(4), 489-499. https://doi.org/10.1007/s10559-015-9740-y

Received 10.01.2024.
Accepted 15.01.2024.

Systems analysis and mathematical modeling of partially two-stage processes of material flow distribution

The partially two-stage process of material flow distribution in a logistics system is considered, which consists of enterprises that produce certain products and sell them directly to consumers or through distribution centers. It is assumed that the demand for products is continuously distributed throughout the territory of a certain region. The purpose of the work is to reduce transportation and organizational costs associated with the sale and storage of finished products for a network of production enterprises by developing models and methods of optimization tasks that allow determining the quantity, capacity, and coordinates of distribution centers and organizing logistics processes, rationally distributing transportation and material flows among all participants in the logistics process. The relevance of the work is due to the creation of territorially distributed multilevel companies that carry out the entire production cycle from raw material procurement with its comprehensive use, production of products to transportation to end consumers through distribution centers. The mathematical support of the formulated placement-distribution tasks is developed using the basic provisions of the theory of continuous problems of optimal subset division with the placement of subset centers, duality theory, linear programming methods of the transport type, modern algorithms of non-differentiable optimization. The presented models and algorithms allow solving a whole range of strategic planning problems that arise in the production, social, and economic spheres of activity.

Key words: multi-stage logistics processes, area zoning, mathematical model, location-allocation problems, system analysis, optimization.

Коряшкіна Лариса Сергіївна – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Лубенець Данило Євгенович – аспірант кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Koriashkina Larysa Sergiyivna – Candidate of Physics and Mathematics Science, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

Lubenets Danylo Yevgenovych – Graduate Student of Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-09
UDC 004.77; 658.7

N.O. Matveeva, A.M. Papanov

DEVELOPMENT OF A CYBERPHYSICAL SYSTEM FOR MONITORING FIRE SAFETY

Abstract. The Megamart company's cyber physical fire safety system was developed with the possibility of flexible changing types and sets of functions performed by reprogramming. system uses RFID technology with the development of a computer network. The computer system allows for the system's technical and software modernization, as well as ensures the fulfillment of all functions of the technical assignment. The system was validated using a model of the corporate network scheme using the program Cisco Packet Tracer program.
Keywords: cyber physical system, RFID technology, IoT.

Introduction. Cyber-physical monitoring systems are used in many areas of life. From simple indoor temperature control systems to complex and multi-component systems. As these systems become more complex and the number of functions they perform increases, the management process becomes more and more complex. Also, the costs of maintenance of service personnel, repairs and maintenance are increasing rapidly. However, there are many automation tools that control some types of systems, such as heating, ventilation, microclimate support, lighting, fire alarm, smoke filtration, entry/exit control, but the management and maintenance of all these systems requires the presence of appropriate personnel.

Using a cyber-physical system for monitoring office premises is a new type of service. The principle of the cyber-physical system for monitoring provides a completely new approach to the organization of workplaces and the security of office premises, stores and hypermarkets, in which the efficiency of operation and reliability of management of all subsystems increases due to the combination of software and hardware.

A cyber-physical system (CFS) is a mechanism controlled or monitored by computer algorithms and closely related to the Internet and its users [2]. The components of the CFS interact at different temporal and spatial levels and may have different, different from each other, behavior models. They interact with each other in

© Matveeva N.O., Papanov A.M., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

different ways that can vary depending on the context. CFCs are somewhat similar in architecture to the Internet of Things (IoT), but they have a higher level of interconnection between physical and computer components.

Task definition. The aim of this article is the process of developing a cyber-physical system of fire safety the company Megamart based on RFID technology with the construction of a computer network.

Main part. The fire protection system is a complex set of technical and organizational measures aimed at preventing dangerous fire situations and limiting material damage. It includes various components such as automatic fire extinguishing systems, warning and evacuation systems, water supply systems, etc. The Internet of Things (IoT) refers to a system of interconnected objects that could collect and transmit data over a wireless network without the need for human intervention.

The firefighting equipment industry is being revolutionized by Internet of Things technology. By connecting to a wide-coverage LPWA network or even a cellular network, IoT for fire safety provides the opportunity to improve preventative measures and speed up fire response.

Networks that combine various IoT technologies can be installed anywhere on the scene of a fire to share and transmit data to protect the firefighting team. Often, IoT integrates with existing alarm systems, personal safety equipment, and firefighting equipment with minimal changes to simplify the fire department's modernization process.

Lightweight RFID trackers capable of determining the location of team members at any time. They can be easily integrated into any combination for permanent communication with a centralized network. By monitoring the location of each team member in real-time and combining them with thermal imaging, commanders can begin to create a detailed location map and provide precise guidance on operations. RFID, or radio frequency identification, is a technology that uses a wireless method to read the unique identification numbers of objects or people using radio waves.

The basic principle of operation is that the reader sends out a radio wave that is received by one tag. The tag receives energy and responds with a signal of the same frequency, modulating it according to the information stored in its memory. The reader receives this signal, recovers the information and identifies the tag. A higher-level identity system then verifies this data and guides further actions. This system is attractive because it allows contactless interaction between the reader and RFID tags without limiting the position of the object with the tag. The operating range of the RFID system is divided into several types: short-range identification (reading at

a distance of up to 20 cm), medium-range identification (from 20 cm to 5 m) and long-range identification (from 5 m to 100 m).

The use of RFID systems is especially relevant for companies engaged in the production, supply and sale of various goods. [11].

The main hardware components of this system are:

1. RFID reader (scanner) - a device for receiving data from the corresponding tags or cards;

2. RFID-tag (card) - an information carrier with a unique identifier of the employee;

3. Wi-Fi router - required to transfer data from the scanner to the database server;

4. Database server - used to store and process employee authorization data.

In accordance with the technical requirements, the address space 10.22.185.0/21 was used to implement the fire safety system of the Megamart company. Address block 10.0.9.0/24 was used to address channels between routers. The IoT device network is configured in the address space 209.165.200.0/24.

The cyber-physical system fire safety of the company Megamart uses the EIGRP dynamic routing protocol according to technical requirements. This protocol is distance-vectored and uses an autonomous system numbered 9.

During the configuration of routing on the routers of this cyber-physical system, the bandwidth of 128 Kb/s, the cost metric of 7500 and the channel speed of 128000 are set on the serial interfaces, in accordance with the technical requirements.

To ensure network functionality, secure remote access to active network devices, interaction between nodes from different VLANs, and automatic IP address assignment using the DHCP protocol are also tested.

Internet of Things objects facilitate interaction between systems, people, and services to develop computationally intensive autonomous applications. The computer network of the fire protection system for the Megamart office uses IoT cloud computing technologies.

A fire sensor detects a flame by checking the property and detecting if the value of the IR property is within the range in which the sensor looks at the fire and emits a digital signal.

The first step is to select a network gateway for the system - the DLC100 (Home Gateway) router, which supports the IoT server.

The second step is to select and connect IoT devices. "Smart" fire safety items for the Megamart office are connected to the WiFi network supported by the

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DLC100. To connect to the network on things, the following are configured: SSID, authentication method, authentication key, obtaining an IP address by DHCP, then the specified IoT server.

The second step is to select and connect IoT devices. "Smart" fire safety items for the Megamart office are connected to the WiFi network supported by the DLC100. To connect to the network, the following are configured: SSID, authentication method, authentication key, obtaining an IP address by DHCP, then the specified IoT server (Fig. 1).

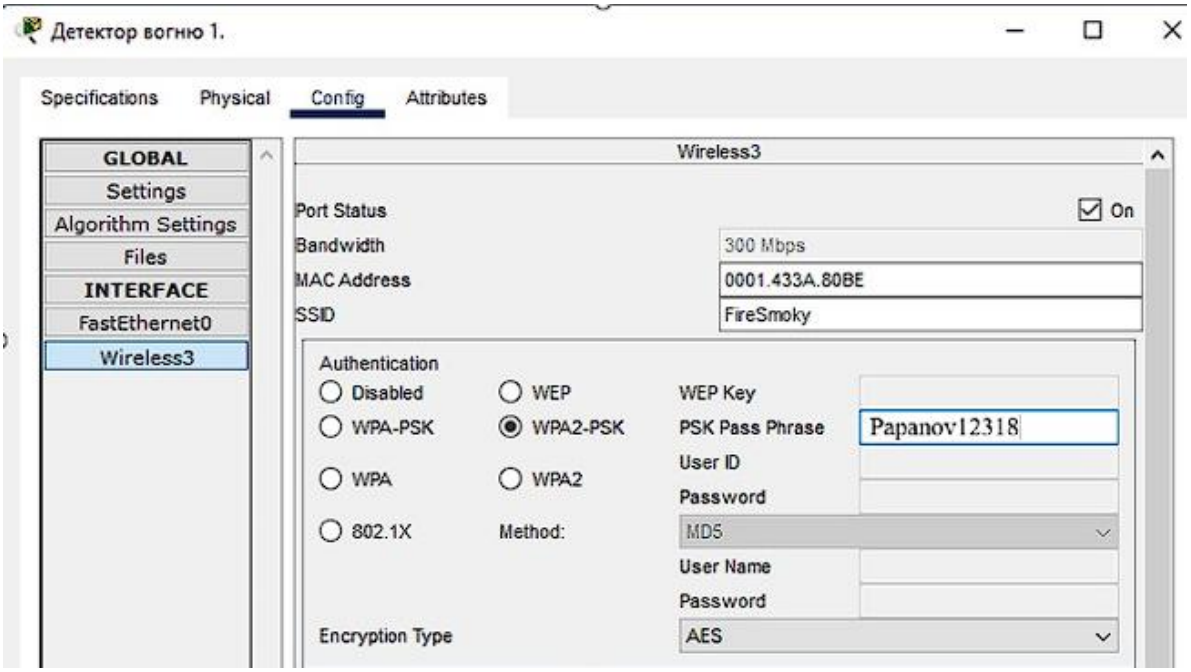


Figure 1 – Configuring the interface of the wireless device

After completing the settings, the "smart" things of the fire safety system will be displayed on the IoT server.

The configuration of connecting "smart" things to the IoT server is shown (Fig. 2 and Fig. 3).

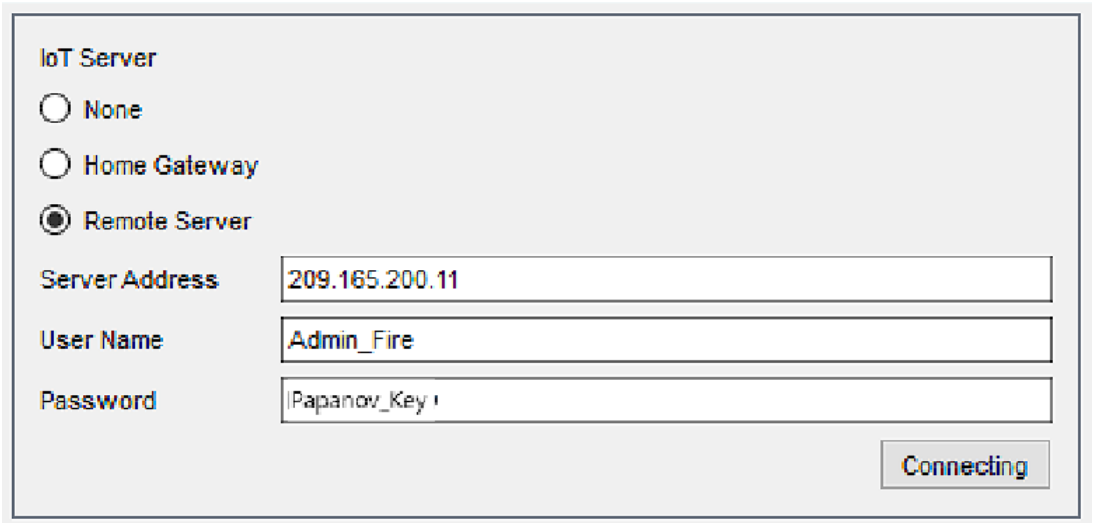


Figure 2 - Configuring the connection of "smart" things to the IoT server

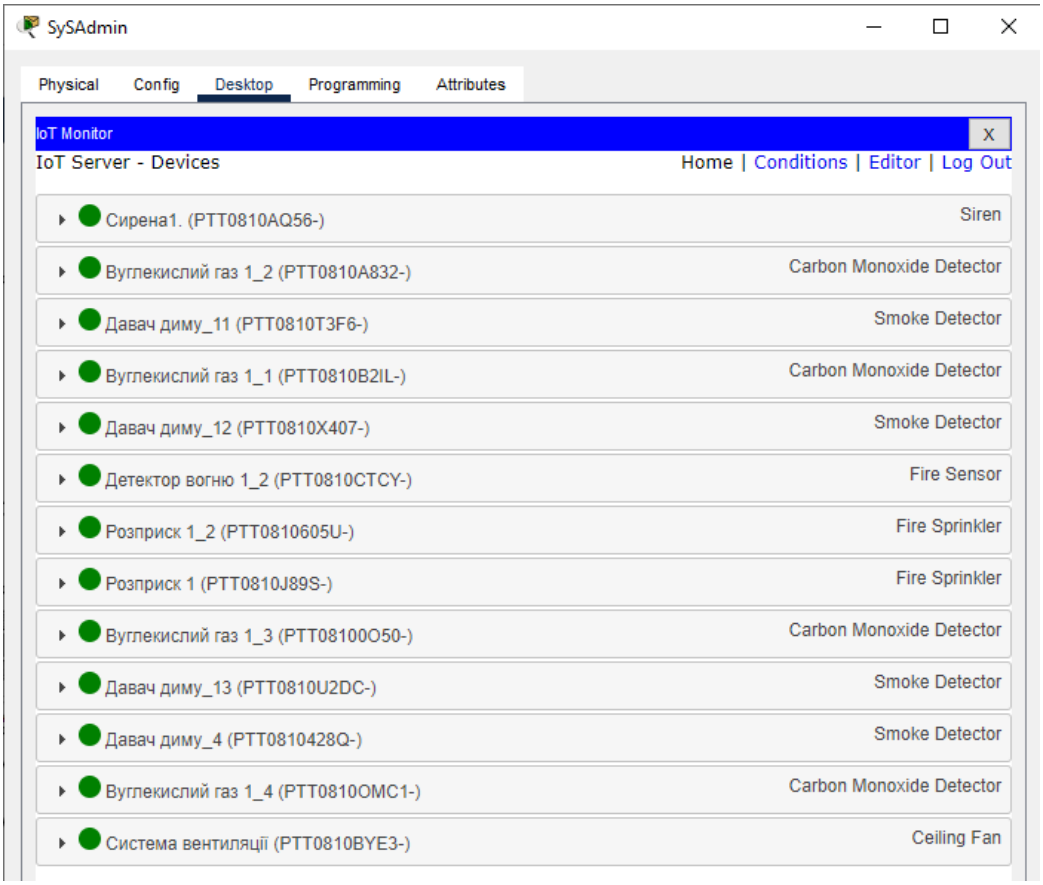


Figure 3 - "Smart" things on the IoT server

In the third step, the algorithms of the fire protection system are executed. Algorithms are written on the IoT server using its web interface as a script.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

When receiving a signal from a smoke or carbon dioxide sensor, the ventilation system and siren are activated. Upon receiving a signal from the fire detector, water sprinklers and a siren are activated.

The fire detector detects the flame, checks the value of the "IR" property in the appropriate range, and the detector examines the fire and outputs a digital signal.

A carbon dioxide detector detects the level of carbon monoxide. It will work when the level of carbon monoxide in the surrounding air is 20%.

The smoke detector will trigger when it detects the smoke environment variable at 40%.

IoT Monitor

IoT Server - Device Conditions

Home | Conditions | Editor | Log Out

Actions	Enabled	Name	Condition	Actions
Edit Remove	Yes	Smok_ON	Match any: • Давач диму_11 Alarm is true • Давач диму_1.3 Alarm is true • Давач диму_1.4 Alarm is true • Давач диму_1.2 Alarm is true • Вуглекислий газ 1.2 Alarm is true • Вуглекислий газ 1.3 Alarm is true	Set Сирена1. On to true Set Система вентиляції Status to High
Edit Remove	Yes	Off_v	IoT3 On is true	Set Сирена1. On to false Set Система вентиляції Status to Off
Edit Remove	Yes	Smok_off	Match any: • Давач диму_11 Alarm is false • Давач диму_1.3 Alarm is false • Давач диму_1.4 Alarm is false • Давач диму_1.2 Alarm is false • Вуглекислий газ 1.4 Alarm is false • Вуглекислий газ 1.2 Alarm is false • Вуглекислий газ 1.3 Alarm is false • Вуглекислий газ 1.4 Alarm is false	Set Сирена1. On to false Set Система вентиляції Status to Off
Edit Remove	Yes	Fire_on	Match any: • Детектор вогню 1. Fire Detected is true • Детектор вогню 1.2 Fire Detected is true	Set Розприск 1_2 Status to true Set Розприск 1.2 Status to true Set Сирена1. On to true
Edit Remove	Yes	Fire_Off	Match all: • Детектор вогню 1.2 Fire Detected is false • Детектор вогню 1. Fire Detected is false	Set Розприск 1_2 Status to false Set Розприск 1.2 Status to false Set Сирена1. On to false

Figure 4 – System operation scenario

When the conditions specified in the scenario for triggering the system's sensors are met, the corresponding executive devices are activated.

Conclusions. The development of the components of the cyber-physical system for fire safety of the company Megamart was carried out, which is based on the use of standard components of modern RFID technology with the development of a

computer network based on CiscoTM network equipment for the main network nodes.

The settings for the given network topology were calculated, standard interfaces for communication channels and exchange protocols were selected, the topological scheme of the computer system was calculated, the routing settings of the computer network were calculated, and the simulation and verification of the operation of the cyber-physical fire safety system was performed.

REFERENCES

1. Yatshyshyn S. P., Mykytyn I. P., Kravets I. P. (2010).Fire Sensors. Principles of Optimization of the Work and Algorithms of Decision Making, Fire Safety: Issue 17, pp. 14–19.

2. R. G. Sanfelice. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice / D. Rawat, J. Rodrigues, I. Stojmenovic. — CRC Press, 2016.

3. Wolf W. Cyber-physical systems //Computer. – 2009. – №. 3. – С. 88-89.

3. Khaitan et al., Design Techniques and Application of Cyber Physical Systems:A Survey, IEEE Systems Journal, 2014.

4. Heng S. Industry 4.0: Upgrading of Germany's Industrial Capabilities on the Horizon //Available at SSRN 2656608. – 2014

5. Jianjun S.et al.The analysis of traffic control Cyber-physical systems. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2013. Т. 96. С. 2487-2496.

6. Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manuf. Lett. 2015, 3, 18–23.

7. Jay Lee, Pradeep Kundu (2022). Integrated cyber-physical systems and industrial metaverse for remote manufacturing. Manufacturing Letters. Volume 34, Pages 12-15. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.012

8. Lunyuan Chen, Shunpu Tang, Venki Balasubramanian, Junjuan Xia, Fasheng Zhou, Lisheng

9. Khalid, M. S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I. S., Lyashenko, V., & Wahid, R. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. International Journal of Engineering Trends and Technology, 70.1, 139-145

Received 16.01.2024.
Accepted 18.01.2024.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Розробка кіберфізичної системи моніторингу пожежної безпеки

Спроектовано нову мережу для підрозділу фірми «Megamart», яка буде застосовувати у якості компонентів підмережу на основі RFID-технології. Для цього розроблено необхідну специфікацію для використання апаратних засобів комп'ютерної системи, у тому числі з набору стандартних пристроїв, необхідних для збору і передачі даних. Виконано вибір відповідного фізичного середовища, яке використовується для реалізації комп'ютерної системи, фізичних портів з'єднання ліній зв'язку, необхідних для організації підключення мережевих пристроїв до інших пристроїв у мережі і додаткових вузлів, які входять до складу комп'ютерної системи. Здійснено вибір мережевих пристроїв і компонентів, необхідних для задоволення технічних вимог для проектованої комп'ютерної мережі.

Виконана розробка компонентів кіберфізичної система для пожежної безпеки фірми «Megamart», яка основана на використанні стандартних компонентів сучасної RFID-технології з опрацюванням побудови комп'ютерної кіберфізичної системи на основі мережевого обладнання фірми CiscoTM для основних мережевих вузлів.

Виконано розрахунок налаштувань для заданої топології мережі, обрано стандартні інтерфейси для каналів зв'язку та протоколи обміну для них, розрахована топологічна схема комп'ютерної системи, розраховані налаштування маршрутизації комп'ютерної мережі, а також виконане моделювання і перевірка роботи кіберфізичної система пожежної безпеки для фірми «Megamart» на основі RFID-технології.

Матвєєва Наталія Олександрівна – доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
Папанов Олександр – студент гр. КІ-22-м-1 факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем , Дніпровський університет імені Олеся Гончара

Matveeva Nataliya Olexandrivna — candidate of technical sciences, associate professor of the department of electronic computers of the faculty of physics electronics and computer systems of the Oles Honchar Dnipro National University.
Papanov Olexander — student of the group KI-22m-1 of the faculty of Physics, Electronics and Computer Systems, Oles Honchar Dnipro National University.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-10
UDC 004.42:621.317.351

A.I. Ivon

SOFTWARE FOR INVESTIGATION OF STATISTICAL PARAMETERS OF MICROSTRUCTURE OBJECTS

Abstract. Using the languages HTML5, CSS3, JavaScript and Canvas technology, the software for processing of the electron microscopy data has been created. The software allows obtaining the information about statistical parameters of microstructure objects using the scanning data of bitmap obtained by electron microscope.
Keywords: web application, bitmap, scanning, electron microscopy, histogram.

Statement of the problem and purpose of research. The data about microstructure of materials usually get by electron microscope [1]. Electron microscopy data are bitmaps containing the information about statistical parameters of microstructure objects: crystallites, pores and phase inclusions. These parameters are the average sizes of microstructure objects, their standard deviation and the statistical distribution law obtained usually in the form of histogram.

When the scale of bitmap is known the measuring of objects parameters it is possible by means scanning of there coordinates. This requires the appropriate software. Because using the software for bitmaps scanning gives an absolute error of ±1 pixel, the measurement of the objects parameters can be performed with high accuracy (the relative error is not more than ±1%) [2]. Significant opportunities for creating of such software have the means using in the Internet: formatting languages HTML, CSS, object-oriented programming language JavaScript and Canvas technology for using the vector graphics on web pages. The environment for executing programs created by such means is the Internet browsers.

The purpose of this work is to create the software for studying the statistical characteristics of the geometric parameters of microstructure objects based on scanning data of bitmaps obtained by electron microscope.

Major part. With a known scale M_L of a bitmap obtained by electron microscope, it is possible to measure the dimensions of a microstructure objects by scanning of their coordinates [2].

© Ivon A.I., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

In this work, a statistical sample of N sizes was formed on the basis of scanning the coordinates of each microstructure object of the same type in four points located on its boundary. In this case, for each object, two sizes L_i and L_{i+1} were obtained which were added to the statistical sample N. If the coordinates of the four points are (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), then the sizes L_i and L_{i+1} were calculated by the formulas:

$$L_i = M_L \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$L_{i+1} = M_L \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (2)$$

At scanning the different quantity of similar objects of microstructure, it is possible to obtain the statistical samples with different quantity N of sizes L_i. This allows to studding the dependence of statistical parameters of objects on the size of statistical sample N. Average size L_{av} of microstructure objects and its root-mean-square deviation σ_L were calculated as:

$$L_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} L_i , \quad (3)$$

$$\sigma_L = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (L_i - L_{av})^2} . \quad (4)$$

The histogram allows obtaining the information about statistical law of object's size L_i distribution. For build a histogram it is necessary to to determine the maximum L_{max} and the minimum L_{min} values of object size in the random sample N. The number of histogram intervals k was determined by the Sturges formula [3]:

$$k = 1 + \lfloor \log_2 N \rfloor . \quad (5)$$

The length of the histogram interval ΔL calculates by the formula:

$$\Delta L = \frac{L_{max} - L_{min}}{k} . \quad (6)$$

The probability P_j when the size of object L_i is falling into the interval $L_{min}+j\Delta L \le L_i \le L_{min}+(j+1)\Delta L$ $(0 \le j \le k-1)$ was calculated as

$$P_j = n_j/N, \quad (7)$$

where n_j is the number of L_i values hits into interval j of histogram.

In view of the above, the algorithm of program for processing the bitmap of the microstructure obtained with an electron microscope includes the following stages: 1). Selecting file of bitmap in the computer's file system and loading it into a browser window; 2). Embedding bitmap into a canvas in order to visualize the results of scanning by means Canvas technology; 3). The scaling of bitmap; 4). Scanning the

coordinates of microstructure objects; 5). Creation of a selection of N sizes L_i by calculating according to formulas (1), (2) on the base of arrays containing the scanned coordinates; 6). Calculation the values L_{av} and σ_L by formulas (3), (4); 7). The construction a histogram of size distribution for studied microstructure object; 8). Output the results of processing.

The interface of program is implemented as a web page (Fig. 1). It contains a toolbox in the top right corner of the browser window, which consists of the blocks "Image upload" and "Processing blocks". To the left of the toolbox block there is the navigator for view the current coordinates of cursor. These coordinates are displayed in pixels in the hidden fields of forms. The "Build histogram" button is intended for launching the program script provides building of histogram. For histogram construction an additional canvas uses in the web page. It locates in the lower right corner of the browser window and has the sizes of 700×450 pixels. The main canvas for embedding the bitmap of microstructure located in the top left corner of the browser window and has the sizes of 1050×780 pixels.

The "Image upload" block contains a form field of the "file" type. The button «Choose File» of this field supplies the user to select a file of bitmap in the computer file system. When he presses the "Download" button, the bitmap is embedded into canvas for providing its further procession.

The "Processing blocks" block contains buttons "Scaling", "Creating a statistic sample", "Correction", "Reset" and an empty space where the hidden blocks "Scale definition" and "The average size" are located. These blocks are opened at the corresponding stages of the program algorithm. Scaling of bitmap performs after pressing the "Scaling" button. When the button "Creating a statistic sample" is pressed, the block "The average size" is opened. This block allows the user to create by scanning the statistical sample N of the sizes L_i for objects in investigated microstructure. The button "Correction" allows correction the scanning results. When this button is pressed, the coordinates of the last scanned point are removed from the coordinate arrays and its image on the bitmap is erased. The "Reset" button is intended for complete clearing of the coordinate’s arrays, clearing the forms fields for results, erasing the visual display of scanning points and removing the histogram from the additional canvas. This allows performing the statistical analysis for other object of microstructure.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

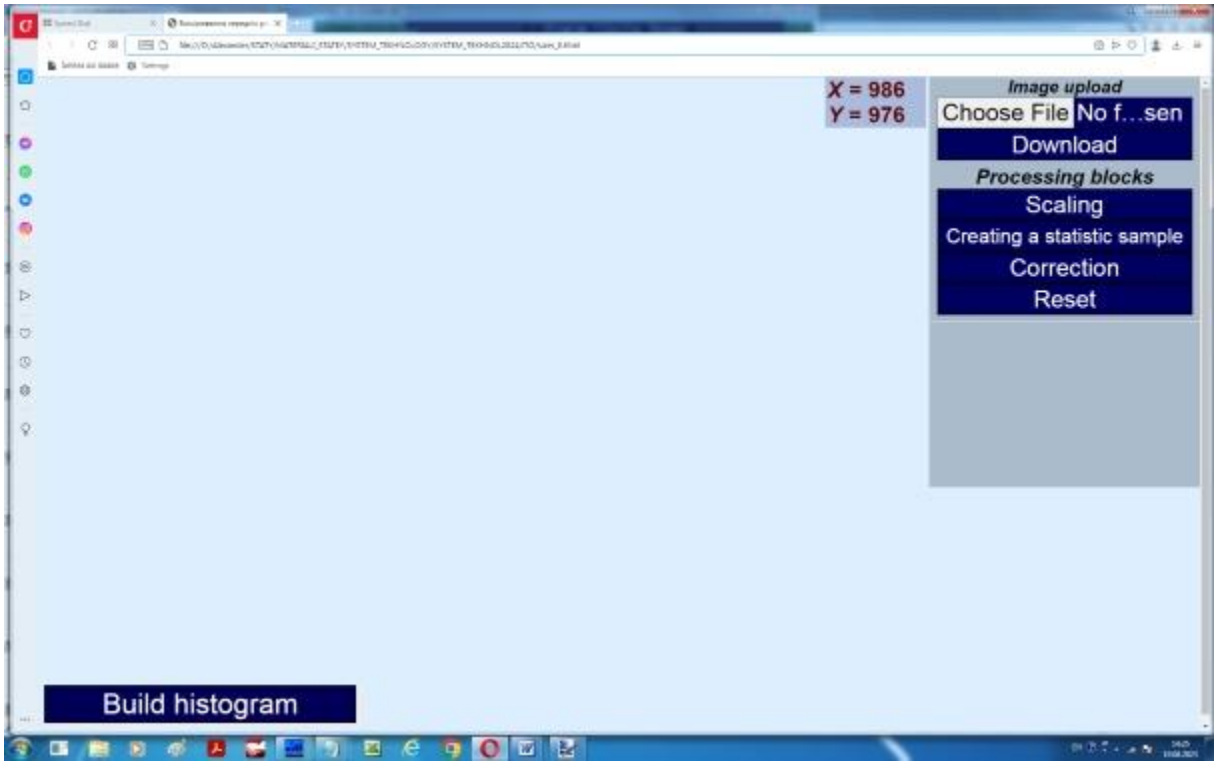


Figure 1 - Web page after loading the program

The program begins from bitmap loading at pressing the "Choose File" button. The user selects necessary file in standard “Windows” window and presses the "Open" button in this window. Then image builds into canvas at click the "Download" button.

When pressing the "Scaling" button, the program opens the hidden block "Scale definition" (Fig. 2). This block contains a form field for entering the value of calibration length "L_C =" and the button "Calculate". The user must enter the value of calibration length L_C indicated on bitmap of microstructure and scan the ends of segment corresponding to this length. Scanning is performed by pointing the cursor to the selected point of bitmap and then clicking the left mouse key. In this case the "mouseup" event starts a script that reads the coordinates x_i, y_i of point using the “event” object properties "pageX" and "pageY" of the JavaScript language. The coordinates are written to the corresponding arrays of program. After clicking the "Calculate" button, the scale value M_L of bitmap calculates and shows in the hidden field of the "Scale definition" block. Fig. 2 shows the program web page at the final stage of bitmap scaling.

Note that Fig. 2 shows the raster image of microstructure tin dioxide (SnO_2) based varistor ceramics. The main microstructure objects of this ceramics are the crystallites of SnO_2 and pores.

Figure 2 - Web page of program at the final stage of bitmap scaling

For go to the stage of objects coordinates scanning in bitmap the user must click the "Creating a statistic sample" button (Fig. 2). This hides the "Scale definition" block and opens the "The average size" block (Fig. 3). This block contains the hidden fields preceded by the inscriptions "*Sample size N* =", "*Size* L_{av} =", "*Standard deviation* =". These fields are assigned to output of the sample size N, the average size of microstructure object L_{av} and the standard deviation of the sizes σ_L, respectively.

Scanning performs for each microstructure object in four points of its boundary. The program marks the scanning points with red circles connected by white lines (Fig. 3). When the "Calculate" button is pressed, the program script calculates the average value of the object size L_{av} and its standard deviation σ_L based on the statistical sample N. The values of N, L_{av}, σ_L output to the hidden fields of form in "The average size" block (Fig. 3). At pressing the "Build histogram" button, the histogram of sizes distribution is built. Fig. 3 shows the view of program window at the final stage of procession at study the statistics of SnO_2 grains sizes distribution in SnO_2 based varistor ceramics (the statistic sample of SnO_2 grains sizes N=52).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

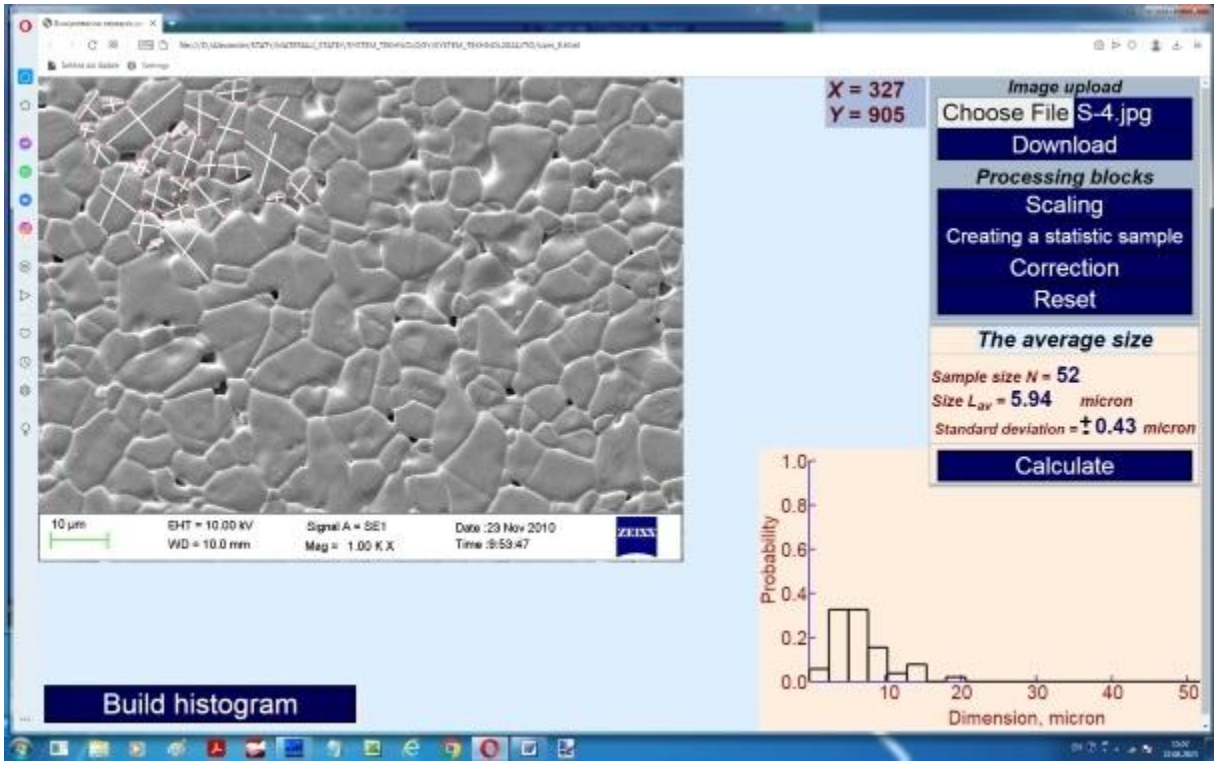


Figure 3 - Web page of program at the final stage of investigation the size distribution of SnO_2 grains in SnO_2 based varistor ceramics (N = 52)

Described program has possibility to scan the coordinates of different objects in bitmap of electron microscope and to obtain the statistic samples with different *N*. This gives possibility to investigate the dependence of static parameters on the sample size N. Fig. 4 shows the program window at the studing the distribution of grains size in SnO_2 based cersmics for varistors when the statistic sample is N = 520.

At pressing the "Reset" button, the arrays for storage of scanned coordinates and the form fields for results output are cleared. This enables the user to perform statistical studies of other objects of microstructure. Fig. 5 shows a program window after study the statistics of pore size distribution in SnO_2 based varistor ceramic.

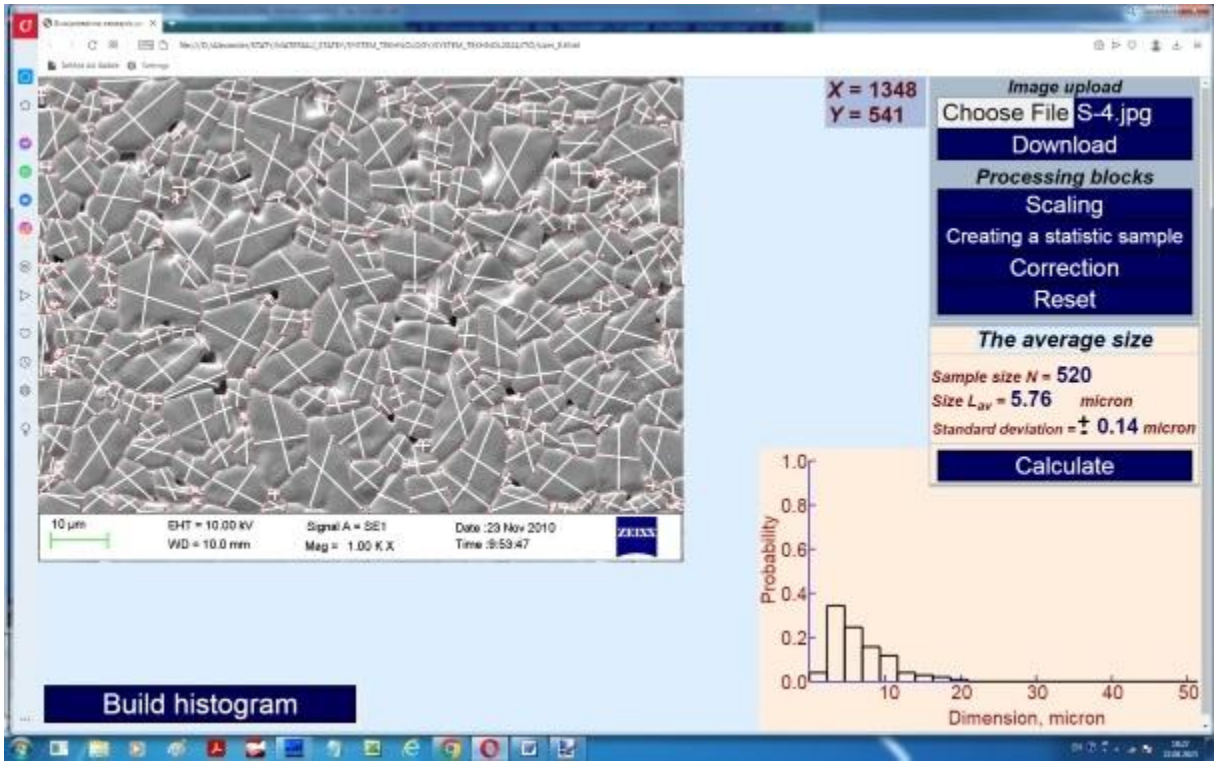


Figure 4 - The program web page with results of study the distribution of grains sizes in SnO_2 based varistor ceramics (N = 520)

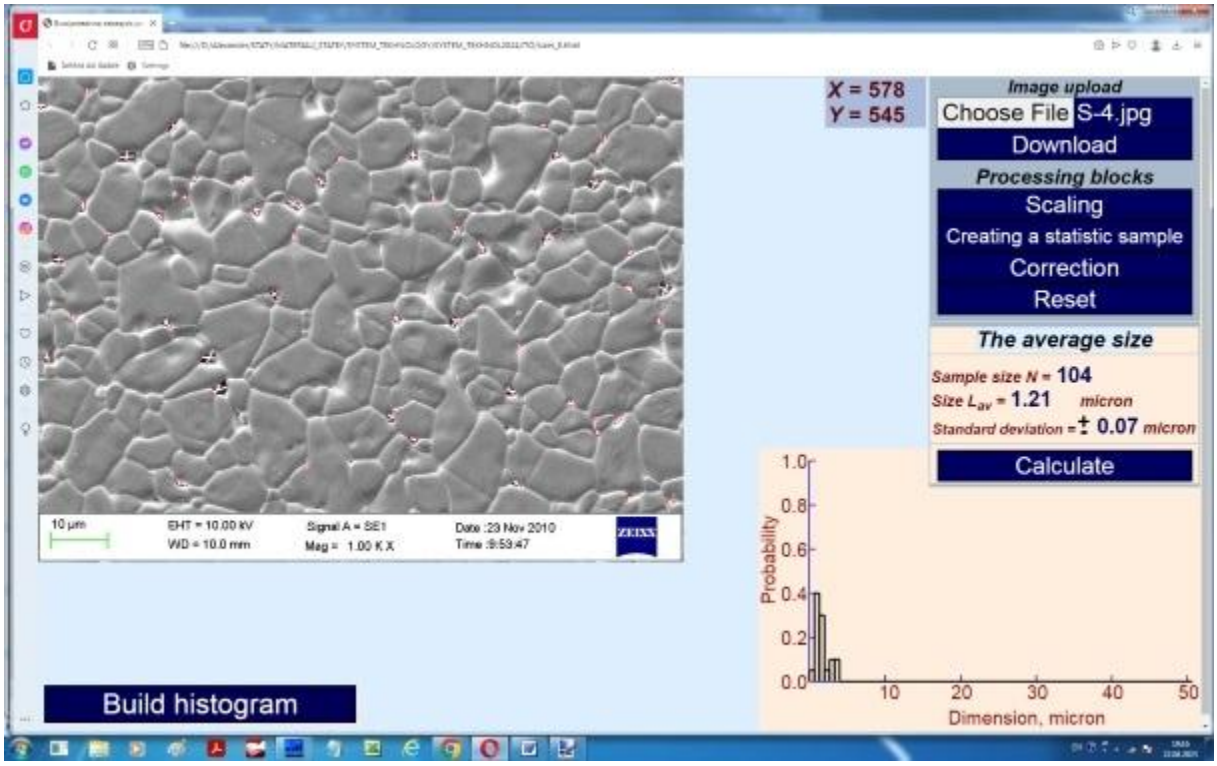


Figure 5 - The program web page with results of study the distribution of pore sizes in SnO_2 based varistor ceramics (N = 104)

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Conclusions. On a basis of means for presenting information in the Internet (the languages HTML5, CSS3, JavaScript and Canvas technology) an applied web application has created to study the statistical parameters of the materials microstructure objects. The web application gives possibility for users to measure the average size and it standard deviation for objects of electron microscop raster images and to build the histogram of sizes distribution. For measuring uses the coordinates of objects, which user obtains by click in select points of the microstructure bitmap obtained by an electron microscope. The environment for using of software is the Internet browsers.

REFERENCES

1. Ian M. Watt. The Principles and Practice of Electron Microscopy. – Cambridge University Press, 1997. – 500 P.

2. A.I. Ivon. Use of the digital image for measurement of small planar objects geometric parameters with high precision / Ivon A. I., Istushkin V.F. // System technologies. – 2022. – issue 1 (138) p. 120-126.

3. H.A. Sturges. The choice of a class interval / Sturges H.A. // J. Amer. Statist. Assoc. – 1926. – V. 21, № 153. – p. 65–66.

Received 16.01.2024.
Accepted 19.01.2024.

Програмне забезпечення для дослідження статистичних параметрів об'єктів мікроструктури

Інформацію про мікроструктуру матеріалів отримують за даними електронної мікроскопії як растрові зображення. Такі зображення, при відомому масштабі, надають можливість виміряти розміри об'єктів мікроструктури (кристалітів, пор, украплень фаз, тощо). Статистичне вибирання розмірів дозволяє дослідити статистичні характеристики цього параметру. Вимірювання розмірів можна здійснити на підставі даних сканування координат об'єктів мікроструктури. Таке сканування потребує розробки відповідного програмного забезпечення (ПЗ).

Метою роботи є створення засобами HTML5, CSS3, JavaScript і технології Canvas ПЗ для дослідження статистичних параметрів об'єктів мікроструктури: середнього розміру, середньоквадратичного відхилення розміру та гістограми розподілу розмірів. Для вимірювання розмірів об'єкту мікроструктури виконується сканування координат в чотирьох точках його границі. За цими координатами для окремого об'єкту мікроструктури розраховуються два розміри. При скануванні різних однотипних об'єктів мікроструктури створюється статистичне вибирання розмірів об'ємом N. Програма надає можливість створювати стати-

стичне вибирання будь якого об'єму N. Це дозволяє дослідити залежність статистичних параметрів від N.

Інтерфейс програми реалізовано у вигляді веб-сторінки. Програмним середовищем для її виконання є браузери мережі Інтернет.

Івон Олександр Іванович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара.

Ivon Alexander Ivanovich – doctor of physical and mathematical sciences, professor, professor of the department of Electronic Computing Machinery, Oles Honchar Dnipro National University.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-11
UDC 004.42

V.V. Spirintsev, O.V. Spirintseva, M.O. Mykhaylenko

WEB-ORIENTED APPLICATION FOR KEEPING A DENTAL CHRONICLE FOR RECORDING AND ANALYSING THE STATE OF THE ORAL CAVITY

Abstract. A web-based application for keeping dental records is proposed for effective monitoring of the patient's oral cavity. The application provides the opportunity for the patient to keep his own dental history in order to increase the level of responsibility, interest and awareness of the state of his own health, which can be a good motivation. It also increases the level of diagnosis and further treatment by providing access to the entire clinical history of the patient. The client-server architecture model, MVC design template, JavaScript programming language, HTML, SCSS preprocessor, MERN programming stack, which included such modules as MySQL, Express(.js), Node.js, React, were used to implement the application.
Keywords: web-oriented application, JavaScript, SCSS, MERN, MySQL, Express(.js), Node.js, React, MVC, BEM methodology, oral cavity.

Formulation of the problem. Today information technologies simplify people's lives in various spheres, issues and industries. Medicine does not stand aside. While constantly developing it requires the introduction of modern technologies and developments in order to optimize and improve existing processes such as diagnosis, treatment, organization of appointment schedules, communication between doctors and patients, work of clinics, disease histories management, conducting surveys for scientific analysis, control of medication intake, monitoring of one's own body parameters, etc. Dentistry is no exception. It`s a field that is an important component of medicine and has a significant impact on human life.

Despite all available developments and technologies, there are still a large number of issues that require improvements and the implementation of universal solutions. They are the problem of complicated diagnoses due to untimely seeking help, the increase in the number of diagnoses due to the careless attitude of patients to the care of the oral cavity and postponement of periodic visits to the doctor, speeding up diagnosis based on previous treatments and tests that can be viewed in

© Spirintsev V.V., Spirintseva O.V., Mykhaylenko M.O., 2024

one application, independence of the treatment process from the change of the doctor, existing cases of neglecting a detailed description of the performed procedures by the doctor.

All these issues can be solved by the approach proposed in this work. It is based on the possibility of keeping of the appointment records by both the doctor and the patient. This makes it possible to not only improve understanding during treatment, contribute to the improvement of its quality and productivity, but to increase the level of responsibility and awareness of the patient about the state of his own health. An important aspect is also the possibility to monitor not only the treatment processes, but also the performed analyses. Especially this applies to the graphical presentation of information such as photographs of the oral cavity.

In addition, there is a need to develop modules for monitoring healthy habits aimed at oral care. The problem of understanding the current state of the oral cavity is solved by means of its graphic 2D model, which displays the main dental procedures and the patient's level of compliance with standard hygiene rules such as the frequency of tooth brushing.

Analysis of the latest research. The presented developments in this field can be classified according to the following categories such as reference books [1], educational as well, those that remind you of brushing your teeth [2], those that teach you to brush your teeth [3-5], questionnaires [6-8], those that aimed at managing the dental journal and planning the work process [9, 10], diet diaries [11]. There is the latest study that use an artificial intelligence to detect dental diseases using the analysis of panoramic images in real time [12].

The analysis of the available existing solutions showed the following: most of the considered applications developed for the dental industry are mobile applications; the considered applications are focused primarily on specialists, not on patients; many of the listed developments do not provide cross-platform functionality; lack of a comprehensive solution to the tasks. Taking into account the above-mentioned features the development of a patient-oriented web application for keeping dental records, forming the habit of responsible care for one's oral cavity and organizing the treatment process on the part of the doctor is relevant.

Web-orientation provides a number of advantages over mobile applications. They are cross-platform, ease of updating, flexible integration options with all services, security, efficiency, a single base. In turn, patient orientation is not only an effective motivational tool for compliance with rules and recommendations, but also a mean to make a person more knowledgeable and healthy.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

The goal of the work. The purpose of this article is the development of a web-based application for maintaining a patient's dental history to ensure the possibility of effective oral cavity monitoring.

Main part. The developed web application is based on a three-level client-server architecture consisting of clients, a central server and a database server. This architecture was chosen due to easy sharing of resources and data between platforms, flexibility, availability, extensibility and scalability.

During application development, the MERN programming stack was taken as a basis due to a number of its advantages such as cost-effectiveness, SEO support, better performance, open source, easy switching between the client and the server. In the classical sense, the components of this stack include the MongoDB database, the Express (.js) web framework, the React (.js) interactive library and the Node (.js) server framework. However, in the developed application the MongoDB database was replaced by the MySQL relational database. The final structure of the applied stack is presented in Figure 1. Additional modules were also used, including nodemon, dotenv, jsonwebtoken, bcrypt.js, cors, cookie-parser, axios, etc.

As the programming pattern MVC (Model-View-Controller) was chosen. The implementation of the MVC template was added at the expense of the MERN stack as follows. The *view* element is the client part developed using React.js; *controller* element represents classes developed on the server side of the application using Node.js; the developed methods, including CRUD operations, are responsible for the *model* element and the connection with the database. Also, the BEM (Block Element Modifier) methodology belongs to the technologies that were used in the development of this application. This is a component approach to web development, based on dividing the interface into independent blocks. Due to this approach, the naming of structural elements and the structure of the interface files were organized.

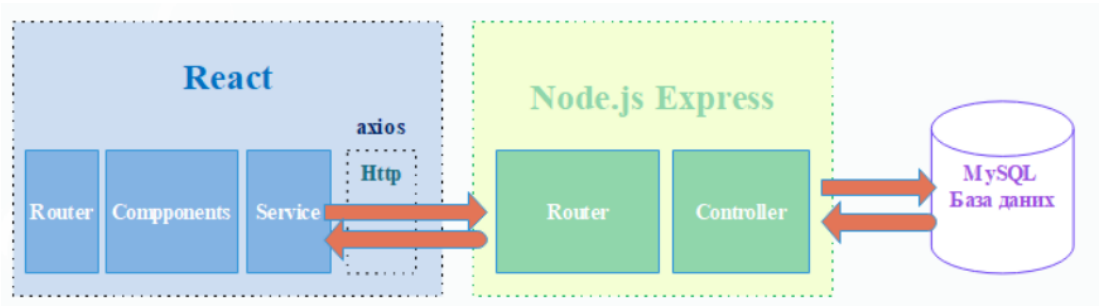


Figure 1 - Structure of the applied programming stack

The application programming language is JavaScript. It was chosen because this language is intended for web-oriented development and is the basis of the

MERN stack. In addition, for the application development, the HTML markup language was used to build the frame of the pages and SCSS preprocessors were used for pages design. The SCSS preprocessor is to speed up the development; it became more productive especially with the use of the BEM methodology.

Purpose and structure of the application. The developed application has the following purposes:

- maintaining a dental chronicle of the patient's oral cavity, followed by graphic visualization of the current state;
- doctor`s management of treatment processes;
- tracking of existing symptoms and complaints about the user's state of health;
- control of the expiration date of toothbrushes replacement and monitoring of the number of teeth cleanings per day.

The developed application is called "Dental Diary" and is based on the following modules:

– the *observer's diary* is an additional part of the "Dental Diary", which is aimed at monitoring the dynamics of the evolution of previously indicated symptoms;

– *tooth brushing diary* is an additional part of the "Dental diary" system, which stores data on brushing teeth, which the user enters through the form;

– the *patient's diary* is a structural part of the "Dental Diary" application, which is intended for keeping a personal dental chronicle of each participant and consists of the elements such as treatment, record and procedure;

– *toothbrush replacement log* is an additional part of the "Tooth Diary" system, which stores data about the time of toothbrush use;

- *patient log* is the main part of the "Dental Diary" system, which is available only to specialists in the dental field, and is intended for keeping the clinical history of each patient who has granted access for this purpose.

In general, there are "doctor" and "patient" types of users in the system. Access to application functions depends on the type of user. The logical structure of the application consists of such web pages as main page, registration page, authorization, personal account, patient log, patient diary, brushing diary, observer diary, treatment, record and procedure. The application file structure consists of client and server parts. The first one is located in the "frontend" directory and has a structure according to the requirements of using the React library, including "node_modules", "public" and "src" folders. "src" directory contains the implementation of the presentation element according to the MVC pattern. The file structure in the "src" directory is based on the BEM methodology using the Flex approach in which each block of the

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

interface corresponds to a separate directory. The server part is located in the "backend" directory and includes the main application launch files such as index.js and App.js. Controller files are placed in the "controllers" directory, and navigation files are in the "routers" directory. Database connection is implemented in the "dbconnect" directory. Additionally used Node.js modules are located in the "node_modules" directory. The described file structure is presented in Figure 2-3.

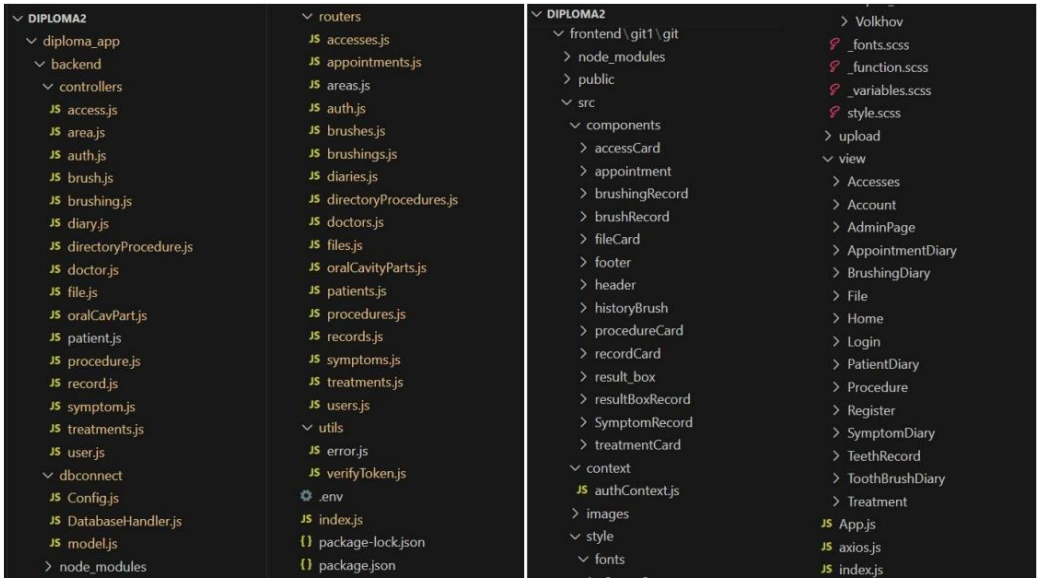


Figure 2 - File structure of the application

Figure 3 - Expanded file structure of the client part

The structure of the database is shown in Figure 4. It consists of 14 entities and 4 views. Entities are 'Access', 'Diary', 'Doctor', 'File', 'Mouth part', 'Procedure', 'Scope', 'System procedure', 'Cleaning record', 'Symptom', 'Record', 'Toothbrush',

'Treatment', 'User'. Representations are 'Diary Data', 'Treatment Data', 'Record Data' and 'Procedure Data'.

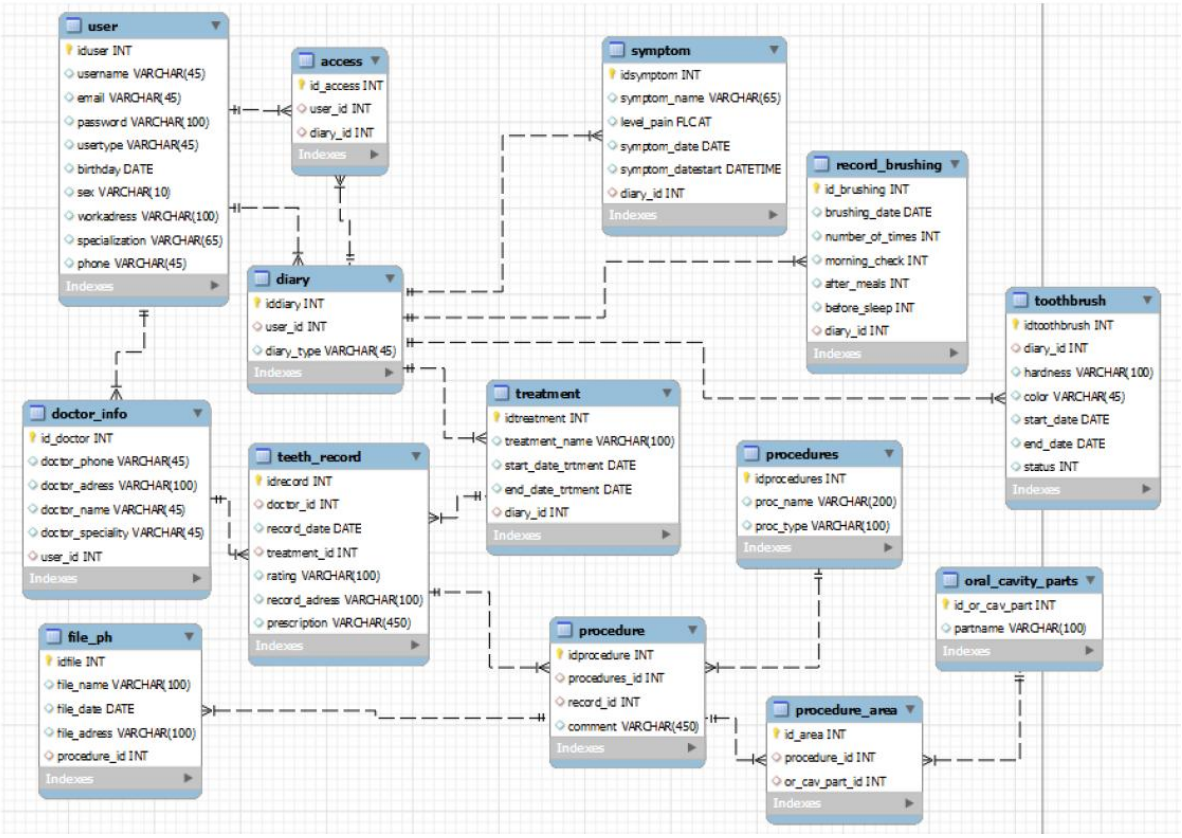
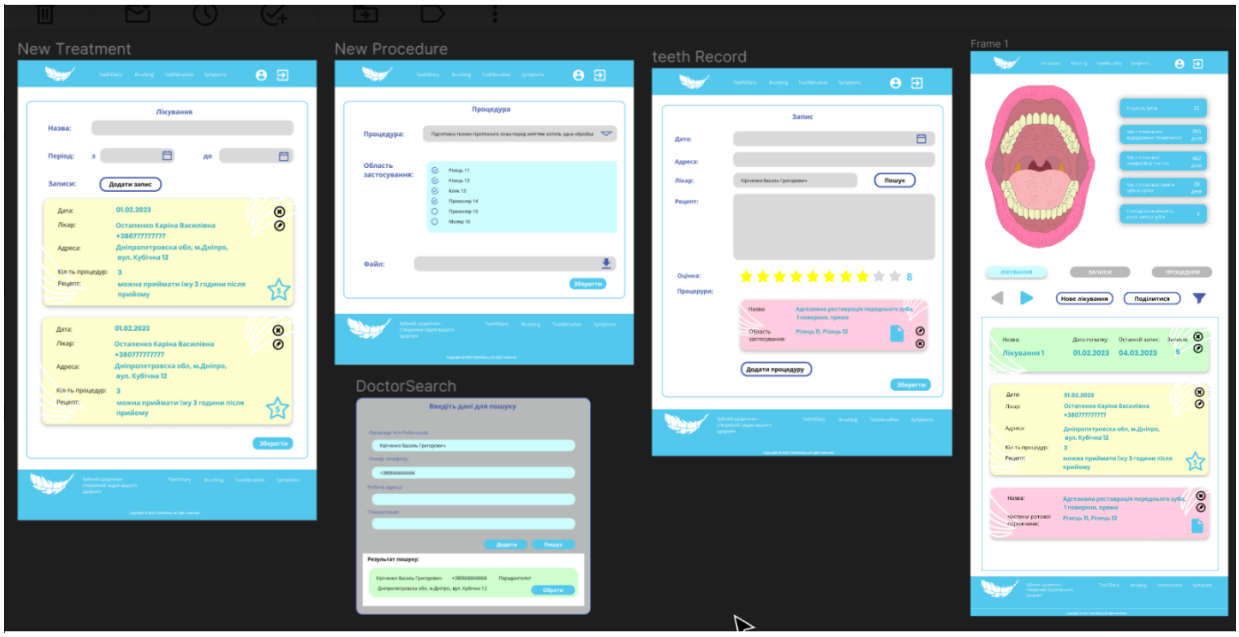


Figure 4 - Physical model of the database

Application interface. According to the logical structure, the client interface of the application was developed. It is shown in Figures 5-7. An important element of the application is a graphic 2D model of the current state of the oral cavity. Depending on the entries made in the "Patient's Diary", the display of the model changes. The appearance of the model can also be enhanced by brushing teeth. Three dental operations are currently available. These are adhesive tooth restoration, tooth extraction and pulp extirpation or root canal surgery.

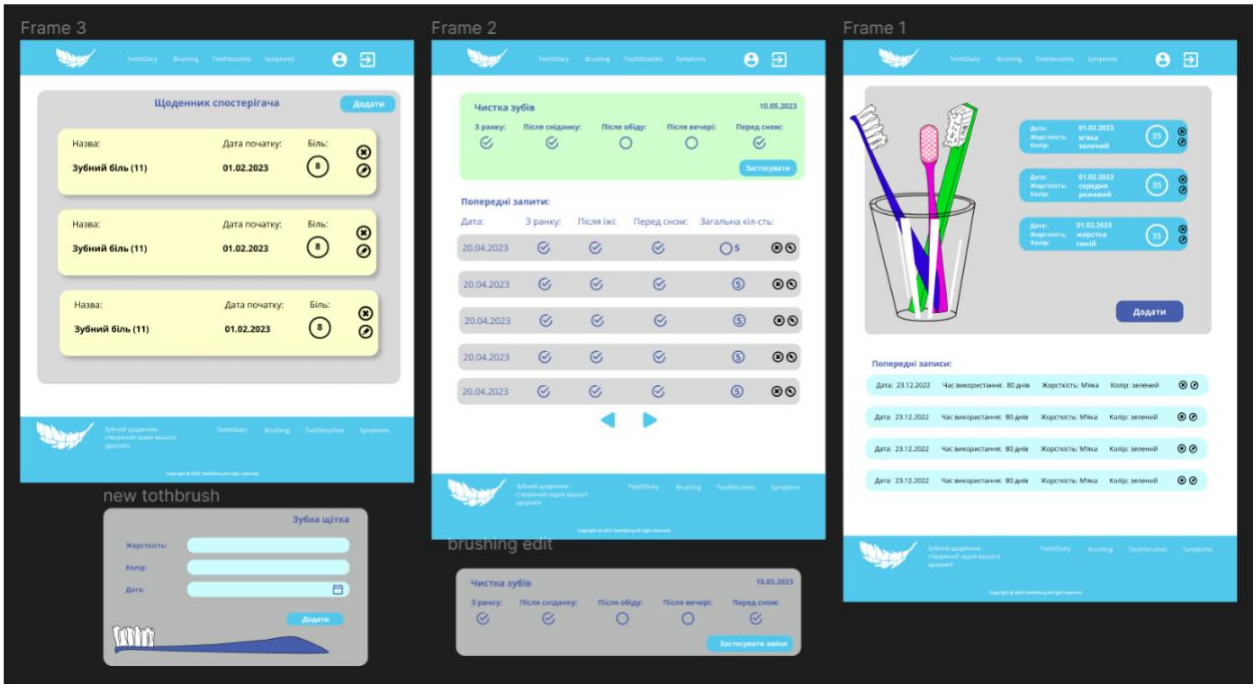
All data is to be entered using forms. It is possible to add files such as dental images to the procedures. File format should be *jpg* or *png*. In addition to the graphic model of the oral cavity, the output data also has a presentation in the form of cards such as treatment, records and procedures, records of cleaning or replacing toothbrushes.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)



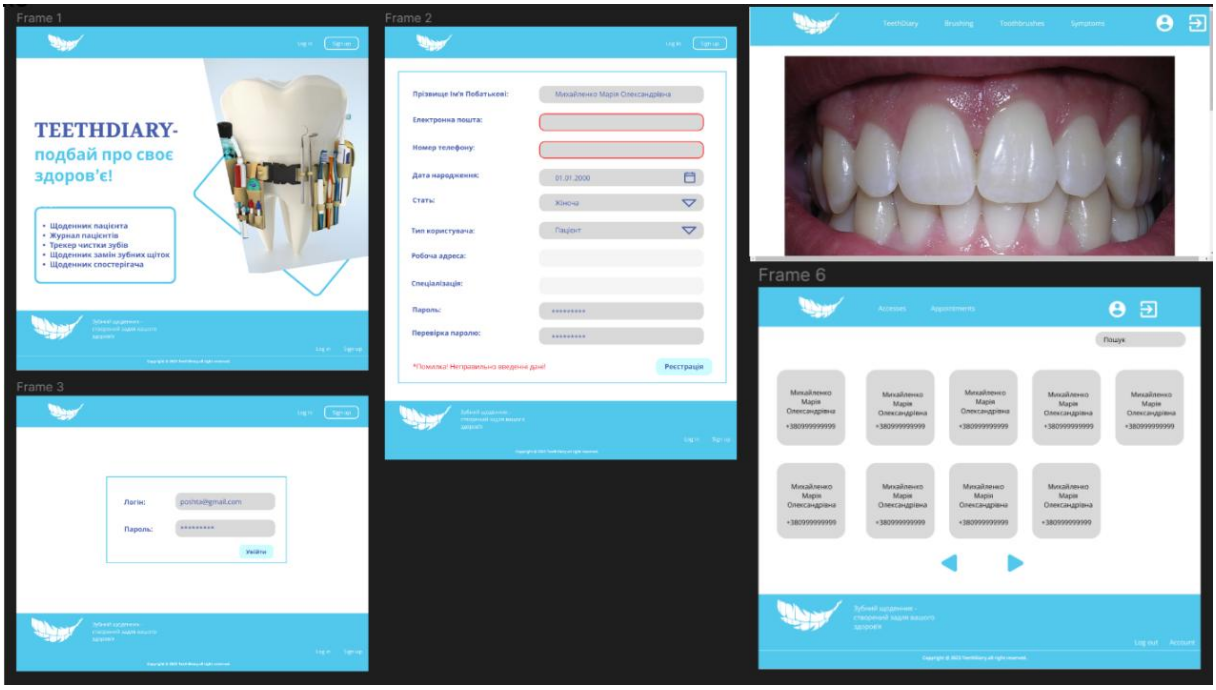
a b c D

Figure 5 - Interface design: a) Treatment page; b) Procedure page and Doctor Search form; c) Record page; d) patient's diary



a B C

Figure 6 - Interface design: a) observer's diary and toothbrush creation form; b) tooth brushing diary and a form for filling in data on brushing teeth; c) toothbrush replacement diary



a B C

Figure 7 - Interface design: a) main page and authorization page; b) registration page; c) viewing the procedure file and the patient log

Each entry can be edited or deleted. One of the data views can also be called an information panel, which shows current data on the last visit to the dentist, the last professional cleaning, the last toothbrush change, the number of teeth in the oral cavity and the number of teeth brushing today.

Conclusions. The paper proposes a web-based application for keeping dental records for recording and analyzing the state of the oral cavity. The practical significance of the developed application is to provide users with a convenient motivational tool for oral health care and monitoring. The user of the "patient" type is provided with the following functionality as registration and authorization, keeping records of treatment processes, viewing attached image files, tracking the frequency of brushing teeth and changing toothbrushes, monitoring the appearance of symptoms and health complaints. The user of the "doctor" type is given the opportunity to keep and view the history of treatment of patients who have given their access. Further development of the proposed research has several directions. They are expanding the range of display of performed procedures on a graphic model; creation of the "Calendar of Appointments" module for convenient planning of the doctor's work schedule; implementation of the comparative analysis of certain type images and for a

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

certain period of time; implementation of communication between the doctor and the patient with the possibility of making an appointment through the system.

REFERENCES

1. My Dental Care. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://dentalcareapp.co.uk/.
2. About BrushDJ. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://www.brushdj.com/#nogo.
3. Zotti F, Pietrobelli A, Malchiodi L, Nocini PF, Albanese M. Apps for oral hygiene in children 4 to 7 years: Fun and effectiveness. J Clin Exp Dent. 2019 Sep 1;11(9):e795-e801. doi: 10.4317/jced.55686. PMID: 31636871; PMCID: PMC6797448.
4. About Time2Brush. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://igamemom.com/time2brush-motivates-kids-brush-teeth/ .
5. About Brusheez. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://brusheez.com/pages/about-us.
6. De Barros Lima, A.M.E.; Rodrigues, C.A.Q.; Haikal, D.S.A.; Silveira, M.F.; Mendes, D.C.; Oliviera, P.M.;Andrade, A.F.; de Feritas, C.V.; Pordeus, I.A. Desenvolvimento de um programa de computador para levantamentos epidemiológicos sobre condições de saúde bucal. Unimontes Científica 2012.
7. Detsomboonrat, P.; Pisarnturakit, P.P. Development and Evaluation: The Satisfaction of Using an Oral Health Survey Mobile Application. Telemed. e-Health 2019.
8. Cavalcante NV, Oliveira AH, Sá BVC, Botelho G, Moreira TR, Costa GDD, Cotta RMM. Computing and Oral Health: Mobile Solution for Collecting, Data Analysis, Managing and Reproducing Epidemiological Research in Population Groups. Int J Environ Res Public Health. 2020 Feb 8;17(3):1076. doi: 10.3390/ijerph17031076. PMID: 32046266; PMCID: PMC7036884.
9. Dental Record – Management app. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.app_dev_coders.DentalRecord&hl=en&gl=US.
10. About LocalMed. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://www.localmed.com/about/.
11. FoodForTeeth – Healthier Teeth. [Electronic resource]. Access mode. – URL: https://apps.apple.com/us/app/foodforteeth-healthier-teeth/id925367825.
12. Kim C, Jeong H, Park W, Kim D. Tooth-Related Disease Detection System Based on Panoramic Images and Optimization Through Automation: Development Study.

JMIR MedInform. 2022 Oct 31;10(10):e38640. doi: 10.2196/38640. PMID: 36315222; PMCID: PMC9664332.

Received 19.01.2024.
Accepted 23.01.2024.

Веб-орієнтований застосунок ведення дентальної хроніки для запису і аналізу стану ротової порожнини

Запропоновано веб-орієнтований застосунок для ефективного моніторингу та догляду за станом ротової порожнини пацієнта. Розроблений застосунок має наступне призначення: ведення дентальної хроніки стану ротової порожнини пацієнта, з подальшою графічної візуалізацією поточного стану; ведення лікувальних процесів лікарем; відстеження наявних симптомів та скарг на стан здоров'я у користувача; контроль спливання терміну використання замін зубних щіток та моніторинг кількісті чисток зубів на день. Загалом в системі наявно два типи користувачів: лікар і пацієнт. Звичайному користувачу надаються наступні функціональні можливості: реєстрація і авторизація, ведення записів про лікувальні процеси, перегляд доданих файлів знімків, відстеження частоти чистки зубів і зміни зубних щіток, моніторинг появи симптомів та скарг на здоров'я. Користувачу типу лікар, надається можливість вести і переглядати історію лікування пацієнтів, що надали свій доступ. Для реалізації застосунку було використано модель клієнт-серверної архітектури, шаблон проектування MVC, мова програмування реалізації JavaScript, HTML, препроцесор SCSS, стек програмування MERN, який включив наступні модулі: MySQL, Express(.js), Node.js, React.

Спірінцев В'ячеслав Васильович - к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ "Дніпровська політехніка".
Спірінцева Ольга Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.
Михайленко Марія Олександрівна – магістр, НТУ "Дніпровська політехніка".

Spirintsev Viacheslav Vasyliovych - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of computer system's software department of the Dnipro University of Technology.
Spirintseva Olga Volodymyrivna - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.
Mykhaylenko Maria Oleksandrivna - master of the Dnipro University of Technology.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-12
UDC 536.212: 699.059

O.V. Kravets, K.V. Makhonina

THE INFLUENCE OF THE MATERIAL AND THE THICKNESS OF THE INSULATION LAYER ON THE HEAT FLOW THROUGH A MULTI-LAYER EXTERNAL WALL PANEL OF A RESIDENTIAL BUILDING

Abstract. Solved the actual problem of heat flow research through a multi layer external wall panel of a residential building, depending on the material and thickness of the heat insulating layer.
Key words: multi layer external wall panel, heat flow, thermal insulation material, temperature, insulation of a residential building.

Introduction. Taking into account the limited non-renewable organic energy resources on Earth, as well as the insufficient power of renewable energy sources, the issues of energy conservation, in general, and heat preservation in residential premises, in particular, become actual. Heat losses in the room can be significantly reduced thanks to properly selected heat-insulating materials and the optimal thickness of the corresponding layer of the multilayer external wall panel. This direction of research contributes to solving the problem of energy saving, which is urgent for Ukraine, one of the most important directions of technical policy in the field of construction.

Analysis of recent research and publications. Industrial and residential buildings must meet certain requirements, the main of which include: durability, reliability and economy. At the same time, the fulfillment of thermo- and physical laws is of great importance when studying the influence of the environment on the microclimate inside the room and vice versa when there is a wide use of new building materials and technologies. External enclosing wall panels affect heat flows that are lost by the house in the cold period of the year and enter the premises in the spring and summer period. At the same time, a thermal calculation is carried out, in the process of which the temperature field and heat flows are calculated, after which the thermal insulation condition of the enclosing structures is evaluated, that is, the heat absorption of the room is determined.

© Kravets O.V., Makhonina K.V., 2024

In [3], a one-dimensional numerical model was developed that characterizes the coupled heat exchange between a three-layer wall and a closed cavity. This model is applied to study the passive control and stability of the indoor air temperature of a closed cavity that can simulate a living space. The exposed wall consists of a phase-changing material enclosed in a rectangular container and framed with insulating and building material. Numerical analysis was carried out using an implicit finite-difference scheme. Numerical simulations were performed with three types of phase-changing material. The results showed that for indoor air temperature stability and control, the choice of phase change material is based on its melting point, which is preferably chosen close to the thermal comfort temperature and with significant latent heat. The authors assure that the presented calculation algorithm can be extended to the multilayer wall and the porous layer of the multilayer wall and used to determine the optimal position and thickness of the layer of the phase-changing material.

Daily characteristics of air temperature near the surface and the surface energy balance of building massifs under different environmental conditions are studied in [5]. Direct solar radiation, wall height, and wall orientation are important factors that affect diurnal variations in wall surface temperature. Two types of buildings were studied: the "hollow" model means hollow concrete buildings and the "water" model, whose walls are partially filled with water. In the course of research, it was found that the water model has a smaller average daily temperature range in the room than the hollow model due to heat accumulation. This study can provide experimental data to validate numerical and theoretical models for research on the influence of climatic conditions on the thermal quality of building structures.

Ecological buildings and ecological projects require architectural designers to improve existing basic building codes and regulations in order to improve the overall energy efficiency of the building, optimize the ventilation of the building, minimize the environmental impact during the life cycle and create a comfortable living environment.

The work [4] presents a study of the influence of the geometric dimensions of the room on air ventilation in it, taking into account the heat exchange between the human body and the environment. Solar effects were taken into account only on the roof of the building. The results showed that the presented technique can help in ventilation design and reasonably predict the ventilation flow. The method developed in this study can be extended to design and analyze other types of natural ventilation in buildings.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Composite-aluminum honeycomb panel is a reliable construction heat-insulating material; its advantages: a small value of the coefficient of thermal conductivity, low weight and high plasticity. This material can be used as insulation for brick and panel buildings in order to create light, high-strength and heat-insulating external walls. However, the application of composite aluminum honeycomb panels in practice is still not well researched because it is difficult to determine the optimal core size and number of layers with the best structural organization and the least heat transfer.

In the article [6], three main mechanisms of heat transfer are systematically analyzed for a composite-aluminum honeycomb panel: thermal conduction, thermal convection, and thermal radiation. The influence of the geometric dimensions of the cell, including its height and wall thickness, on the process of heat transfer in stationary conditions was investigated by experimental methods.

With the help of the ANSYS software, taking into account the experimental data, a liquid-solid heat transfer model was created for the composite-aluminum honeycomb plate in order to simulate the steady-state heat transfer characteristics of single-layer and multi-layer composite sheets. As a result of the comparison, it was found that the values of the effective thermal conductivity of the composite-aluminum cellular panel under different boundary conditions and different geometric parameters are basically consistent with the experimental data.

Thus, the review of the latest research shows that, despite the diversity of research on the thermal efficiency of the external walls of buildings, the issue of choosing the material for the thermal insulation layer of multilayer wall panels and their geometric dimensions remains actual.

The purpose of the study: to determine the dependence of the amount of heat flow through a four-layer wall panel of a residential building on the material and thickness of the heat-insulating layer.

Presentation of the main material of the study. Calculated cases of the location of building materials in the layers of the wall panel and their coefficients of thermal conductivity are presented in the table 1.

Table 1

The location of building materials in the layers of the wall panel and their thermal conductivity coefficients λ, kcal $/(m \cdot h \cdot grad)$

	Wall panel layers			
Material of a layer	**Concrete inner textured layer**	**Cement fibrolite**	**Thermal insulation layer**	**Concrete outer textured layer**
Layer thickness, mm	**80**	**70**	**55, 70, 90, 110, 200**	**40**
Number of a layer / Calculation case number	**1**	**2**	**3**	**4**
1	1,400	0,130	mineral wool plates 0,060	1,400
2			peat insulation plates 0,055	
3			building felt 0,050	
4			urea-formaldehyde foam plastic (mipora) 0,045	
5			polystyrene foam 0,040	

The scheme of the arrangement of layers in a multilayer wall panel in relation to the interior and the environment is shown in Figure 1.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

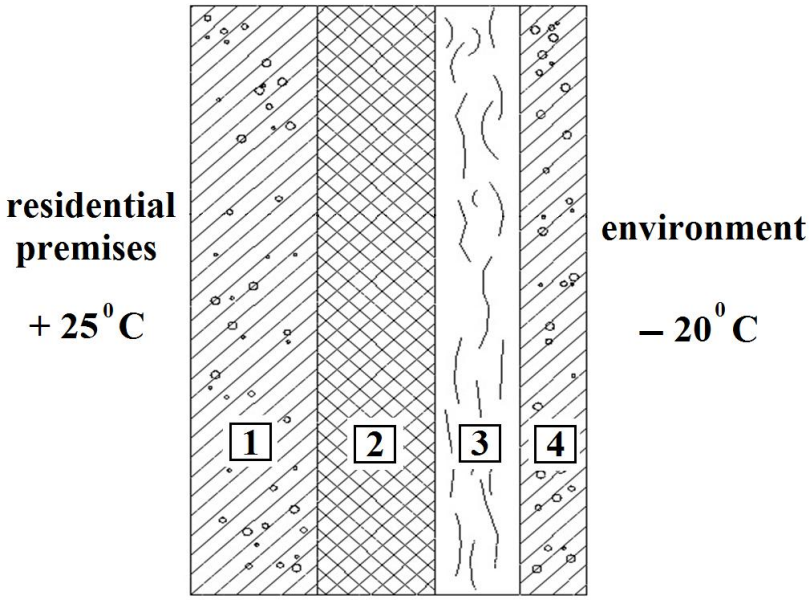


Figure 1 - Scheme of a multilayer external wall panel:
1 – concrete inner textured layer; 2 – cement fibrolite;
3 – thermal insulation layer; 4 – concrete outer textured layer

Figure 2 shows a graph of the heat flow through a four-layer wall panel for five cases of a thermal insulation layer.

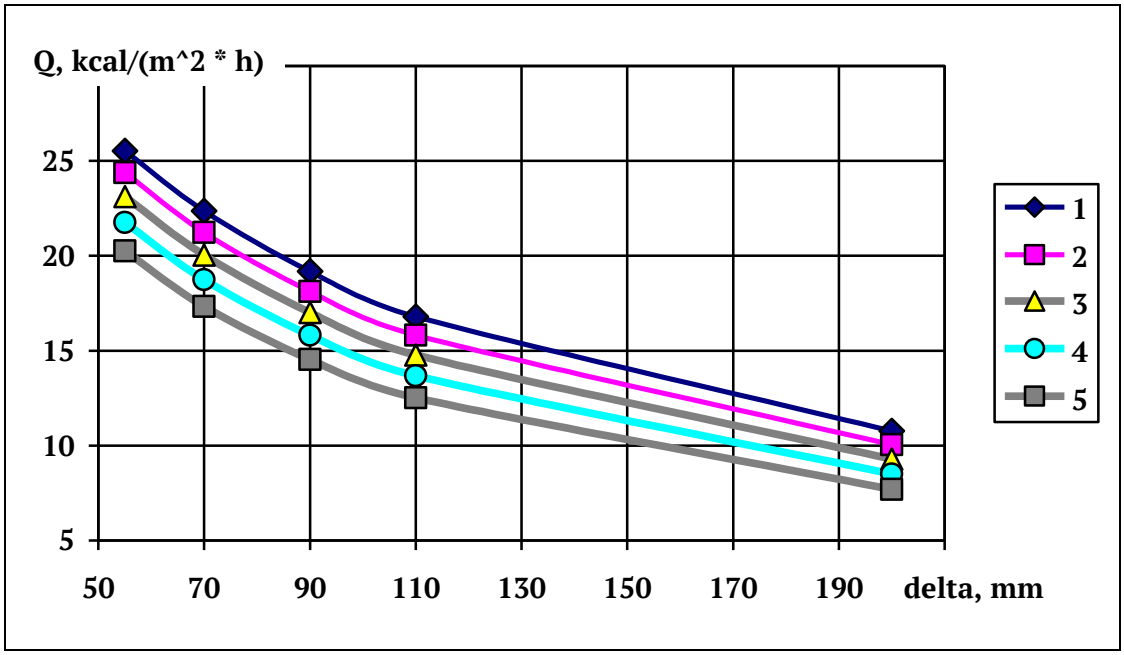


Figure 2 - Heat flow through a four-layer wall panel depending on the material and thickness of the heat-insulating layer:
1 – mineral wool plates; 2 – peat insulation plates; 3 – building felt;
4 – urea-formaldehyde foam plastic (mipora); 5 – polystyrene foam

The value of the heat flow Q of the curves in Figure 2 was obtained using the method described in [2].

Analysis of the curves in Figure 2 shows that reducing the heat flow through a multilayer external wall panel can be done in two ways:

– first, by increasing the thickness of the heat-insulating layer (at the same time, the optimal option is considered when the tangent to the curve in Figure 2 is almost horizontal at the selected thickness value);

– second, by choosing a heat-insulating material with the lowest possible coefficient of thermal conductivity. Among the listed materials is polystyrene foam.

The presented results at the XX International Conferences "Human and Space" [1] were tested.

Conclusions. In the course of the task, the following types of work were carried out and the following conclusions were obtained:

1) the problem of heat preservation and the need to use heat-protective coatings were considered;

2) the methodology and basic principles of conducting thermal calculations of a multilayer flat wall were studied;

3) stationary calculations of temperatures and heat flows through a four-layer flat wall using five types of heat-insulating materials were carried out;

4) graphs of the dependence of temperature and heat flow (given in the work) on the thickness of the multilayer wall, which allows to optimally choose a heat-protective coating and determine the thickness of the heat-insulating layer of the multilayer outer flat wall of a residential building were constructed;

5) ways of reducing the heat flow through a multilayer flat external wall panel of a residential building are proposed.

LITERATURE

1. Кравець О.В. Тепловий розрахунок багатошарової стінової панелі / О.В. Кравець, К.В. Махоніна. – XX Міжнародна наук.-практ. конф. „Людина і космос”. – Дніпро. – 11-13 квітня 2018. – С. 35.

2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

3. Chebah R. Passive Control and Stability of the Indoor Temperature of a Closed Cavity Based on the Process of Integrating Phase Change Materials / R. Chebah, A. Laouer, E. Mezaache // Energy Ecology and Environment. – 2022. – V. 8. – № 1. – Pp. 89-99.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

4. Chen L. A farmers market architecture and ventilation design and its airflow analysis / L. Chen, C. Huang, C. Xu // International Journal of Ventilation. – 2023. – V. 22. – № 1. – Pp. 3-23.
5. Wang D. Urban Thermal Environment and Surface Balance in 3D High-rise Compact Urban Models: Scaled Outdoor Experiments / D. Wang, Y. Shi, G. Chen, L. Zeng, J. Hang, Q. Wang // Building and Environment. – 2021. – V. 205. – № 11. – Pp. 115-122.
6. Wu M. Study on Thermal Performance of Single-layer and Multilayer Stone Aluminum Honeycomb Composite Panels / M.Wu, J. Liu // 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications. – China. – 2019, June, 29-30. – Pp. 672-685.

REFERENCES

1. Kravets O.V. Teplovyy rozrakhunok bahatosharovoyi stinovoyi paneli / O.V. Kravets, K.V. Makhonina. – XX Mizhnarodna nayk.-prakt. konf. „Ludina i kosmos" – Dnipro. – 11-13 kvitnya 2018. – P. 35.
2. Fokin K.F. Stroitelnaya teplotekhnika ograzhdauschikh chastey zdaniy / K.F. Fokin. – M.: Stroyizdat, 1973. – 287 p.
3. Chebah R. Passive Control and Stability of the Indoor Temperature of a Closed Cavity Based on the Process of Integrating Phase Change Materials / R. Chebah, A. Laouer, E. Mezaache // Energy Ecology and Environment. – 2022. – V. 8. – № 1. – Pp. 89-99.
4. Chen L. A farmers market architecture and ventilation design and its airflow analysis / L. Chen, C. Huang, C. Xu // International Journal of Ventilation. – 2023. – V. 22. – № 1. – Pp. 3-23.
5. Wang D. Urban Thermal Environment and Surface Balance in 3D High-rise Compact Urban Models: Scaled Outdoor Experiments / D. Wang, Y. Shi, G. Chen, L. Zeng, J. Hang, Q. Wang // Building and Environment. – 2021. – V. 205. – № 11. – Pp. 115-122.
6. Wu M. Study on Thermal Performance of Single-layer and Multilayer Stone Aluminum Honeycomb Composite Panels / M.Wu, J. Liu // 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Applications. – China. – 2019, June, 29-30. – Pp. 672-685.

Received 22.01.2024.
Accepted 24.01.2024.

Вплив матеріалу та товщини теплоізоляційного прошарку на тепловий потік крізь багатошарову зовнішню стінову панель житлового будинку

Враховуючи обмеженість на Землі невідновних органічних енергоресурсів, а також недостатню потужність відновних енергоджерел, актуальними стають питання про енергозбереження, взагалі, і збереження тепла у житлових приміщеннях, зокрема. Суттє во зменшити теплові втрати у приміщенні можна завдяки правильно підібраним теплоі

золяційним матеріалам та оптимальній товщини відповідного прошарку багатошарової зовнішньої стінової панелі. Даний напрямок досліджень сприяє вирішенню актуальної для України проблеми енергозбереження, одному з найважливіших напрямів технічної політики в галузі будівництва. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що в напрямку енергозбереження будівель проводяться різноманітні дослідження, а саме: теплообмін між тришаровою стінкою та замкненою порожниною, яка моделює приміщення; зміна поля температури повітря поблизу поверхні та поверхневий енергетичний баланс будівельних масивів за різних умов навколишнього середовища; дослідження впливу геометричних розмірів приміщення на вентиляцію повітря в ньому з урахуванням теплообміну між тілом людини та навколишнім середовищем; вплив на процес теплопередачі геометричних розмірів композитно алюмінієвої стільникової панелі. Але, враховуючи різноманітність теплоізоляційних матеріалів, залишаються актуальними питання по їх вибору та визначенню геометричних розмірів прошарків теплової ізоляції багатошарових зовнішніх стінових огороджень. Метою даної роботи є встановлення залежності величини теплового потоку крізь чотиришарову стінову панель житлового будинку від матеріалу та товщини теплоізоляційного прошарку. В роботі розглянуто проблему збереження тепла та необхідність застосування теплозахисних покриттів; проведено стаціонарні розрахунки температур та теплових потоків крізь багатошарову плоску стінку з використанням п'яти різновидів теплоізоляційних матеріалів; побудовано графіки залежностей теплового потоку від товщини багатошарової стінки, що дозволяє оптимально підібрати теплозахисне покриття та визначити товщину теплоізоляційного шару багатошарової зовнішньої плоскої стінки житлового будинку; запропоновано шляхи зменшення теплового потоку крізь багатошарову плоску зовнішню стінову панель житлового будинку.

Кравець Олена Володимирівна – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Махоніна Карина Володимирівна – бакалавр, кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Kravets Olena Volodymyrivna – candidate of physical and mathematical sciences, docent, docent of the Department of AeroHydro Mechanics and Energy and Mass Transfer, Oles Honchar Dnipro National University.

Makhonina Karina Volodymyrivna – bachelor, Department of AeroHydro Mechanics and Energy and Mass Transfer, Oles Honchar Dnipro National University.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-13
UDK 621.382.08(035.5)

M.I. Tverdostup

ON MEASURING THE COMPONENTS OF INDUCTIVE IMPEDANCE USING THE THREE VOLTMETER METHOD

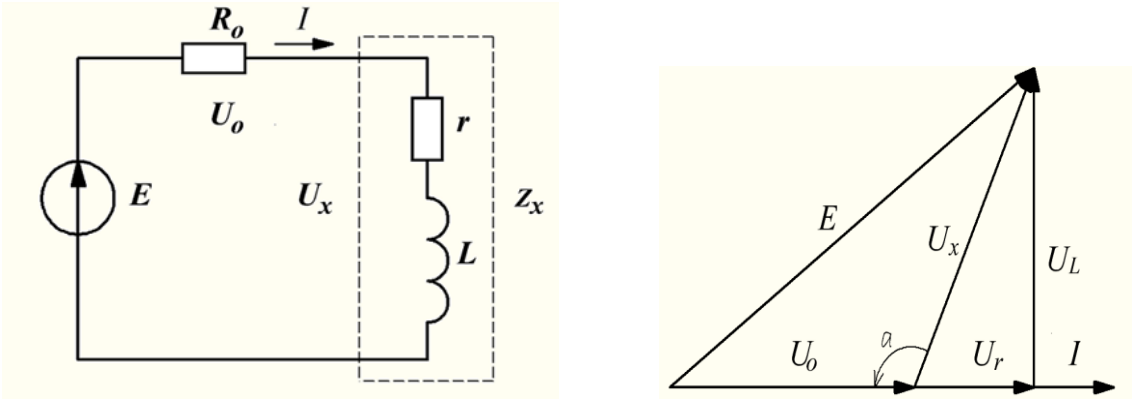
The possibilities of the three voltmeter method for measuring inductance and its active resistance, as well as their frequency characteristics, are investigated. It is established that that in the frequency ange up to 100 kHz, the measurement error of inductance is no more than 0.3%, active resistance 8.7%, and quality factor 5%.
Keywords: inductance, resistance, impedance, three voltmeter method, measurement, frequency response, quality factor, approximate measure.

Introduction. Among the methods of measuring inductive impedance, the three voltmeter method [1, 2] is used at industrial frequencies (50, 400 Hz) to determine the power consumed by the receiver of electrical energy, its active resistance, reactance, and total resistance. Comparison of the *Q*-meter and bridge methods used to measure impedance components in a wide frequency range with the three voltmeter method shows that the latter has an undeniable advantage - operational simplicity and convenience, which means that to measure the receiver parameters, it is enough to determine the voltage in three sections of an electrical circuit consisting of an electrical energy receiver and a series-connected reference active resistance.

Objective. To evaluate the capabilities of the three voltmeter method for measuring the components of inductive impedance and determining their frequency characteristics in the range above industrial frequencies.

The main part. Fig. 1 shows the equivalent circuit of the measuring circuit (a) for determining the components of the inductive impedance by the three voltmeter method and its vector diagram (b), where E is the voltage is the harmonic oscillator, R_o is the reference resistance, L, r are the inductance and active resistance of the measured impedance z_x , U_o, U_x are the voltage drop across the reference resistance and the measured impedance, U_L, U_r are the reactive and active components of the voltage U_x , I is the current in the measuring circuit. The impedances of the inductance z_x and the measuring circuit z are as follows

© Tverdostup M.I., 2024



a)b)

Figure 1 - Measuring circuit (a) and its vector diagram of voltages and current (b)

$$z_x = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}, \tag{1}$$

$$z = \sqrt{(R_o + r)^2 + \omega^2 L^2}, \tag{2}$$

where ω is the oscillation frequency of the harmonic oscillator E. For a series circuit, the impedance values can be represented as

$$z_x = R_o U_x / U_o, \quad z = R_o E / U_o. \tag{3}$$

The following system of equations follows from (1) to (3)

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} = R_o U_x / U_o, \tag{4}$$

$$\sqrt{(R_o + r)^2 + \omega^2 L^2} = R_o E / U_o, \tag{5}$$

whose solution allows us to obtain expressions for the active component of the inductive impedance

$$r = \frac{R_o}{2}\left(\frac{E^2 - U_x^2}{U_o^2} - 1\right) \tag{6}$$

and its inductance

$$L = \frac{R_o}{\omega}\sqrt{\frac{U_x^2}{U_o^2} - \frac{1}{4}\left(\frac{E^2 - U_x^2}{U_o^2} - 1\right)^2}. \tag{7}$$

From the last two expressions, it follows that the values of r and L can be found by measuring the voltages E, U_x and U_o, followed by calculation according to (6) and (7). It should be noted that the found components of the inductive impedance r and L will be real and positive if the following conditions are met

$$U_x^2 + U_o^2 \leq E^2 \leq (U_x + U_o)^2, \tag{8}$$

on the vector diagram (Fig. 1b), this means that the angle α can take on values in the limited range $\pi/2 \leqslant \alpha \leqslant \pi$.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

To determine the possibility of measuring the components of inductive impedance, the measuring circuit was assembled according to Fig. 1a. Coils from a set of exemplary inductance measures of type L - 0170 of class 0.2, category III, were used as the measured impedance. The measurements were performed at a frequency of 1 kHz with a В7-27А/1 voltmeter using a Г3-118 harmonic oscillator. An exemplary resistor of the МЛТ-2 type with an active resistance of 1475 Ω (at a frequency of 1 kHz) was chosen as an exemplary resistance R_o.

Table 1 shows the measurement results, where L_o is the nominal value of the inductance reference measures; $L_д$, $r_д$ are the actual values of the inductances and active resistance of the measures obtained by the bridge meter Е7-8; L, r are the inductance and active resistance of the reference measures determined by the method of three voltmeters.

Table 1

Measurement results of exemplary inductance measures

L_o, mH	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
$L_д$, mH	0,201	0,501	1	1,999	4,997	10	20,01	49,99	100	199,9
$r_д$, Ω	1,612	1,944	2,97	4,73	9,98	20,6	75,2	125,5	294	241
L, mH	0,225	0,518	0,997	1,984	4,907	9,99	19,9	49,98	99,97	200,5
r, Ω	1,499	1,999	2,987	4,948	11,67	20,7	76,92	125,6	292,7	217,6

Using the least squares method, linear regression equations for inductance were obtained $L = f(L_д)$

$$L = -0{,}0641 + 1{,}0026L_д \quad (9)$$

and active resistance $r = \varphi(r_д)$

$$r = 1{,}0182 + 0{,}9601r_д; \quad (10)$$

at a significance level of 0.001, the correlation coefficients were for inductance $r_L \approx 1$, for active resistance $r_r \approx 0{,}9983$; standard deviation of a single measurement of inductance $\sigma_L = 0{,}1168$ mH, active resistance

σ_r = 6,5419 Ω, the average relative error of inductance measurement was 0.3%, and of active resistance - 8.7%.

The results of the frequency response study are shown in Fig. 2.

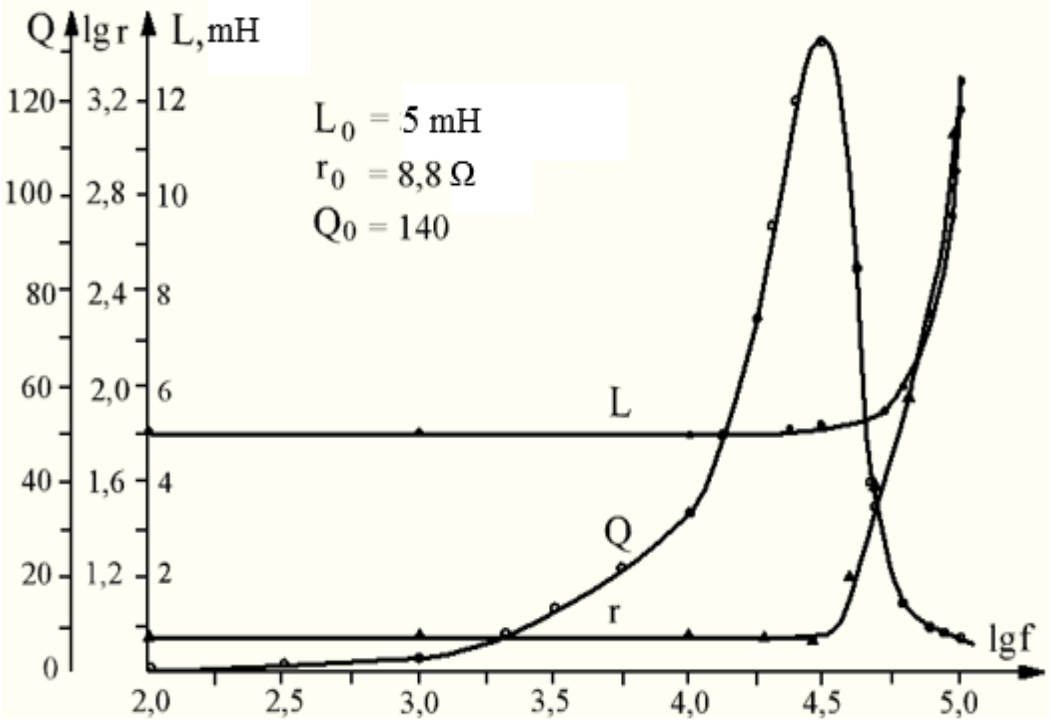


Figure 2 - Frequency characteristics of the inductance *L*, active resistance *r* and quality factor *Q* of the reference inductance measure L_o

The experimental frequency dependences of the inductance *L*, active resistance *r*, and *Q* factor were determined in the range of 0.1-100 kHz. A reference measure with an inductance of L_o = 5 mH, an ohmic resistance of 8.8 Ω and a *Q* factor of 140. The obtained dependences show that in the frequency range from 0.1 to 30 kHz, the active resistance *r* and inductance *L* remain practically unchanged with deviations within the experimental error. After 30 kHz, the active resistance *r* begins to increase its value, which can be explained by the growing influence of the proximity effect and the skin effect. An increase in inductance *L* is also observed due to the shunting effect of the distributed capacitance of the coil and the measuring circuit as a whole, which form a parallel circuit with the inductance with a certain natural resonance frequency f_o. As the frequency *f* increases at $f < f_o$, the impedance of the parallel circuit increases, which causes an apparent increase in the inductance *L*. This phenomenon introduces an error in the determination of inductance at frequencies close to the coil's natural resonance frequency. The error can be reduced by taking into account the value of the distributed capacitance, which requires consid-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

eration of a slightly different equivalent circuit diagram of the measuring circuit, which takes into account the interturn capacitance of the measured coil, input capacitances of measuring devices and connecting conductors. Frequency dependence of quality factor $Q = 2\pi fL/r$ of the tested reference inductance measure has a maximum of $Q = 133$ at a frequency of $f = 30$ kHz, the value of which differs by 5% from the Q-factor specified in the reference measure passport.

Conclusions. The results of the study allow us to draw the following conclusions:

- the method of three voltmeters is sufficiently simple to measure the components of inductive impedance at fixed frequencies above industrial ones; in the range up to 100 kHz, the relative error in determining inductance is no more than 0.3%, active resistance - 8.7%, and quality factor - 5%, which corresponds to the accuracy class of the used measuring devices;

- the method allows obtaining an informative characteristic in the form of frequency dependencies of the active resistance and inductance; this makes it possible to select a frequency range in which the interfering effect of the distributed capacitance is insignificant, as well as to find the optimal frequency at which the inductance quality factor is maximum;

- further improvement of the accuracy of determining the actual values of the inductive impedance components is possible by taking into account the shunting effect of the distributed capacitance.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ознакомление с методом трех вольтметров: веб-сайт.
URL: http//www.vunivere.ru/work 36704 (дата звернення: 29.08.2023).
2. Твердоступ Н.И. Особенности измерения индуктивного импеданса на низких частотах. *Системні технології*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 1(102). С. 87 - 92.

REFERENCES

1. Oznakomlenie s metodom threh voltmetrov: web-sait.
ULR http//www.vunivere.ru/work 36704 (data zvernennja: 23.08.2023).
2. Tverdostup N.I. Osobennosti izmereniya induktivnogo impedansa na nizkih tchastotah. *Systemni technologii*. Dnipropetrovsk, 2016. Vyp. 1(102). S. 87 - 93.

Received 23.01.2024.
Accepted 26.01.2024.

Про вимірювання складових індуктивного імпедансу методом трьох вольтметрів

Метод трьох вольтметрів дозволяє визначати складові індуктивного імпедансу вимірюванням напруг на досліджуваному імпедансі, на еталонному активному опорі і на виході джерела гармонійної напруги, яке живить вимірювальне коло. Проведено аналіз вимірювального кола до методу трьох вольтметрів, знайдені математичні вирази для розрахунку активного опору і індуктивності як складових досліджуваного імпедансу за результатами виміру трьох напруг. Щодо величин напруг на досліджуваному імпедансі, на еталонному активному опорі і на виході джерела гармонійної напруги обґрунтована умова, при виконанні якої отримані результати будуть дійсними. Методом трьох вольтметрів експериментально в діапазоні до 100 кГц визначені частотні характеристики активного опору, індуктивності і добротності еталонної котушки із набору зразкових мір індуктивності із заздалегідь відомими параметрами. Експериментальні частотні залежності вказують на наявність ділянки постійного значення складових імпедансу на низьких частотах. На частотах більше 30 кГц наявні ділянка зростання активної складової із за впливу ефекту близькості і скін ефекту та ділянка уявного збільшення індуктивності із за впливу розподіленої ємності котушки. Отримані характеристики дозволяють вибрати діапазон частот, в якому заважаючий вплив розподіленої ємності мінімальний а також визначити оптимальну частоту, при якій добротність індуктивності максимальна. Відносна похибка визначення індуктивності склала 0,3%, активного опору – 8,7%, добротності – 5%.

Твердоступ Микола Іванович – доцент, к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Tverdostup Mykola Ivanovych – Associate Professor of Computer Systems Engineering Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-14
UDC 004.415.2

I.V. Ponomarev

CREATION OF A DECENTRALIZED APPLICATION FOR SALES OF IMAGES USING IPFS

Abstract. Decentralized applications are more secure and reliable than centralized applications because they do not have a single point of failure or control. However, storing big data on the Ethereum blockchain is very expensive and, therefore, it is necessary to use special solutions for this. The development of a decentralized application for selling images using IPFS decentralized storage is considered.
Keywords: Decentralized application, blockchain, Ethereum, server, smart contract, Web 3.0, URL, IPFS, Web3, MetaMask.

Formulation of the problem. An image selling application must be always available to customers, reliable, protected from attacks and falsifications. Centralized applications have a single central server for processing information and storing images, which is the main point of failure of the entire system.

Therefore, for reliable operation, a decentralized application is needed, based on blockchain technology without a single master node, with control distributed among many nodes of the user network. Creating such an application is possible using the existing Ethereum blockchain platform based on smart contracts. Contracts are stored inside the Ethereum Virtual Machine (EVM) and can be accessed simply by accessing the blockchain network node [1, 2].

The decentralized application can be accessed through a web page that accesses the smart contract using a special library.

The web page itself, as well as all its components, such as images, CSS or JavaScript files, can be placed in storage such as the user's local computer or centralized hosting. At the same time, such storage remains a possible point of failure for the entire application, which is not completely decentralized.

And the problem of fault tolerance of the entire application remains unresolved. However, there are decentralized information storage and transmission envi-

© Ponomarev I.V., 2024

ronments, such as IPFS, Swarm or Filecoin, that make the application completely decentralized [3].

Purpose of the research. It is necessary to consider the possibilities of creating a completely reliable application based on the Ethereum platform. To do this, the image selling application must use the decentralized IPFS information storage and transmission environment.

IPFS provides opportunities for decentralized and free storage of files of any type. Therefore, the application logic will be located inside the Ethereum blockchain, and the data will be in IPFS, which will lead to a greater degree of decentralization and independence of the application.

When developing an application, it is necessary to take into account the features of connecting and working with IPFS.

Main part. There are two main approaches for creating web applications: centralized, often called Web 2.0 architecture, and decentralized, which is based on Web 3.0 architecture.

Web 2.0 architecture contains a client and a server. The client sends an HTTP request to the server and receives a generated HTML page in response. When interacting with page elements, it can re-initiate requests to the server. The server, in turn, receives requests and processes them in accordance with its algorithms. All information of such a web application is located in a database located on the server.

Web 3.0 represents the next generation of the World Wide Web, which is based on blockchain technology. The main feature of Web 3.0 architecture is decentralization and tokenization. Intermediaries are eliminated, such as centralized servers that store program data or logic. Instead, the application logic is represented by one or more smart contracts. Smart contracts are stored within the blockchain and can be accessed simply by accessing a node on the blockchain network.

In a centralized architecture, most information found on the Internet is hosted on centralized servers. To get information, you need to indicate where to look for it. For example, when a user wants to download an image file, he must specify the exact Uniform Resource Locator (URL) of that file. The disadvantage of centralized storage is that the server may be unavailable or have limited access.

Although the Ethereum blockchain supports large storage capacity per block, storing large files requires high costs. These shortcomings have limited the application of many blockchain applications.

Therefore, a new data storage technology was developed, the Interplanetary File System (IPFS), a peer-to-peer distributed file storage system and transfer proto-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

col for file sharing. Instead of specifying where to look for information, the user specifies what he wants to find. For each file, when uploaded to the network, its unique hash is calculated, which is used to access this resource. This mechanism has the following positive properties:

- hash search is fast,
- the file cannot be changed without the knowledge of other users and
- no duplicates of the same file.

IPFS can store any type of data, from a simple test file to full-fledged programs. Typically, the hash code is stored on the blockchain via a smart contract and then provided to the user.

It should also be noted that, like blockchain, files uploaded to the IPFS network cannot be modified. After all, after the change, it will be a completely different file, with a different hash. When you make changes to a file, a new file is downloaded, which will link to its previous version, which also remains on the network. IPFS works in such a way that if, when calculating the hash of a downloaded file, it was discovered that the file had already been downloaded previously, the system simply returns a link to the file that has already been downloaded to the network, without creating duplicates. This approach is certainly justified, because the network is not clogged with hundreds of copies of the same data [3].

Let's look at the features of working with decentralized IPFS storage.

The algorithm for accessing a decentralized application can be described as follows. When a user in a browser wants to access an application, he must contact the IPFS node from where he gets the application's web page. It contains control elements, upon interaction with which the corresponding JavaScript scripts are activated.

For interaction between the browser and the blockchain, the Web3.js library is used, which allows you to work with Ethereum network nodes using the Remote Procedure Call (RPC) protocol [3]. Thanks to the Web3.js library, you can use JavaScript language syntax to call smart contract functions. The library packages calls to the smart contract into transactions, which are then transmitted to the service provider, which in most cases will be the MetaMask cryptocurrency wallet. Next, the service provider can directly contact the Ethereum blockchain and transfer the finished transaction to it. In response, the client side receives data from the smart contract, which then, displaying the result, will make requests to the IPFS node to obtain the data (Fig. 1).

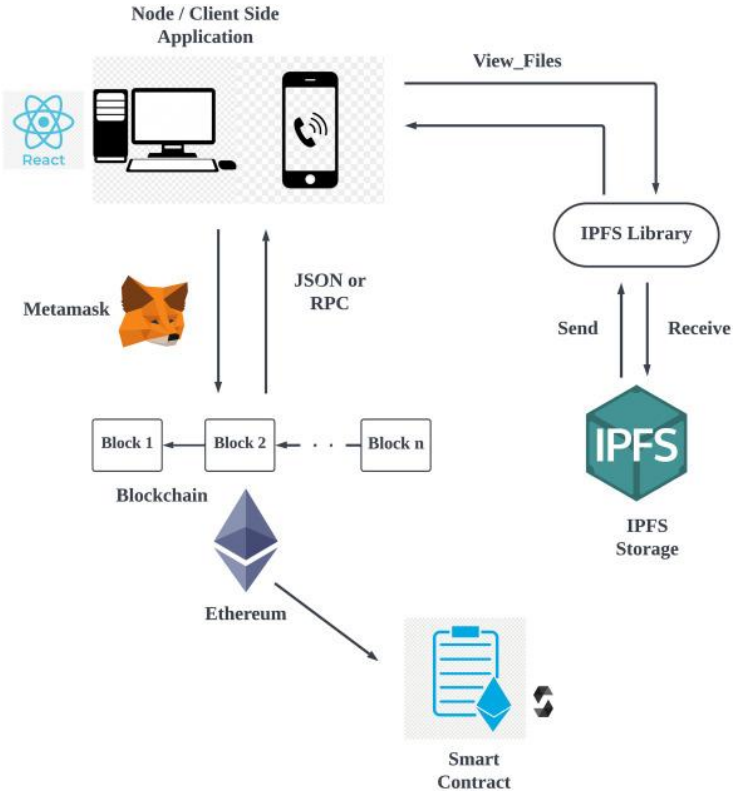


Figure 1 – Architecture of a decentralized application on the Ethereum blockchain using IPFS storage

An Image structure is created in the smart contract to store data about the image loaded into the application. This structure defines a cid field that contains the hash of the image returned after loading it into IPFS. When you add it to a URL with the structure "http://localhost:8080/ipfs/", you can get this image.

Since the application data will be located on the IPFS network, you must first configure a local IPFS node in the client part of the application. When a new image is uploaded to the application, the onSubmitHandler() function is called.

```
async onSubmitHandler(event) {
    event.preventDefault();
    const form = event.target;
    const files = form[3].files;
    const file = files[0];
    const ipfs = create({ url: "http://127.0.0.1:5001" });
    const result = await ipfs.add(file);
    this.props.uploadImage(
      result.path,
      parseInt(this.price.value),
      this.description.value
```


ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

```
    );
    form.reset();
}
```

First, the image file is received from the form. An object is created to interact with IPFS. To do this, first import the “ipfs-http-client” library, then call the create({url:""}) method, which is passed the address listened to by the IPFS node. This method returns the ipfs object used to load data into the IPFS network. The ipfs object calls the add() method, which is passed the image file received from the form. The add() method returns the hash of the image.

Next, a call is made to the smart contract function uploadNewImage(), which records this hash and other parameters of the new uploaded image. The advantage is that the smart contract stores a unique hash of the image, so there cannot be two copies of the same image.

Conclusions. The features of creating a decentralized application for selling images on the Ethereum blockchain platform using decentralized IPFS storage are considered. Availability and reliability of the application is achieved by placing smart contracts with the logic of the application on network nodes in the blockchain, and the client interface, data and images in IPFS storage.

LITERATURE

1. I.V. Ponomarev Development of a decentralized voting application using blockchain technology - Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(126). – Дніпро, 2020, - с. 104-110.
2. I.V. Ponomarev Features of creating a voting system using the Ethereum blockchain platform - Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(132). – Дніпро, 2021, - с. 124-129.
3. Narayan Prusty. Building Blockchain Projects: Building decentralized Blockchain applications with Ethereum and Solidity. — Packt Publishing, 2017. — 268 p.

REFERENCES

1. I.V. Ponomarev Development of a decentralized voting application using blockchain technology – System technologies: Regional interuniversity compendium of scientific works. Issue 1(126). – Dnipro, 2020, - P. 104-110.
2. I.V. Ponomarev Features of creating a voting system using the Ethereum blockchain platform - System technologies: Regional interuniversity compendium of scientific works. Issue 1(132). – Dnipro, 2021, - с. 124-129.
3. Narayan Prusty. Building Blockchain Projects: Building decentralized Blockchain applications with Ethereum and Solidity. — Packt Publishing, 2017. — 268 p.

Received 05.02.2024.
Accepted 09.02.2024.

Створення децентралізованого додатку продажу зображень з використанням IPFS

Додаток продажу зображень завжди має бути доступним для клієнтів, надійним, захищеним від атак та фальсифікацій. Централізована архітектура для додатку не підходить, оскільки має єдиний центральний сервер для обробки інформації та зберігання даних, який є основною точкою відмови всієї системи. Тому, для надійної роботи, потрібен децентралізований додаток, заснований на технології блокчейн без єдиного головного вузла, з управлінням, розподіленим між багатьма вузлами мережі користувачів.

Створення такого додатку можливе за допомогою блокчейна Ethereum на базі смарт-контрактів, які зберігаються всередині віртуальної машини Ethereum та доступні при зверненні до вузла блокчейн мережі. Доступ до децентралізованого додатку можна отримати через веб-сторінку, яка за допомогою спеціальної бібліотеки звертається до смарт-контракту.

Сама веб-сторінка, як і всі її складові, такі як зображення, CSS або JavaScript файли можуть бути розміщені в таких сховищах як локальний комп'ютер користувача або централізований хостинг. Такі сховища залишається можливою точкою відмови всього додатка, і проблема стійкості до відмови залишається не вирішеною.

Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати децентралізоване середовище зберігання та передачі даних IPFS.

IPFS надає можливості децентралізованого зберігання файлів будь-якого типу. При розробці додатку враховуються особливості підключення та роботи з IPFS. Для кожного файлу при завантаженні в мережу обчислюється його унікальний хеш, яким відбувається звернення до цього ресурсу. Хеш-код зберігається в блокчейні за допомогою смарт-контракту, а потім надається користувачеві.

Доступність та надійність децентралізованого додатку продажу зображень досягається за рахунок розміщення смарт-контрактів з логікою роботи на вузлах мережі в блокчейні, а клієнтського інтерфейсу, даних та зображень у сховищі IPFS.

Пономарьов Ігор Володимирович - кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин факультету фізики, електроніки та комп’ютерних систем Дніпровського національного університету ім.О.Гончара.

Ponomarev Igor Volodimirovich - candidate of technical sciences, associate professor of the department of electronic computers of the faculty of physics electronics and computer systems ofthe Oles Honchar Dnipro National University.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-15
UDC 004.8

A.S. Tonkoshkur, A.S. Lozovskyi

ALGORITHM FOR COMPUTER PROCESSING OF KINETIC DEPENDENCES OF THE RESPONSE OF A GAS SENSOR WITH INTELLIGENT COMPONENTS

Abstract. The purpose of the work is to develop an algorithm using intelligent components that will allow processing of experimental data of response kinetics of resistive gas sensors based on the algorithm of the model of the stretched exponential function of Kohlrausch Williams Watts, without operator intervention. The problems of implementing full automation of the information measuring system for the study of the main characteristics of gas sensitive sensors the selection of the most informative time interval are describe. The algorithm for processing the experimental kinetic dependence of the response of gas sensors based on the model of a stretched exponential function with intelligent components that allow choosing the most informative time interval from the processed kinetic dependences is present.
Keywords: algorithm, stretched exponential function, gas sensor, response, parameter calculation, automation, information and measurement system.

Introduction. The study of the kinetic dependences of the gas sensitivity of gas sensor materials allows us to obtain more accurate and detailed information about their characteristics, which is important in their search and practical use [1-3]. These dependencies are also of interest for monitoring finished gas sensors.

In practice, such measurements are fraught with some difficulties. This process usually takes a long time and requires multiple cycles of processing and analysis of large amounts of experimental data. To eliminate routine operations associated with the processing of experimental data, to increase the speed, accuracy and information content of the research process itself, it seems relevant to automate it using computer technology. In [4, 5] the prospects for solving such a problem by creating a specialized information and measurement system (IMS) are shown.

It should be note that one of the key components of the software of such IMS is the algorithmization of experimental data processing processes based on appropriate mathematical models [6-9]. For primary processing of data obtained from studies of gas sensors in [1, 4, 5], a phenomenological relaxation model is used based on the stretched exponential function Kohlrausch–Williams–Watts (KWW)

© Tonkoshkur A.S., Lozovskyi A.S., 2024

$f(t)=\exp[-(t/\tau)^{\beta}]$, where t - time, β and τ – parameters [10, 11]. It use to describe the kinetics of relaxation dependences of the response, in particular, at the stage of restoration of the gas sensitivity of the sensor.

As shown in [1], the use of this approach allows us to obtain significantly more information about the phenomena that determine the phenomenon of gas sensitivity of sensor materials. The data presented in [4] indicate the reality and effectiveness of computer processing of a significant amount of data in the process of carrying out the physical and chemical measurements under consideration.

However, the data processing algorithm used in this work does not allow the implementation of complete automation of the IMS for studying the main characteristics of gas-sensitive sensors. The main reason for this is the need to select a segment from the time dependence of the main parameter - sensitivity to the active gas, the data of which allows one to correctly estimate the parameter β of the KWW function, which approximates the kinetics of sensor recovery. These actions require the operator's direct participation in the data processing process. It should be note that in [12] an algorithm is proposed that makes it possible to exclude the participation of the operator in the process of processing and primary analysis of response kinetics measurement data. However, in this method, the value of the amplitude parameter S0 of such a stretched exponential function must be determined independently, which is not always possible.

As is known, one of the rapidly developing areas of ensuring the automation of computer processing of measurements is the use of artificial intelligence tools and methods [13]. These methods are used in systems for monitoring the physical properties of various materials [14, 15], measuring mechanical quantities (aircraft positions) [16, 17], testing and analyzing faults of electronic devices [18], etc.

In this paper, an algorithm based on a stretched exponential function with intelligence components is proposed and justified, which makes it possible to exclude the participation of the operator in the process of processing and primary analysis of measurement data of the response kinetics of resistive gas sensors.

Description of the algorithm. As already indicated, the advantage of the algorithm for processing and primary data analysis used in [1, 4, 5] is the absence of any additional assumptions. Only the results of measurements of the kinetic dependence of the sensor response S(t) are used. Accordingly, the approximating dependence used as a model for the primary phenomenological analysis of the experimental kinetic dependences of the response of a gas-sensitive sensor in the area after removal of the active gas was assume to be represented in the form

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

$$S(t) = S0 \cdot exp\left[-(t/\tau)^{\beta}\right]. \quad (1)$$

In accordance with [1, 19], the mathematical procedure for finding the value of the unknown coefficient β includes the following operations:

- numerical determination of the derivatives d log S(t) / dt based on the experimental kinetic dependence of the form (Fig. 1) and representation of this dependence in coordinates t×[d log S(t) / dt] and log S(t);

- visual selection of the area above the specified dependence, where the accepted model is applicable (i.e., the dependence becomes straight, and the coefficient β itself is the tangent of its angle) and calculation of the value

$$\beta=\Delta \{ t\times[d \log S(t) / dt]\}/ \Delta \log S(t); \quad (2)$$

Representation of the initial kinetic dependence in the selected area in coordinates ln S(t) and t^{β} (β - already known) and approximation of this dependence by a straight line allows you to determine the values of the remaining parameters of the KWW function using the following formulas

$$\tau=[-\Delta \ln S(t) / \Delta (t^{\beta})]^{-1/\beta} ; \; S0=\exp\{\ln S(t)+(t/\tau)^{\beta}\}. \quad (3)$$

The disadvantages of the algorithm under consideration, such as significant errors associated with the operation of numerical differentiation, the need to support the data processing process by a qualified operator when choosing the most informative time interval in the experimental kinetic dependence. One of the possible means of overcoming shortcomings, as well as in selecting analytical expressions that describe the dependence of these parameters on the influence of one or another factor specified by the research program, seems to be the use of components of methods that are known for solving artificial intelligence problems [20, 21].

Below it is proposed to use this approach to determine the parameters of the KWW function that approximates the experimental kinetic dependence and their dependence on one or another factor x. This algorithm eliminates the need for operator participation in the process of analyzing intermediate data.

A description of the main operations of the algorithm under consideration can be present as follows.

1. The entire time range of each (i-th) experimental dependence S(t) is divided into several intervals with a sufficient number of points for the numerical determination of the time derivative (for example, n=4).

2. These intervals are considered independent and are used to calculate several (n) sets of values for each of the parameters of the approximating KWW function (β, S0, τ). These sets can be presented in the form of tables $\{\beta_{k,j}\}$, $\{S0_{k,j}\}$ и $\{\tau_{k,j}\}$. Index *k* corresponds to the number of the factor value, the influence of which is study in this experiment (for example, temperature T). This index varies from 0 to (m-1), where m is the number of processed dependencies corresponding to different factor values. Index j is the number of the selected time segment of the relaxation dependence. j=0, 1, , n-1 (in the example given n=4), *k*=0, 1, …, m-1 (m=5).

It should be noted that the parameter values (β, S0, τ), found in different time intervals have some scatter, the presence of which can be associated with the influence of both a random factor and the general degree of approximation of the description of relaxation processes of this type using the KWW function.

Based on the data from each interval of the experimental relaxation dependence, the coefficients of the approximating expression of the form (1) were determined using the well-known least squares method [22].

The measure of the quality of the approximation was the root-mean-square error of the approximation, divided by the empirical average value (coefficient of variation), which is determined for each section of the relaxation dependence using the formula

$$v_{k,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^{N_k-1}\left[S_k^i - S0_{k,j}\cdot exp\left[-\left(t_k^i/\tau_{k,j}\right)\right]\right]^2/(N_k-1)}}{\sum_{i=0}^{N_k-1} S_k^i/N_k} \quad (4)$$

where t_k^i and S_k^i - are the time and response values for the j-th section of the k-th kinetic dependence (at the value of the operating measurement factor x_k. N_k – is the number of experimental points of the k-th kinetic dependence.

To select the optimal section of each relaxation dependence, the condition of minimum value of the corresponding root-mean-square error of approximation was used, that is, the rule, which for the k-th kinetic dependence has the form

IF $v_{k,jm} = min\left(v_{k,j}\right)$, THEN the *jm*-th set of parameter values is selected. (5)

It should be noted that to improve the quality of approximation, the size and location of the selected optimal area can be changed using other logical algorithms (for example, they can be expanded or shifted).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

The numerical values of the parameters β_k, $S0_k$ and τ_k selected in this way are used to analyze their dependence on the influence of the variable operating measurement factor x.

3. The choice of the type of formulas that analytically represent the dependencies β(x), S0(x) and τ(x), can be based on dividing them into two most general classes: monotonic (decreasing or increasing) and having an extremum. It was assumed that in the studied range of factor values, monotonic ones can be approximately described by the simplest regression equations of the form

$$\beta_1(x, a0, a1) = a0 + a1, \tag{6}$$

$$\beta_1(x, a0, a1, a2) = a0 + a1 \cdot x + a2 \cdot x^2, \tag{7}$$

and those having an extremum - by the formula

$$\beta_3(x. a0, a1, a2) = a1 \cdot exp\left[-\frac{(x-a1)^2}{2 \cdot a3^2}\right], \tag{8}$$

If necessary, a number of approximating functions can be expand and change. For the parameters of the KWW function parameters S0, τ you can also use similar approximations and procedures for their determination.

The values of the coefficients a0, a1 and a2 found by the least squares method, i.e. by minimizing the function

$$F_l(a1, a2, a3) = \sum_{k=0}^{n-1}[\beta_k - \beta_l(x_k, a0, a1, a2)]^2, \tag{9}$$

where *l*=1,2,3.

Analysis of the optimal use of approximating expressions (6)-(8) can be carried out on the basis of calculating the corresponding coefficients of variation a$v_l^{(z)}$ using formulas similar to expression (4). The notation z takes the values β, S0 and τ, respectively.

The justification for the final choice of the type of approximating formula thus made in accordance with the simplest production rules of the form (3):

IF $v_{lm}^{(z)} = min\left(v_l^{(z)}\right)$, THEN the *lm*-th approximating formula selected. (10)

Test results. An example of the experimental kinetic dependence of the response at the stage of restoration of a resistive gas sensor sample shown in Fig. 1.

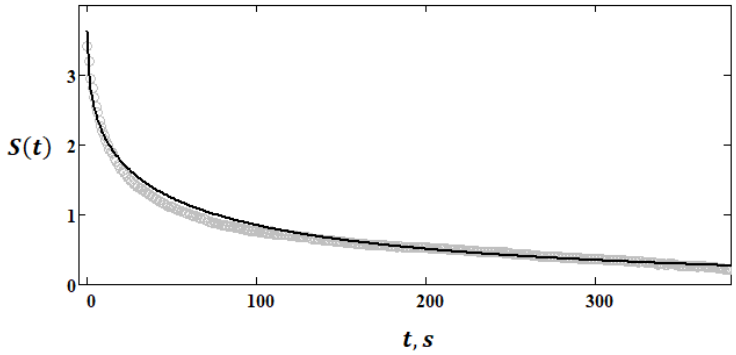


Figure 1 - Typical relaxation curve of the response of a gas sensor sample when restoring its original state. Experiment – thick curve of gray circles, approximation by a stretched exponential function – solid thin line

Below are illustrations of the actions that are implement by the described algorithm (Figures 2 and 3).

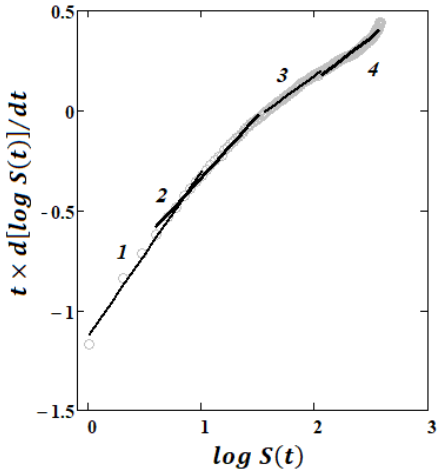


Figure 2 - Response relaxation curve Fig. 1 in coordinates {t×[d log S(t) / dt**]** and log S(t)**}.** Mugs are an experiment. Linear approximations at different time intervals (indicated by numbers 1, 2, 3 and 4) – solid line

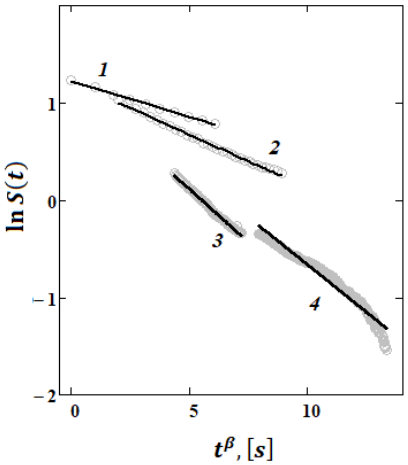


Figure 3 - Response relaxation curve Fig. 1 for different time intervals in coordinates {$lnS(t)$ и t^{β} }.

The remaining designations correspond to those adopted in Fig.2.

As can be seen from Fig. 2, the entire curve can be represented by linear dependencies in each of the 4 intervals, which allows using expression (2) to find the corresponding values of this parameter β_{kj} (k is the index of the processed kinetic dependence, j is the interval index).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

The unknown parameters τ и S0 were determined by applying formula (3) for each selected interval and the corresponding, already found, values $\beta_{k,j}$ (Fig.3).

Substituting the values $\{\beta_{k,j}\}$, $\{S0_{k,j}\}$ и $\{\tau_{k,j}\}$ into expressions (4) made it possible to obtain optimal values of the KWW - function parameters corresponding to condition (5) for each experimental kinetic dependence. In Figure 1 shows one of these approximations for comparison. As a result, tables of optimal values of the KWW parameters of the approximating functions $\{\beta_k=\beta_{k,jm}\}$, $\{S0_k=S0_{k,j}\}$ and $\{\tau_k=\tau_{k,j}\}$ were obtained. At the next stage, in accordance with the operations outlined in the third paragraph of the algorithm under consideration, the selection of analytical functions $\beta_l(x_k, a0, a1, a2)$, is made, which most accurately reflect the studied trends in changes in these parameters from the influence of a given factor (temperature).

The results of processing and analysis of data from experimental studies of the kinetics of the gas sensor recovery response and its dependence on temperature are shown in Fig. 4.

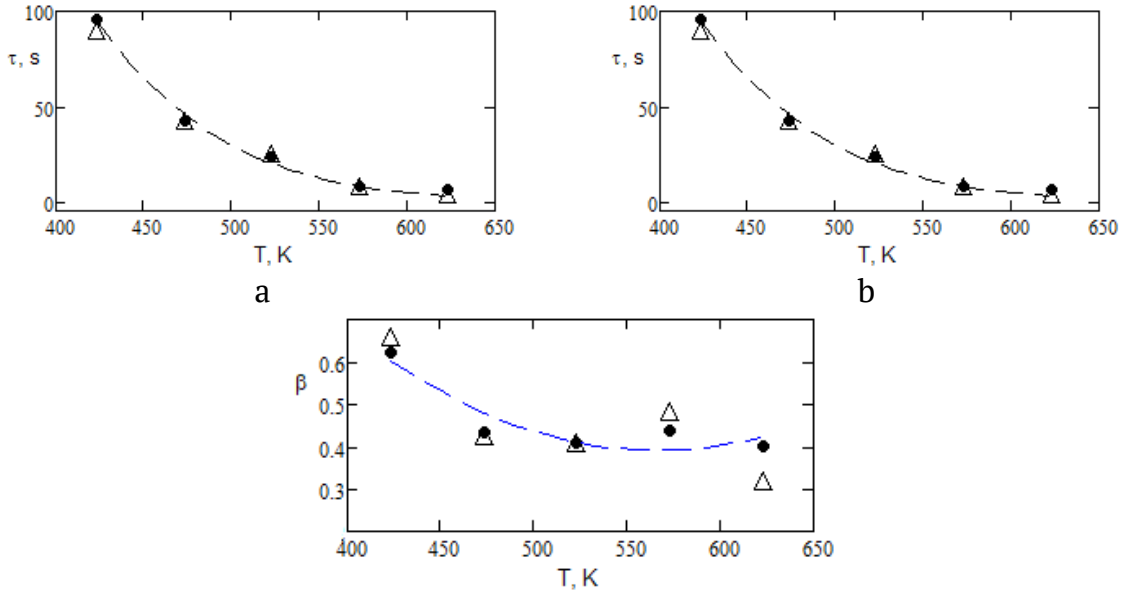


Figure 4 - The influence of temperature on the stationary (maximum) value of the response S0 (a) and the parameters that determine the relaxation process: characteristic time τ (b) and the elongation index of the duration of this process β (c) of a sample of zinc oxide ceramics with the addition of silver oxide (1,5 wt.%) after exposure to methane (relative concentration in air 0,005%). Circles – values obtained based on the proposed data processing, triangles – data [12], dotted line – approximation results

As can be seen, the given values of $\{\beta_k\}$, $\{S0_k\}$, $\{\tau_k\}$ and their dependences on temperature are in satisfactory agreement with data obtained by other methods [12, 23], as well as existing concepts [1].

Conclusions. An algorithm for processing the experimental kinetic dependence of the response of gas sensors is propose based on a model of a stretched exponential function with intelligent components that allow you to implement the choice:

- the most informative time interval of the processed kinetic dependencies for a more accurate assessment of all model parameters;

- optimal analytical expressions for representing trends in the influence on the parameters of the specified dependence of one or another external factor characterizing the measurement conditions.

The proposed algorithm seems promising for the implementation of automation of data processing when constructing and using information-measuring systems for studying gas-sensitive sensor materials and monitoring the parameters of gaseous media based on them.

REFERENCES

1. Tonkoshkur, A. S., Lyashkov, A. Y., & Povzlo, E. L. (2018). Kinetics of Response of ZnO-Ag Ceramics for Resistive Gas Sensor to the Impact of Methane, and its Analysis Using a Stretched Exponential Function. Sensors and Actuators B: Chemical. Vol. 255, Part 2. February, P. 1680-1686. https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.171

2. Acharyya, S., Nag, S., Kimbahune, S., Ghose, A., Pal, A., & Guha, P. K. (2021). Selective discrimination of VOCs applying gas sensing kinetic analysis over a metal oxide-based chemiresistive gas sensor. ACS sensors, 6(6), 2218-2224.

3. Saggu, I. S., Singh, S., Chen, K., Xuan, Z., Swihart, M. T., & Sharma, S. (2023). Ultrasensitive Room-Temperature NO2 Detection Using SnS2/MWCNT Composites and Accelerated Recovery Kinetics by UV Activation. ACS sensors, 8(1), 243-253

4. A.S. Tonkoshkur, A.S. Lozovskyi Application for calculating the parameters of a gas sensor from the experimental kinetic dependence of response. System technologies, 2021, 2(133): 26-32. DOI 10.34185/1562-9945-2-133-2021-04

5. A.S. Tonkoshkur, A.S. Lozovskyi Software for processing and analysis of experimental data in researching of gas sensors. System technologies, 2022, 1(138): 175-184. DOI 10.34185/1562-9945-1-138-2022-17

6. Грачева Н.Н, Руденко Н.Б., Литвинов В.Н. Специализированное программное обеспечение для научных исследований [Электронный ресурс]: учебное посо-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

бие– Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО ДГАУ, 2018. – 127 с.
7. Лазурик В. Т., Починок А. В. Модель компьютерной обработки и анализа экспериментальных данных при исследовании плазменного источника ультрафиолета. Вісник Харківського національного університету Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»2008. № 833. с.149-162.
8. Пыхалов А. А., Лам З. В., Белозерцева О. П. Математическое моделирование для компьютерной обработки сканирования твердых деформируемых тел при построении и анализе их конечно-элементных моделей //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – №. 3 (134). С. 93-111
9. Шмелев О. Я., Королев В. Ф. О компьютерной обработке результатов измерений //Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – №. 9. – С. 50-53.
10. Simdyankin S I. & Mousseau N. Relationship between dynamical heteroge¬neities and stretched exponential relaxation // Physical Review E. - 2003. - 68 (4). - P.104-110.
11. Trzmiel J., Weron K., Janczura J. & Placzek-Popko E. Properties of the re¬laxation time distribution underlying the Kohlrausch-Williams-Watts photoionization of the DX centers in Cdl-xMnxTe mixed crystals // Jour¬nal of Physics Condensed Matter. - 2009. 21'(34). - P.345801.
12. A.S. Tonkoshkur, A.S. Lozovskyi Algorithm for processing gas sensor’s response kinetics data using extended exponential function without numerical differentiation. System technologies, 2023, 1 (144): 24-34. DOI 10.34185/1562-9945-1-144-2023-04
13. Selezneva M. S., Neusypin K. A. Development of a measurement complex with intelligent component //Measurement Techniques. – 2016. – Т. 59. – С. 916-922
14. Pawłowski, M., Kamiński, P., Kozłowski, R., Jankowski, S., & Wierzbowski, M. (2005). Intelligent measuring system for characterisation of defect centres in semi-insulating materials by photoinduced transient spectroscopy. Metrology and Measurement Systems, 12(2), 207-228.
15. Selivanova, Z. M., Kurenkov, D. S., Trapeznikova, O. V., & Nagornova, I. V. (2020, May). Intelligent information-measuring system for operational control of thermophysical properties of heat insulating materials. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1546, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

16. Shen, K., Selezneva, M. S., Neusypin, K. A., & Proletarsky, A. V. (2017). Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles. Metrology and measurement systems, 347-356.
17. Yunpeng, W., Ruixin, Y., Shaojun, N., & Zonglin, J. (2020). Deep-learning-based intelligent force measurement system using in a shock tunnel. 力学学报, 52(5), 1304-1313
18.Orlov S. P., Vasilchenko A. N. Intelligent measuring system for testing and failure analysis of electronic devices //2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE, 2016. – С. 401-403.
19. Тонкошкур О.С., Повзло Є.Л. Алгоритм обробки даних кінетики відгуку резистивного газового сенсору на основі моделі розтягнутої експоненціальної функції. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 1′(108) – Дніпропетровськ, 2017. – С. 129-134
20 Методи та системи штучного інтелекту: Навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050101«Комп’ютерні науки» А.С. Савченко, О. О. Синельніков. – К. : НАУ, 2017. – 190 с.
21 Булкин В. И., Шаронова Н. В. Математические модели знаний и их реализация с помощью алгебропредикатных структур //Булкин ВИ, Шаронова НВ– Национальный технический университет «ХПИ», Макеевский экономикогуманитарный институт. Изд.: Дмитренко ЛР, Донецк. – 2010. – 304. с.
22. Шуп Е. Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. – Мир, 1982.- 230 с.
23. Lozovskyi, A., Lyashkov, A., Gomilko, I., & Tonkoshkur, A. (2023). Implementation of computer processing of relaxation processes investigation data using extended exponential function. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 13(3), 51-55.

Received 07.02.2024.
Accepted 15.02.2024.

Алгоритм комп'ютерної обробки кінетичних залежностей відгуку газового сенсора з інтелектуальними компонентами

Метою роботи є розробка алгоритму з використанням інтелектуальними компонентами, що дозволить забезпечувати обробку експериментальних даних кінетики відгуку резистивних газових сенсорів на основі алгоритму моделі розтягнутої експоненційної функції Кольрауша-Вільямса-Уоттса, без втручання оператора.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

У даній статті розглядаються особливості алгоритму для розрахунку параметрім необхідних для обробки експериментальних даних для вирішення задач автоматизації досліджень матеріалів для газочутливих сенсорів.

У статті описано проблеми реалізації повної автоматизації інформаційно-вимірювальної системи для дослідження основних характеристик газочутливих сенсорів, а саме вибору найбільш інформативного інтервалу часу та оптимальних аналітичних виразів уявлення тенденцій впливу параметрів зазначеної залежності того чи іншого зовнішнього чинника, що характеризують умови вимірювання. Наведено алгоритм обробки експериментальної кінетичної залежності відгуку газових сенсорів на основі моделі розтягнутої експоненціальної функції з інтелектуальними складовими, які дозволяють вибрати найбільш інформативний інтервал часу з оброблених кінетичних залежностей.

Використання запропонованого алгоритму узгоджується з даними, отриманими іншими методами, а також існуючими концепціями.

Алгоритм видається перспективним для реалізації автоматизації обробки даних при побудові та застосуванні інформаційно-вимірювальних систем для дослідження газочутливих сенсорних матеріалів.

Tonkoshkur Oleksandr Serhiiovysh - professor of department of ECM, Oles Honchar Dnipro National University.
Lozovskyi Andrii Serhiiovysh - assistant of department of ECM, Oles Honchar Dnipro National University.

Тонкошкур Олександр Сергійович - професор кафедри ЕОМ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.
Лозовський Андрій Сергійович - аспірант кафедри ЕОМ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-16
УДК 681.3.07

В.С. Хандецький, Н.В. Карпенко

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ФРЕЙМІВ У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ IEEE 802.1

Анотація. Проаналізовано механізм блочної передачі фреймів у бездротових комп'ютерних мережах IEEE 802.11 DCF з інфраструктурною топологією. У захищеному режимі визначено залежність пропускної здатності мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці. Показано, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі, особливо в діапазоні високих швидкостей передачі. При помітному збільшенні інтенсивності завад передача блоків ускладняється. Вже при BER=10^{-6} і кількості фреймів понад 10 у ряді випадків виникає необхідність здійснення повторних передач викривлених у блоці фреймів, а при BER=10^{-5} повторних передач стає багато і результуюча пропускна здатність мережі стає незначною.
Ключові слова: бездротові комп'ютерні мережі IEEE 802.11, блочна передача фреймів, пропускна здатність, інтенсивність завад.

Вступ. В інфраструктурних схемах бездротових комп'ютерних мереж WLANs, які базуються на використанні функції DSF (distributed coordination function) і механізму CSMA/CA, станція STA (STAtion) посилає фрейм у випадку звільнення каналу передачі після очікування закінчення DIFS (distributed inter-frame space) інтервалу і роботи механізму вибору слоту для передачі (backoff mechanism). Якщо цей фрейм є коректно прийнятим точка доступу AP (Access Point) відсилає зворотно квитанцію ACK (ACKnowledgment) після короткого міжфреймового інтервалу SIFS (short inter-frame space). Цей інтервал є необхідним фізичному рівню (PHY) AP для переходу від стану прийому у стан передачі повідомлення. Усі інші станції WLAN відтермінують боротьбу за доступ до каналу до завершення передачі ACK повідомлення. Після цього усі STAs очікують закінчення інтервалу DIFS та анулюють backoff – лічильники для початку наступного раунду передачі фрейму.

У випадку колізій чи пошкодження фрейму завадами AP не може декодувати фрейм і не посилає зворотно станції ACK. Станція-відправник STA очікує одержання потенційного ACK до закінчення відповідного таймауту, і у разі

© Хандецький В.С., Карпенко Н.В., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

одержання починає процедуру backoff перед передачею. Тривалість слоту, що використовується в процесі backoff, залежить від швидкості роботи техніки фізичного рівня.

Постановка задачі. На основі аналізу механізму блочної передачі фреймів у захищеному режимі визначити залежність пропускної здатності бездротової мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці. Розглянути вплив інтенсивності завад у каналі передачі на величину пропускної здатності.

Основна частина. В ідеальному випадку, коли в каналі відсутні помилки і не трапляються колізії в будь-якому циклі передачі, активною є тільки одна STA, яка завжди має відкладений (backlogged) фрейм для передачі. Цей відкладений фрейм знаходиться в черзі між MAC і його сусіднім вищим рівнем очікуючи відправлення. Середня тривалість процесу backoff дорівнює:

$$T_{\overline{CW}} = \frac{\sigma \cdot (CW_{\min} - 1)}{2}, \tag{1}$$

де σ позначає тривалість вільного слоту, $CW_{\min}$ – мінімальна довжина конкурентного вікна. При цьому ідеальна пропускна здатність каналу може бути визначена як

$$S_{ideal}^{DCF} = S_1 = \frac{L_{data}}{T_{DIFS} + T_{\overline{CW}} + T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS} + T_{ACK} + 2\delta}, \tag{2}$$

де L_{data} – довжина поля даних фрейму, T_{PHYhdr} – довжина заголовку фізичного рівня фрейму, R – фізична швидкість передачі даних, δ – час передачі сигналу по каналу зв'язку.

Для зменшення накладних витрат був запропонований механізм передачі з використанням блоків фреймів [1, 2]. Цей механізм передбачає, що блок фреймів, призначених одному одержувачу, може бути відправлений без підтвердження факту коректного прийому точкою доступу AP кожного фрейму окремо. Після відправлення блоку відправник (STA) формує і відправляє до AP Block ACK Request (BAR) фрейм із запитом номерів фреймів у блоці, які успішно прийняті. Після цього AP відповідає Block ACK (BA) фреймом.

Блочна передача в захищеному режимі передбачає наступне. Відправник (STA) змагається за доступ до каналу для першого фрейму блока. Якщо він виграв змагання за доступ, починається передача першого фрейму, і після одержання підтвердження ACK на нього і короткого роздільного інтервалу SIFS, станція STA передає цілий блок фреймів, який супроводжується службовим

фреймом BAR. Після цього передача припиняється до одержання BA фрейму від AP. Після одержання BA фрейму, підтверджуючого коректний прийом усього блоку чи його частини, відправник починає новий етап змагання за доступ до каналу. Схема блочної передачі фреймів показана на рис. 1.

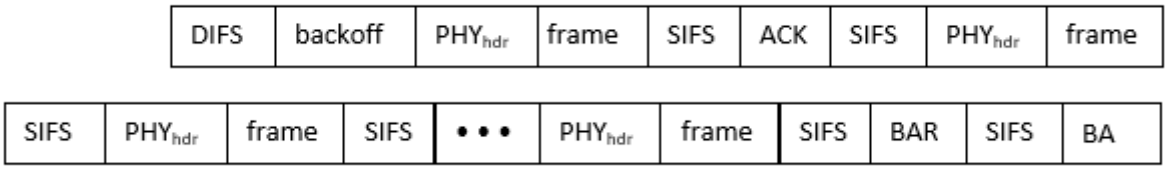


Рисунок 1 – Схема передачі блоку фреймів

Якщо захисний механізм не використовується, то навіть у випадку, коли головний фрейм блоку знаходиться у колізії з фреймами, які передаються іншими станціями, ці станції будуть продовжувати передачу фреймів у блоках і колізії будуть тривати, поки не буде визначений сам факт колізії. Це може бути причиною суттєвого зменшення продуктивності передачі даних [2].

Припустимо, що інфраструктурний домен WLAN містить N станцій, які використовують однакові швидкості передачі фреймів. Усі вони генерують трафік однакового пріоритету і, таким чином, мають рівні імовірності виграти змагання за доступ до каналу. Ми також припустимо, що станції працюють в умовах насичення, тобто блок є завжди доступним в черзі для передачі. Слід зауважити, що при передачі станції стикаються з однаковими канальними умовами, тобто параметр шуму BER (Bit Error Rate) у каналі є однаковим для усіх.

У випадку незначного шуму пропускну здатність мережі при використанні механізму блочної передачі (рис. 1) можна виразити наступним чином:

$$S_k = \frac{(k+1)\cdot L_{data}}{T_{DIFS} + T_{\overline{CW}} + T_{ACK} + T_{SIFS} + (k+1)T_F + T_{BAR} + T_{SIFS} + T_{BA} + 2\delta}, \qquad (3)$$

де k – це кількість фреймів у блоці, $T_F = T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS}$.

Для оцінки значень S_k використовувались наступні дані, наведені в [1, 3] для технологій IEEE 802.11n,ac: $SIFS$ = 16 μs, тривалість часового слоту – 9 μs, $DIFS$ = 34 μs, $PHYhdr$ = 20 μs, $CW_{\min}$=16, 2δ=0,7 μs, $TBAR$ = 21,8 μs, TBA = 31 μs. Графіки залежностей $S_1(R)$ і $S_k(k, R)$ наведені на рис. 2.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

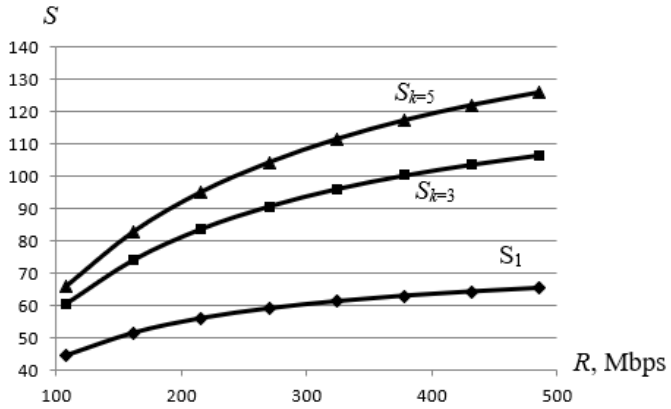


Рисунок 2 – Залежність пропускної здатності мережі S від швидкості R при передачі окремими фреймами $S_1(R)$ і блоками з трьох $S_{k=3}(R)$ і п'яти $S_{k=5}(R)$ фреймів в захищеному режимі

Із графіків видно, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі. Цей ефект посилюється при більш високих швидкостях передачі.

Для більш детального визначення впливу параметру k на пропускну здатність мережі побудовані залежності для трьох швидкостей передачі R = 108, 270, 432 Mbps (рис. 3).

Із графіків видно, що на початкових етапах спостерігається суттєве зростання пропускної здатності мережі S із збільшенням кількості фреймів k у передаваємому блоці. Але далі графіки стають більш пологими, тобто спостерігається їх входження в режим насичення. Граничне значення S при $k \to \infty$ дорівнює

$$S_{k\to\infty} = \frac{L_{data}}{T_{PHYhdr} + \frac{L_{data}}{R} + T_{SIFS}}, \quad (4)$$

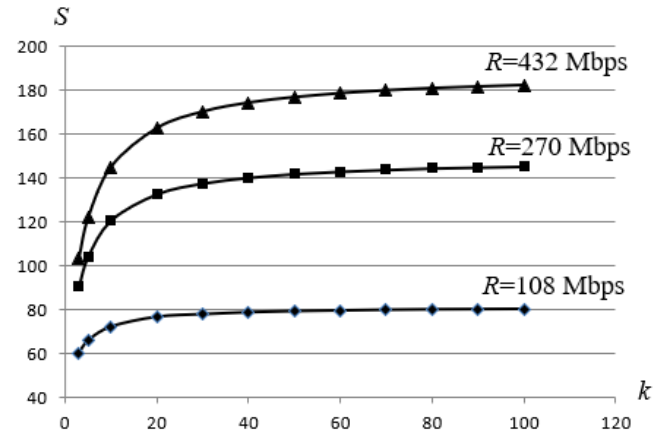


Рисунок 3 – Залежності пропускної здатності мережі S при блочній передачі від кількості k фреймів у блоці і швидкості R передачі

Збільшення інтенсивності завад в оточуючому середовищі бездротової мережі приводить до того, що частка пошкоджених при передачі фреймів стає помітною. При цьому збільшення довжини передаваємого масиву даних приводить до збільшення імовірності їх пошкодження.

Імовірність успішної (безпомилкової) передачі блоку даних Block Frames Error Rate (BFER) з високим ступенем достовірності можна визначити наступним чином [4, 5]:

$$P_S = (1 - P_C)(1 - P_B) = (1 - P_C)(1 - P_b)^L, \quad (5)$$

де P_C – це імовірність колізії в ідеальному каналі; P_B – імовірність викривлення даних блоку завадами при передачі (BFER); P_b – імовірність викривлення одного біту даних, чи, інакше, BER [6]; L – загальна довжина масиву даних блоку в бітах.

Проаналізуємо вплив інтенсивності зовнішніх завад, чи, інакше кажучи, рівня помилок у каналі зв'язку, на імовірність успішної передачі блоку фреймів. Оскільки, відповідно до (5), вплив імовірностей колізій P_C і зовнішніх завад P_b здійснюється на P_S окремо [7], то можна не втрачаючи достовірності аналізу прирівняти P_C до нуля.

У табл. 1 наведено значення імовірності безпомилкової передачі блоку фреймів P_S при різних значеннях k для трьох рівней P_b = BER =10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}. Як видно з наведених в таблиці даних, передача блоку вже при BER = 10^{-6} і $k > 8$ у ряді випадків призводить до необхідності здійснення повторних передач викривлених у блоці фреймів, а при BER = 10^{-5} і $k > 3$ взагалі має мало сенсу, бо результуюча пропускна здатність буде малою. Тому у випадку значної інтенсивності завад доцільно формувати блоки з невеликою кількістю фреймів, враховуючи також природу залежностей, представлених на рис. 3.

Висновки. Проаналізовано механізм блочної передачі фреймів в бездротових комп'ютерних мережах IEEE 802.11 з інфраструктурною топологією, які базуються на використанні функції DCF у рамках механізму CSMA/CA. У захищеному режимі визначені залежності пропускної здатності мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці в умовах незначної інтенсивності шуму. Показано, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі. Цей ефект посилюється з підвищенням швидкості передачі.

При збільшенні кількості фреймів у блоці за межі 20-40 фреймів, в залежності від швидкості передачі, зростання пропускної здатності

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

уповільнюється і в подальшому переходить у режим насичення.

Одержані результати показують, що при збільшенні інтенсивності завад передача блоків ускладняється. Вже при BER=10^{-6} і $k > 8$ у ряді випадків виникає необхідність здійснення повторних передач викривлених в блоці фреймів, а при BER=10^{-5} і $k > 3$ повторних передач стає багато і результуюча пропускна здатність мережі буде невеликою. Тому у випадку значної інтенсивності завад доцільно формувати блоки з невеликою кількістю фреймів, враховуючи характер залежностей $S(R, k)$.

Таблиця 1

Залежності P_S від k при різній інтенсивності завад P_b

BER=P_b=10^{-7}											
P_S	0,999	0,998	0,996	0,995	0,994	0,993	0,990	0,988	0,982	0,976	0,965
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
BER=P_b=10^{-6}											
P_S	0,988	0,976	0,965	0,953	0,942	0,931	0,908	0,887	0,835	0,787	0,697
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30
BER=P_b=10^{-5}											
P_S	0,887	0,787	0,697	0,619	0,549	0,487	0,383	0,301	0,165	0,09	0,03
k	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30

ЛІТЕРАТУРА

1. Li T. Performance analysis of the IEEE 802e block ACK scheme in a noisy channel / T. Li, Q. Ni, T. Turletti, Y. Xiao // Proc. IEEE Broadnet 2005.-Vol.1.-Oct. 2005.-P.511-517.

2. Li H. Throughput and delay analysis of IEEE 802.11e Block ACK with channel errors / H. Lee, I. Tinnirello, Y, Yu, S. Choi // Proc. 2nd Int. Conf. on Communication Systems Software and Middleware. – Jan. 2007. – P. 406-418.

3. Chang Z. Performance analysis of IEEE 802.11ac DCF with hidden nodes / Z. Chang, O. Alanen, T.Huovinen, T. Nihtila, E.H. Ong, J, Kneckt and T. Ristaniemi //IEEE 978-1-4673-0990-5/12/2012. – 5 p.

4. Khandetskyi V.S. Modeling of IEEE 802.11 computer networks at increased interference intensity / V.S. Khandetskyi, N.V. Karpenko // Radio Electronics, Computer Sciences, Control. – 2022. – No.2. – P.132-139.

5. Khandetskyi V.S. Optimizing the action of IEEE 802.11 computer networks at significant level of bit error rate / V.S. Khandetskyi // System Technologies. – 2023. – No.1 (144). – P.36-43.
6. Ouyang M. Optimal interference range for minimum Bayes risk in binomial and Poisson wireless networks / M. Ouyang, W. Shi, R. Zhang, W. Liu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2019:247. – 12 p.
7. Bozkurt A. Optimal delay analysis for real-time traffics over IEEE 802.11 wireless LANs / A. Bozrurt // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016:19. – 11 p.

REFERENCES

1. Li T. Performance analysis of the IEEE 802e block ACK scheme in a noisy channel / T. Li, Q. Ni, T. Turletti, Y. Xiao // Proc. IEEE Broadnet 2005.-Vol.1.-Oct. 2005.-P.511-517.
2. Li H. Throughput and delay analysis of IEEE 802.11e Block ACK with channel errors / H. Lee, I. Tinnirello, Y, Yu, S. Choi // Proc. 2nd Int. Conf. on Communication Systems Software and Middleware. – Jan. 2007. – P. 406-418.
3. Chang Z. Performance analysis of IEEE 802.11ac DCF with hidden nodes / Z. Chang, O. Alanen, T.Huovinen, T. Nihtila, E.H. Ong, J, Kneckt and T. Ristaniemi //IEEE 978-1-4673-0990-5/12/2012. – 5 p.
4. Khandetskyi V.S. Modeling of IEEE 802.11 computer networks at increased interference intensity / V.S. Khandetskyi, N.V. Karpenko // Radio Electronics, Computer Sciences, Control. – 2022. – No.2. – P.132-139.
5. Khandetskyi V.S. Optimizing the action of IEEE 802.11 computer networks at significant level of bit error rate / V.S. Khandetskyi // System Technologies. – 2023. – No.1 (144). – P.36-43.
6. Ouyang M. Optimal interference range for minimum Bayes risk in binomial and Poisson wireless networks / M. Ouyang, W. Shi, R. Zhang, W. Liu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2019:247. – 12 p.
Bozkurt A. Optimal delay analysis for real-time traffics over IEEE 802.11 wireless LANs / A. Bozrurt // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016:19. – 11 p.

Received 12.02.2024.
Accepted 16.02.2024.

Analysis of the efficiency of block frame transmission in IEEE 802.11 computer networks

In infrastructure schemes of WLANs wireless computer networks, which are based on the use of the DSF (distributed coordination function) function and the CSMA/CA

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

mechanism, the station STA (STAtion) sends a frame if the transmission channel is released after waiting for the end of the DIFS (distributed interframe space) interval and operation of the slot selection mechanism for transmission (backoff mechanism).

In case of collisions or damage to the frame by interference, the AP cannot decode the frame and does not send it back to the ACS station. The sending station STA waits for the receipt of a potential ASK before the expiration of the corresponding timeout, and in case of receipt, starts the backoff procedure before transmission. The duration of the slot used in the backoff process depends on the speed of the physical layer technology.

To reduce overhead, a transmission mechanism using frame blocks was proposed. This mechanism assumes that a block of frames intended for one recipient can be sent without confirming the fact of correct reception by the AP access point of each frame separately. In this case, the sender (STA) competes for access to the channel for the first frame of the block. If it wins the access competition, the transmission of the first frame begins, and after receiving the ACK acknowledgment for it and a short SIFS separation interval, the STA transmits a whole block of frames, which is accompanied by a BAR service frame.

The mechanism of frames block transmission in wireless computer networks IEEE 802.11 DCF with infrastructure topology has been analyzed. In protected mode, the dependencies of network throughput on data transmission rate and the number of frames in a block are determined. It is shown that the mechanism of block transmission significantly increases the network throughput, especially in the range of higher transmission rates. With a marked increase in the intensity of interference the transmission of blocks becomes more complicated. Already with BER=10^{-6} and the frames number of the order of 10 and more, in some cases there is a need to retransmit distorted in a block frames, and at BER=10^{-5} there are many retransmissions, so the resulting network throughput becomes small.

Хандецький Володимир Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Карпенко Надія Валеріївна, к.ф.-м.н., доцент кафедри ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Khandetskyi Volodymyr – Doctor of Sciences, Professor, Head of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

Karpenko Nadiia Ph.D in Physics and Mathematical Sciences, Associate Professor, Computer Engineering Department, Oles Honchar Dnipro National University.

DOI 10.34185/1562-9945-1-150-2024-17
УДК 620.91

І.Ю. Білоус, О.О. Голубенко

ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ШКОЛИ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ЗАЙНЯТОСТІ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ОПАЛЕННЯ ПРИМІЩЕНЬ

Анотація. У статті розглядається актуальна проблема зниження енергоспоживання в українських школах. Дослідження фокусується на енергоефективному використанні шкільних просторів в умовах неповної зайнятості приміщень. Методи аналізу включають енергетичне моделювання в DesignBuilder. Основні результати показують, що розміщення класних кімнат одна над одною забезпечує найвищу енергоефективність, на 22,3% вищу порівняно з іншими конфігураціями. Також виявлено, що без модернізації опалювальної системи неможливо забезпечити комфортні умови у холодні періоди. Результати цієї роботи важливі для розробки стратегій управління шкільними просторами в умовах неповної зайнятості приміщень.
Ключові слова: споживання теплової енергії, енергетичне моделювання будівель, теплова ізоляція будівель.

Вступ

В останні роки перед Україною постало багато викликів. Війна не лише завдала великих збитків, але й в значній мірі змінила повсякдення.

Навчальний процес в школах також зазнав величезних змін. Щонайменше 1,7 мільйони дітей іммігрували за кордон [1], решта зіткнулась з значними проблемами в навчальному процесі.

Дистанційне навчання стало одним з виходів з ситуації, проте певна група школярів не має можливості нормально навчатись в домашніх умовах. При цьому ж значне скорочення кількості учнів ставить під питання доцільність експлуатації будівель шкільних закладів в режимах довоєнного часу.

Данна стаття, ставить за мету дослідити альтернативу типовому режиму експлуатації будівель шкіл, щоб ефективно задовільнити потреби школярів, при цьому скоротивши енергоспоживання школи.

В основі підходу лежить використання частини навчальних класів в умовах законсервованої школи, а також має а мету запропонувати оптимальне

© Білоус І.Ю., Голубенко О.О., 2024

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

розміщення таких приміщень для максимізації економії. Особлива увага приділяється аналізу ефективності використання енергоресурсів.

В подальшому, це дослідження може бути використати для оптимізації витрат та підвищення ефективності управління шкільними просторами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У контексті сучасних викликів, що стоять перед освітніми установами, зокрема у питанні оптимізації використання шкільних приміщень в умовах неповної зайнятості, важливо звернути увагу на останні наукові дослідження в цій галузі.

Недавні дослідження в області оптимізації систем опалення, вентиляції та кондиціонування підкреслюють значний потенціал зниження енергоспоживання в шкільних приміщеннях. Використання інтелектуальних систем, які адаптуються до реального числа людей у приміщенні, дозволяє не тільки знижувати витрати на енергію, але й підтримувати оптимальний мікроклімат для учнів і вчителів [2-4].

Окремі дослідження акцентують увагу на важливості створення комфортного навчального середовища, звертаючи увагу на такі параметри, як якість повітря (рівень CO_2), температуру, вологість, і освітленість [5-9]. [6] приділяє основну увагу тепловому комфорту в дошкільним навчальних закладах, в [7] досліджується вплив теплового захисту на комфорт, а [8] та [9] фокусуються на якості повітря. Контроль цих параметрів може значно покращити умови перебування учнів у школі, що, в свою чергу, позитивно впливає на їхнє здоров'я, благополуччя та навчальну ефективність.

Використання інноваційних технологічних рішень, таких як інтелектуальні сенсори та системи управління будівлями, може надати керівництву шкіл інструменти для більш точного моніторингу і адаптації шкільного простору під змінні потреби, проте такі дослідження ж більш актуальними за умови нормальної експлуатації будівлі. Проте реалізація інтелектуального керування мікрокліматом будівлі є непростою задачею з точки зору апаратного забезпечення [10].

При цьому ж існує відчутний дефіцит досліджень, присвячених гнучкості використання простору в школах, особливо у контексті неповної зайнятості. Перепланування приміщень для створення багатофункціональних зон, які можна адаптувати під різні потреби, відкриває шляхи для більш ефективного використання ресурсів і простору. Це також включає в себе можливість

оптимізації експлуатації лише частини приміщень залежно від поточних потреб школи.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що сучасні дослідження в області оптимізації умов експлуатації шкільних приміщень у світлі неповної зайнятості відкривають нові перспективи для підвищення ефективності використання ресурсів і створення оптимальних умов для навчання і розвитку учнів.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є вивчити підходи до використання приміщень за умови неповної зайнятості та надати рекомендації щодо найбільш енергоефективних рішень в цьому питанні.

Основні матеріали дослідження

Об'єктом дослідження є імітаційна модель будівлі середньої загальноосвітньої школи, що базується на реально існуючій будівлі СЗШ розташованої в Івано-Франківській області. Школа має три поверхи та типову для шкіл Н-подібну форму. Рік побудови 1966. Загальна площа будівлі 1959,35м^2.

Огороджуючі конструкції будівлі мають наступну конфігурацію:

- стіни — червона цегла 0,525м без додаткової ізоляції;
- вікна — металопластиковий профіль, двокамерні (заміна вікон проводилася нещодавно);
- підлога — підлога по ґрунту, бетонна плита 0,25м, фініш; приведений коефіцієнт теплопередачі 0,31Вт/(м^{2}К),
- дах — бетонна плита 0,25м, бітум.

Опір огороджень будівлі представлений в табл.1.

Опалення забезпечене власною газовою котельнею, система теплопостачання — водяна, двотрубна, система механічної вентиляції та рекуперації відсутня.

При цьому, будівля розглядається в частково «законсервованому» стані, тобто, система опалення та ГВП будівлі не експлуатується, а більшість приміщень залишаються неопалювальними.

З будівлі виділяється блок класів з п’яти класів, які можуть бути використані для перебування в них учнів, та пропонується розглянути оптимальне розміщення дітей в трьох із них.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Опалення цих приміщень забезпечується нагрівачами для забезпечення комфортних умов перебування дітей в приміщеннях без необхідності експлуатувати систему опалення шкільного закладу.

З метою узагальнення результатів, огороджуючі конструкції будівлі були доведені до мінімальних значень згідно ДБН В.2.6-31:2016 та ДБН В.2.6-31:2016 [11,12]. Різниця між теплофізичними властивостями реальної та промодельованої будівлі наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнт теплопередачі огороджувальних конструкцій, використані в моделях, Вт/(м^{2}К)

Тип огородження	Існуючий стан	ДБН В.2.6-31:2016	ДБН В.2.6-31:2021
зовнішні стіни	0,8	0,303	0,25
вікна	1,67	1,33	1,11
дах	0,89	0,167	0,143

Дослідження проводилось на основі енергетичного моделювання будівлі в програмному середовищі DesignBuilder [13].

DesignBuilder дозволяє проводити динамічне моделювання енергоспоживання будівлі з урахуванням детального відображення графіків присутності людей, обладнання та освітлення. Також, програма враховує перетопи між приміщеннями, що критично для даного дослідження.

До того ж, DesignBuilder дозволяє використовувати погодні данні кліматичного файлу IWEC [14], що враховують температури зовнішнього повітря, вплив вітру та сонця в суб-годинних часових інтервалах.

В цілях дослідження з будівлі був виділений блок з п’яти навчальних кімнат (рис. 1.).

Репрезентативні приміщення мають опалювальну площу 45-48м^2, в залежності від розміщення приміщень. Площа стін, що контактують з неопалювальними приміщеннями сягає 75,5м^2, площа зовнішньої стіни не перевищує 30м^2, скління задане на рівні 30%.

Класні кімнати для дослідження були обрані з ряду причин:

- В будівлі обмежена кількість класних кімнат розташованих один-над-дною;
- Розмір обраних кімнат є репрезентативним для даної будівлі;
- Приміщення спрямовані на Південь, тобто, для цих приміщень сонячні теплонадходження є максимальними.

Надалі, для подальшого дослідження, були розроблені 4 конфігурації розміщення експлуатуємих приміщень одне відносно одного. Запропоновані конфігурації наведені на рисунку 2.

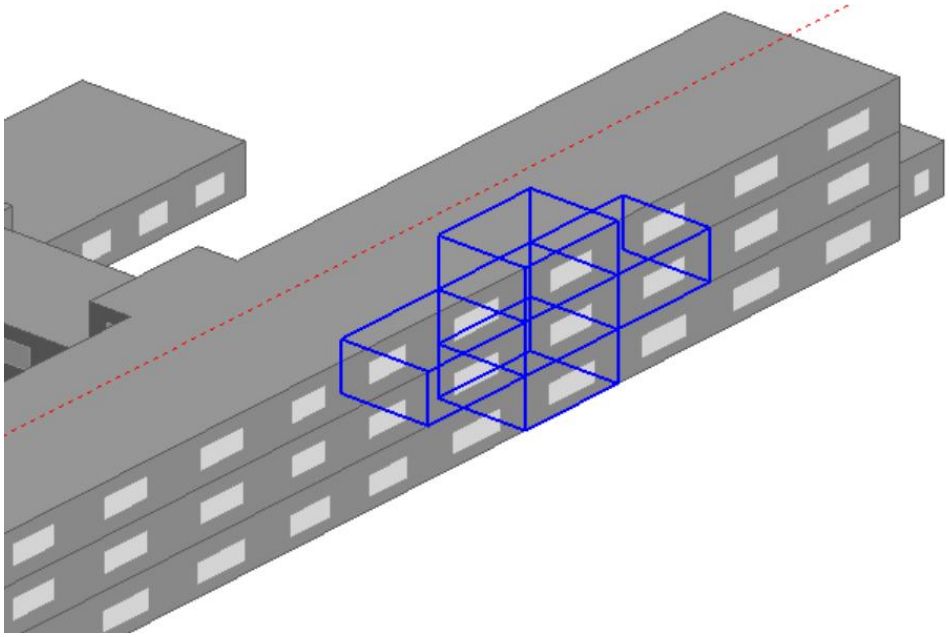
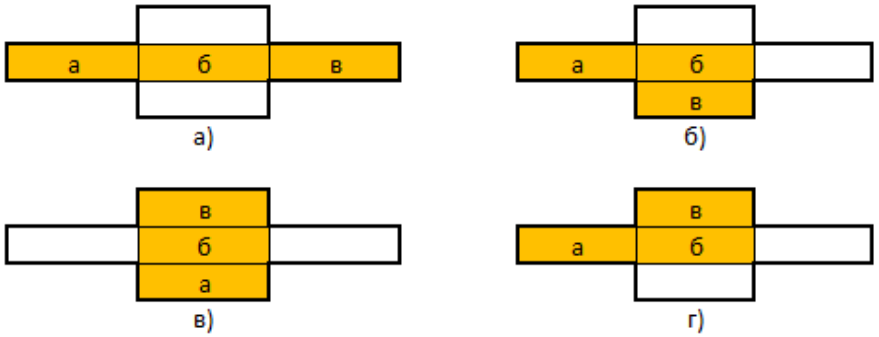


Рисунок 1 – Досліджувані приміщення будівлі



а) Без контакту з дахом та підлогою (конфігурація А);

б) контакт з однією зовнішньою стіною та підлогою (конфігурація Б);

в) без контакту з зовнішніми стінами (конфігурація В);

г) контакт з однією стіною та дахом (конфігурація Г)

Рисунок 2 – Запропоновані приклади розміщених приміщень при неповній зайнятості будівлі

Кожна з досліджуваних конфігурацій має свої переваги, а саме:

- Конфігурація А – приміщення контактують в більшості з неопалювальними приміщеннями, відсутність контакту з дахом та підлогою по грунту.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

- Конфігурація Б – відсутність контакту з дахом будівлі, доступ до одного з приміщень відбувається через перший поверх будівлі.
- Конфігурація В – мінімальна кількість контакту з неопалювальними приміщеннями, потенційні теплонадходження від даху.
- Конфігурація Г – відсутність контакту з підлогою по грунту, потенційні теплонадходження від даху будівлі.

Для приміщень, що експлуатуються, були розроблені графіки присутності людей, використання освітлення та обладнання, а також графік опалення (рис. 3) з урахуванням типових свят та канікул.

Таблиця 2

Графік використаний для приміщень з присутністю людей

Система опалення			Присутність людей, використання обладнання та освітлення		
Година	Пн-Пт	Вихідні та святкові дні	Година	Пн-Пт	Вихідні та святкові дні
00:00-6:00	Відімкнено	Відімкнено	00:00-6:00	0	0
6:00-7:00	16℃	Відімкнено	6:00-8:00	0	0
7:00-15:00	20℃	Відімкнено	8:00-15:00	100%	0
15:00-16:00	16℃	Відімкнено	15:00-16:00	0	0
16:00-24:00	Відімкнено	Відімкнено	16:00-24:00	0	0

В приміщеннях введено регулювання опалювальних приладів з цільовим рівнем температури повітря встановленому на рівні 20℃ згідно з [15].

В цілях економії, пропонується повністю вимикати нагрівачі з 16:00 до 6:00, оскільки будівля законсервована та ризик пошкодження будівлі відсутній, проте, за дві години до початку навчального процесу пропонується прогрівати приміщення для досягнення нормального рівня температури на момент прибуття людей.

Першим кроком в дослідженні стало визначення ефективності розміщення приміщень на основі енергоспоживання системою опалення для будівель з трьома рівнями теплоізоляції згаданими вище. Результати моделювання споживання системою опалення в річному зрізі наведені на рисунку 3:

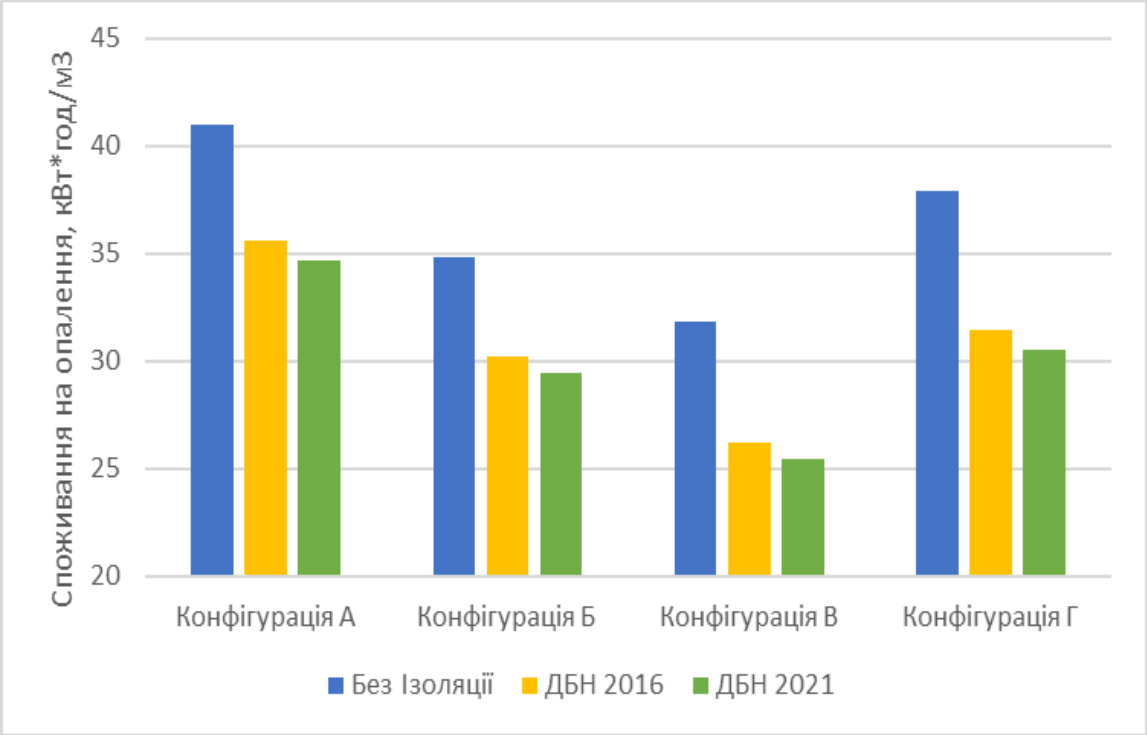


Рисунок 3 – Питоме споживання енергії системою опалення для різних конфігурацій розміщення приміщень та різних рівнів ізоляції будівлі

Аналіз річного споживання енергії на опалення показує, що, Конфігурація В є найкращою з точки зору енергоефективності, показуючи як мінімум на 8,5% менше споживання відносно інших варіацій (22,3% відносно А, 8,5% відносно Б та 16% відносно Г).

Таке покращення викликано меншою значно площею огороджуючих конструкцій що контактують з неопалювальними приміщеннями.

До того ж, варіант В очікувано є найбільш чутливим до покращення теплоізоляції будівлі, оскільки контактує з дахом. Покращення до рівня ДБН 2016 року зменшує споживання енергії на 17,7%, а до рівня ДБН 2021 року на 20,2%.

Конфігурація А призводить до найбільшого споживання енергії. Таким чином, можна зробити висновок, що експлуатація лише одного поверху будівлі не є ефективним рішенням, тим самим, виключаючи використання, наприклад, ряду приміщень на першому поверсі з метою поліпшення доступу до навчальних класів.

Конфігурації Б та Г є близькими по енергосоживанню, тобто, сонячні теплонадходження на дах не перекривають втрати через огороджуючі конструкції. До того ж, зі збільшення рівня ізоляції будівлі різниця між цими випадками

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

знижується (8,2%, 3,8% та 3,6% для будівлі без ізоляції, утепленої до нормативу 2016 та 2021 років відповідно), що дає змогу припустити, що для будівель з високим рівнем ізоляції даху режим Г буде більш вигідним.

Іншим важливим чинником для можливості впровадження таких режимів експлуатації будівель є комфортність перебування людей в приміщеннях.

Для цього для випадку В, як найбільш ефективного проведений аналіз температури повітря та радіаційної температури, як репрезентативних показників термічної комфортності в приміщенні в почасовому зрізі.

Коливання температури повітря та радіаційної температури для кожного з приміщень для найхолоднішої доби серед навчальних днів (за результатами моделювання це 9 січня) досліджуваного року (2020р.) приведені на рисунках 4 та 5:

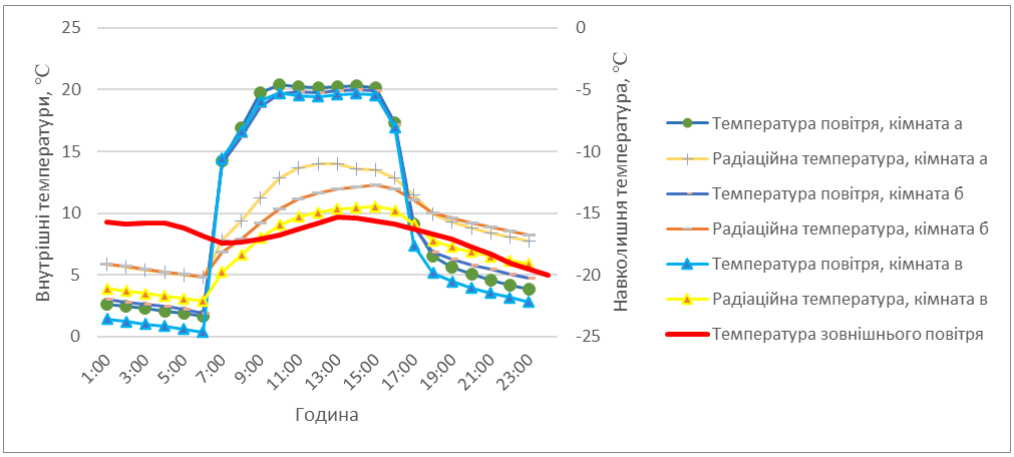


Рисунок 4 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі без ізоляції

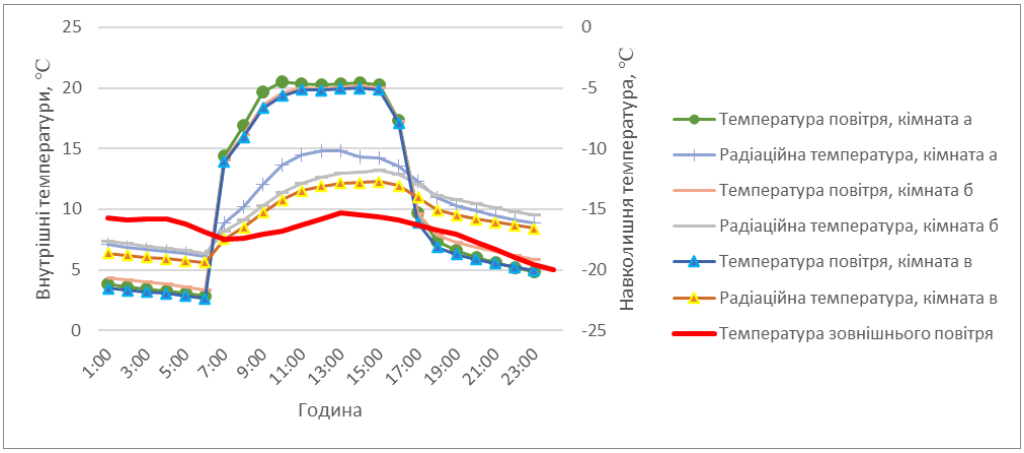


Рисунок 5 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі утепленої до вимог ДБН 2016 року

Аналіз показує значне зниження радіаційної температури відносно температури внутрішнього повітря, яка в найгіршому варіанті (будівля без ізоляції, кімната в) досягає 8℃ в часи перебування людей в будівлі, що звісно, не є комфортними умовами.

Ситуацію покращує збільшення ізоляції будівлі, таким чином, можна досягти температури 10℃ для цього самого випадку.

Виходячи з отриманих результатів, впровадження таких режимів зайнятості без попередньої модернізації будівлі не рекомендується, виходячи з міркувань комфортності перебування в приміщеннях.

Також на графіках помітне різке зростання температури повітря в кімнаті, що свідчить про високу потужність приладів опалення. Результати симуляції потужності системи опалення наведені на рисунку 6:

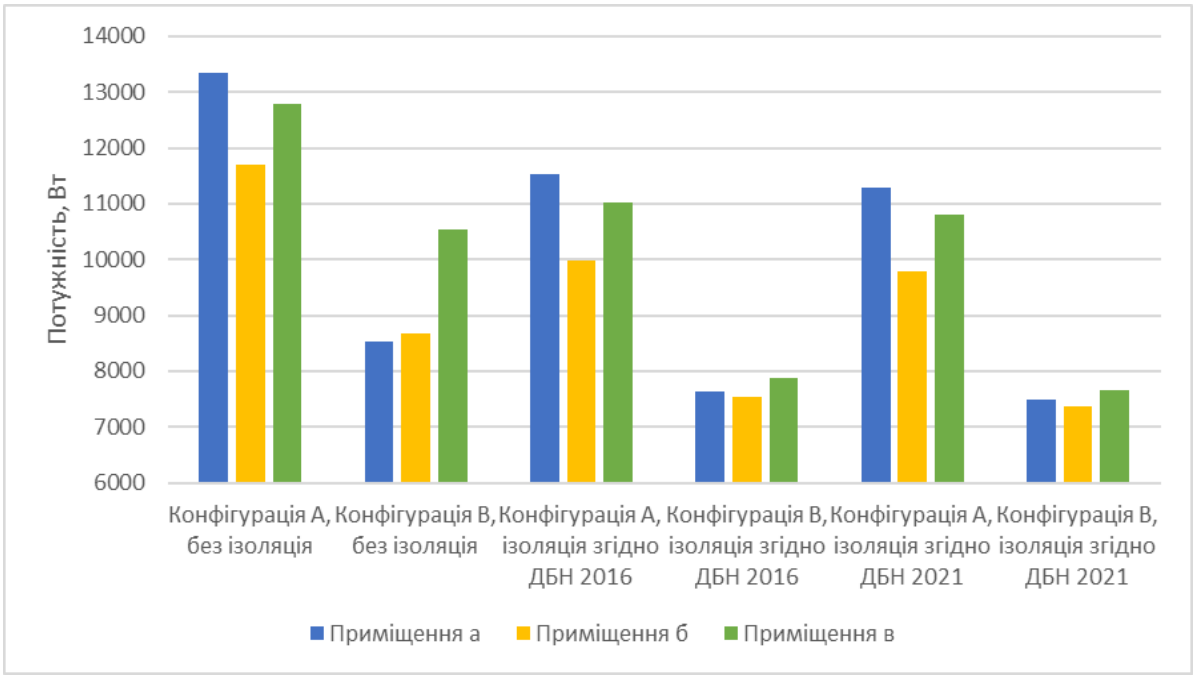


Рисунок 6 – Необхідна потужність системи опалення при впровадженні заходу

Необхідна потужність коливається від 7,3 до 13,4 кВт. Таким чином, рекомендувати запропоновані режими експлуатації можна в двох випадках: якщо в будівлі наявна система централізованого опалення з регулюванням на приладах опалення, або за умови суттєвого збільшення потужності локальних опалювальних приладів.

Оскільки більш типовим випадком є теплова потужність опалювальних приладів в приміщенні близько 2кВт. Аналіз внутрішніх температур для вертикального розміщення приміщень з типовою потужністю опалювальних

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

приладів та доведеними до мінімальних вимог ДБН 2021 огороджувальними конструкціями наведено на рисунку 7:

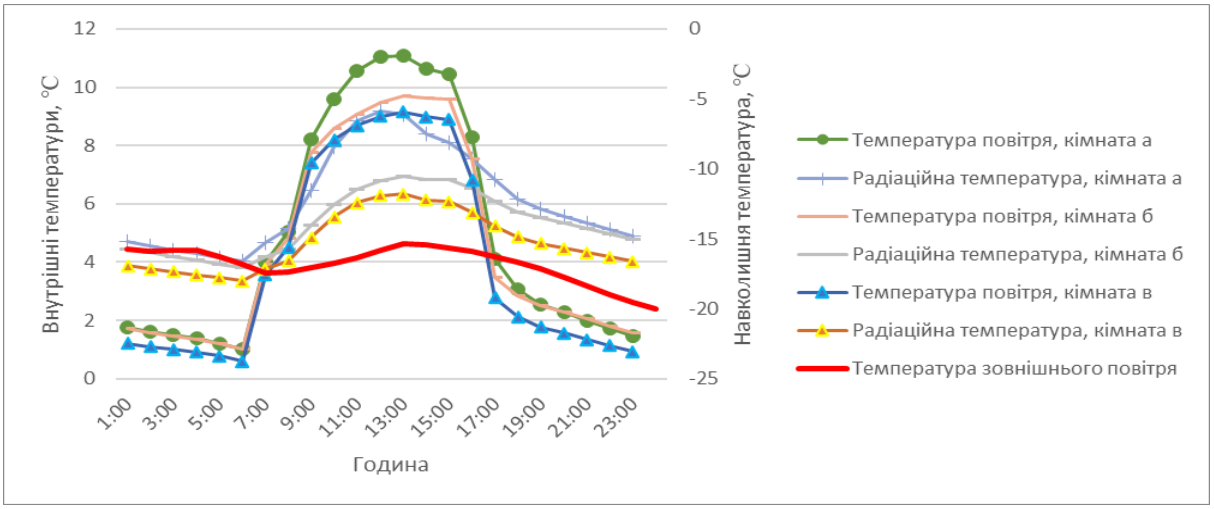


Рисунок 7 –Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі без ізоляції

При використанні 2кВт опалювальних приладів система опалення не може задовільнити мінімальну температуру повітря при переривчастому режимі, навіть в випадку добре ізольованої будівлі,

Середня радіаційна температура також не відповідає комфортним умовам.

Оскільки прилади опалення не можуть задовільнити комфортні умови при переривчастому графіку опалення, також були проаналізовані температури для постійного режиму опалення (рис. 8).

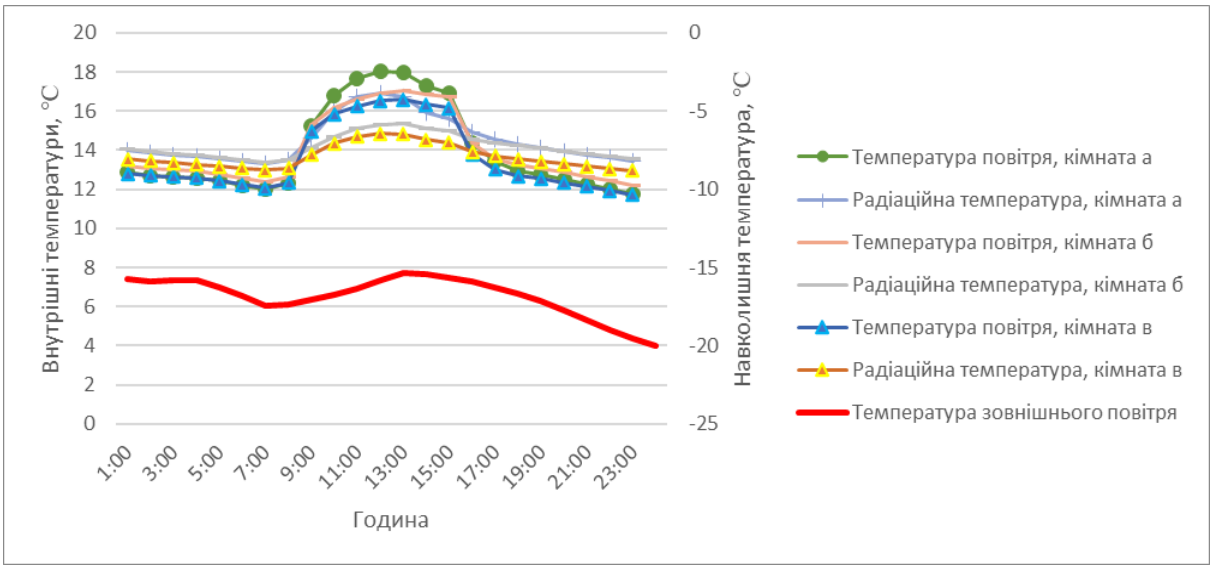


Рисунок 8 – Температура повітря та середня радіаційна температури для найхолоднішої доби року, випадок будівлі без ізоляції

Навіть при постійному графіку опалення, в періоди перебування людей в приміщенні температура повітря не досягає мінімальних нормативних 18℃.

Висновки

Сучасні умови в Україні, особливо з огляду на демографічні зміни та вплив війни, ставлять нові виклики перед системою освіти, зокрема в контексті ефективного використання та управління шкільними просторами. Дослідження, проведене в рамках цієї статті, висвітлює потенціал оптимізації режимів експлуатації шкільних будівель в умовах неповної зайнятості, з метою зниження енергоспоживання та забезпечення комфортних умов для учнів.

Аналіз енергетичного моделювання в програмному середовищі DesignBuilder показує, що варіанти конфігурації класних кімнат можуть значно впливати на енергоефективність будівлі. Наприклад, для варіанту без ізоляції, розміщення приміщень в ряд показало питоме споживання на опалення 41кВт*год/м^2, для розміщення «літерою Г» 34,8кВт*год/м^2, а для вертикального розміщення 31,8кВт*год/м^2.

Найкращі результати з точки зору енергоефективності були отримані для конфігурації розміщення кімнат одна-над-одною, перевершивши варіант з розміщенням трьох кімнат на середньому поверсі на 22,3%, та комбіновані конфігурації на 8,5% та 16%. Такий результат досягається за рахунок мінімізацію контакту з неопалюваними приміщеннями та максимального використання сонячних теплонадходжень. Водночас, модернізація теплоізоляції будівлі підвищує ефективність використання енергії та забезпечує більш комфортні умови для перебування учнів.

Вертикальне розміщення також забезпечує більш комфортні умови перебування в приміщені в порівнянні з іншими конфігураціями.

Проте, важливо підкреслити, що без відповідної модернізації будівлі, використання обмежених приміщень може не забезпечувати належних умов комфорту, в холодні періоди. Для досліджуваних кімнат (площа 45-48м^2) необхідна потужність опалювальних приладів, що потребуються для забезпечення комфортних умов варіюється від 7,5 до 10,5кВт в залежності від рівня ізоляції, що в 3-5 разів більше за стандартну потужність опалювальних приладів для такого типу приміщень.

Забезпечення комфортних умов без модернізації системи опалення в холодні періоди року неможливе навіть при високих показниках теплоізоляції будівлі та постійному графіку опалення.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таким чином, впровадження часткового використання будівлі навчальних закладів, не зважаючи на високий потенціал збереження енергії не може задовільнити умови комфортності учнів без відповідних покращень. Проте, при виборі конфігурації розміщення приміщень, варто обирати розміщення приміщень одне-над-одним, як з точки зору енергоефективності, так і з точки зору теплового комфорту.

У майбутньому, такі дослідження можуть слугувати основою для розробки комплексних стратегій управління шкільними просторами, що враховують змінні умови використання будівель та забезпечують оптимальне поєднання енергоефективності, економічності та комфорту для учнів та персоналу. Результати цього дослідження можуть бути корисними для шкільних адміністрацій, місцевих органів управління освітою, а також для розробників політики в галузі освіти і енергоефективності.

В наступних дослідженнях пропонується дослідити вплив ізоляції внутрішніх стін будівлі, підвищення потужності опалювальних приладів та опалення некондиціонованих кімнат до певного рівня температури на енергоефективність та умови комфорту в приміщеннях де розміщені люди.

ЛІТЕРАТУРА

1. "Чисельність українців та їх міграція за кордон через війну — дослідження Громадянської мережі ОПОРА". Громадянська мережа ОПОРА. Доступно онлайн: www.oporaua.org/viyna/kilkist-ukrayintsiv-ta-yikh-migratsiia-za-kordon-cherez-viinu-doslidzhennia-gromadianskoyi-merezhi-opora-24791.

2. Дешко О.В., Білоус І.Ю., Буяк Н.А., Петрученко О.В. "Енергоефективність короткочасних режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огороджувальних конструкцій". Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. 2021, № 2, С. 32-41.

3. Дешко В. І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А., Петрученко О.В. "Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання". Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. 2020, № 4 (62), С. 32-41.

4. Кепко О.І., Кузьмін О.В., Кузьміна О.В., Лисенко О.В. "Енергозберігаючі режими роботи систем опалення та вентиляції теплиць". Науковий вісник НТУУ. 2021, № 2, С. 15.

5. Бєліков А.С., Железняков Є.О. "Про питання забезпечення умов мікроклімату та безпеки експлуатації систем теплопостачання при аварійних відключеннях

теплопостачання". Український журнал будівництва та архітектури, 2018, № 5 (017), С. 96-102.
6. Дешко, В.І., Білоус, І.Ю., Буяк, Н. А., Сапунов, А. О. "Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в дитячому садку та його вплив на рівень теплового комфорту". Технології та інженерія. 2023, № 2 (13), С. 27-35.
7. Дешко, В.І., Буяк, Н.А., Білоус, І.Ю. "Підбір теплозахисту та джерела тепла з урахуванням комфортних умов у будівлі". Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки». 2015, № 5 (90), С. 71-80.
8. Дешко, В.І., Білоус, І.Ю., Винорадов-Салтиков, В. О., Суходуб, І. О., Яценко, О. І. "Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в навчальних закладах та житлових будинках". Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. 2020, № 4 (148), С. 25-37.
9. Гетьманчук, Ганна Олександрівна. "Оцінка децентралізованого рівня природного повітрообміну з урахуванням мінливості внутрішніх і зовнішніх умов". Магістерська робота, спеціальність 144 Теплова енергетика. Київ, 2020.
10. Кузнєцов, І.І. "Комп'ютерна система визначення якості повітря в приміщеннях". Дипломна робота бакалавра, спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія. Науковий керівник Д. В. Стаценко. Київ: КНУТД, 2023.
11. ДБН В.2.6-31:2016. "Конструкції будівель і споруд. Теплоізоляція будівель". Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017.
12. ДБН В.2.6-31:2021. "Теплоізоляція будівель". Міністерство розвитку громад і територій України, 2022.
13. "Офіційний сайт DesignBuilder". Доступно онлайн: https://designbuilder.co.uk/.
14. "Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря (ASHRAE), Inc., Атланта, Джорджія, США". Доступно онлайн: http://ashrae.whiteboxtechnologies.com/home.
15. "Інформація про здійснення державного нагляду в закладах освіти щодо дотримання температурного режиму в опалювальний сезон", 18 грудня 2018 р.

REFERENCES

1. The number of Ukrainians and their migration abroad due to the war — a study by the Civil Network OPORA [Electronic resource] www.oporaua.org/viyna/kilkist-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ukrayintsiv-ta-yikh-migratsiia-za-kordon-cherez-viinu-doslidzhennia-gromadianskoyi- merezhi-opora-24791
2. Energy efficiency of intermittent modes of heating of buildings with different thermophysical characteristics of enclosing structures / O.V. Deshko, I.Yu. Bilous, N.A. Buyak, O.V. Petruchenko // Bulletin of NTUU "KPI". Series: Mechanical engineering. – 2021. – No. 2. – pp. 32-41.
3. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Buyak N.A., Petruchenko O.V. Analysis of the influence of energy-efficient heating modes on the energy consumption of buildings based on mathematical modeling. Scientific magazine "Energy: economy, technologies, ecology". 2021. No. 4. pp. 32-42
4. Energy-saving modes of operation of heating and ventilation systems of greenhouses / O.I. Kepko, O.V. Kuzmin, O.V. Kuzmina, O.V. Lysenko // Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine. 2021. No. 2. P. 15. (https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/615ad6c7-85de-480d-99eb-d4fa4faa00be/content)
5. Belikov A.S., Zheleznyakov E.O. On the issue of ensuring microclimate conditions and safety of operation of heat supply systems in case of emergency shutdowns of heat supply. Ukrainian Journal of Construction and Architecture, No. 5 (017), pp. 96-102
6. V. I. Deshko, I. Yu. Bilous, N. A. Buyak, A. O. Sapunov. Increasing the level of efficiency of energy consumption in a kindergarten and its effect on the level of thermal comfort. Technologies and engineering. - 2023. - No. 2 (13). - pp. 27-35.
7. V.I. Deshko, N.A. Buyak, I.Yu. Bilous. Selection of thermal protection and heat source, taking into account comfortable conditions in the building. Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series "Technical Sciences". - 2015. - No. 5 (90). - pp. 71-80.
8. V.I. Deshko, I.Yu. Bilous, V.O. Vynoradov-Saltykov, I.O. Sukhodub, O.I. Yatsenko. Experimental study of air quality and air exchange in educational institutions and residential buildings. Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series Technical sciences. - 2020. - No. 4 (148). - P. 25-37.
9. Assessment of the decentralized level of natural air exchange taking into account the variability of internal and external conditions: master's thesis. : 144 Thermal energy / Hanna Oleksandrivna Hetmanchuk. - Kyiv, 2020. - 103 p.
10. I.I. Kuznetsov. Computer system for determination of indoor air quality: bachelor's diploma thesis on specialty 123 Computer engineering / I. I. Kuznetsov; of science driver D. V. Statsenko. - Kyiv: KNUTD, 2023. - 66 p.

11. DBN V.2.6-31:2016. Structures of buildings and structures. Thermal insulation of buildings. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2017. 12 p.
12. DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation of buildings. Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022. 7 p.
13. DesignBuilder official website [Electronic resource] https://designbuilder.co.uk/
14. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Inc., Atlanta, GA, USA [Electronic resource] http://ashrae.whiteboxtechnologies.com/home
15. Information on the implementation of state supervision in educational institutions regarding compliance with the temperature regime during the heating season. State Service of Ukraine for Food Safety and Consumer Protection, December 18, 2018.

Received 10.02.2024.
Accepted 19.02.2024.

Energy consumption of the school under conditions of partial occupancy for different heating modes

The challenges facing the Ukrainian education system, particularly in light of demographic changes and the impact of war, are examined in this research. It highlights the potential for optimizing the operation modes of school buildings under conditions of partial occupancy to reduce energy consumption and ensure comfortable conditions for students.

Energy modeling analysis using DesignBuilder software shows that the configuration of classrooms significantly impacts the energy efficiency of buildings. The best results for energy efficiency were achieved with rooms stacked on top of each other, outperforming the variant with three rooms on the middle floor by 22.3%, and mixed configurations by 8.5% and 16%. This efficiency is due to minimized contact with unheated premises and maximized solar heat gains. However, without appropriate building upgrades, the use of limited spaces may not provide adequate comfort conditions in colder periods. For the rooms studied (45-48m^2), the required heating device capacity to maintain comfortable conditions varies from 7.5 to 10.5 kW, depending on the level of insulation, which is 3-5 times more than the standard capacity for such spaces.

Providing comfortable conditions without upgrading the heating system in cold periods is unfeasible, even with high levels of building insulation and a constant heating schedule. Therefore, implementing partial use of school buildings, despite their high po-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

tential for energy savings, cannot satisfy student comfort needs without corresponding improvements.

Future research could provide a foundation for developing comprehensive strategies for managing school spaces, considering variable building usage conditions and ensuring an optimal combination of energy efficiency, cost-effectiveness, and comfort for students and staff. The findings can be useful for school administrations, local educational authorities, and policymakers in education and energy efficiency. Further studies are suggested to explore the impact of internal wall insulation, increased heating device capacity, and heating unconditioned rooms to a certain temperature level on energy efficiency and comfort conditions in occupied spaces.

Keywords: *thermal energy consumption, building energy modeling, thermal insulation of buildings.*

Білоус Інна Юріївна - Кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Старший науковий співробітник, Інституту загальної енергетики НАН України.

Голубенко Олександр Олександрович - Аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Bilous Inna Yuriivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Senior researcher, The General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine.

Oleksandr Oleksandrovich Holubenko - PhD student of the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

ЗМІСТ

Гнатушенко В.В., Миросенко Д.О.
Математична модель топологічної структури міської мережі водопостачання 3

Льовкін В.М.
Використання принципів системного аналізу при розробці інтегрованого середовища прогнозування забрудненості повітря 16

Багрій В.В., Волошин Р.В., Жульковський О.О., Ульяновська Ю.В.
Імітаційне моделювання системи контролю психофізіологічного стану людини на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик 25

Каштан В.Ю., Шевцова О.С. Інформаційна технологія попередньої обробки супутникових знімків з використанням згорткової нейронної мережі 36

Сизоненко О., Божуха Л.
Виявлення об'єктів на зображенні в потоковому режимі при використанні YOLOv5 і Faster R-CNN 51

CONTENTS

Hnatushenko V.V., Myrosenko D.O.
Mathematical model of the topological structure of the urban water supply network 3

Lovkin V.
Application of the principles of systems analysis for the development of environment for integrated air pollution forecasting 16

Bagriy V., Voloshin R., Zhulkovskyi O., Ulianovska Yu.
Simulation modeling of the system of managing the psychophysiological state of a person based on non-verbal extralinguistic characteristics " 25

Kashtan V.Yu., Shevtsova O.S.
Information technology of satellite imagery pre-processing using convolutional neural network 36

Syzonenko O., Bozhukha L.
Detection of objects in the image in streaming mode using YOLOv5 i Faster R-CNN 51

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Доровці А.Ф.
Використання нечіткої логіки для аналізу соціально-економічного добробуту населення 61

Кирилов С.О.
Проєктування багатопродуктових транспортних мереж з дискретнимим потоками магістральних данних 75

Коряшкіна Л.С., Лубенець Д.Є.
Системний аналіз та математичне моделювання частково-двоетапних процесів розподілу матеріальних потоків 86

Матвєєва Н.О., Папанов О.М.
Розробка кіберфізичної системи моніторингу пожежної безпеки 100

Івон О.І. Програмне забезпечення для дослідження статистичних параметрів об'єктів мікроструктури 108

Спірінцев В.В., Спірінцева О.В., Михайленко М.О.
Веб-орієнтований застосунок ведення дентальної хроніки для запису і аналізу стану ротової порожнини 117

Dorovtsi A.
Use of fuzzy logic for analyzing the socio-economic well-being of the population 61

Kyrylov S.
Design of multi-product transport networks with discrete bus data flows 75

Koriashkina L.S., Lubenets D.Y.
Systems analysis and mathematical modeling of partially two-stage processes of material flow distribution 86

Matveeva N.O., Papanov A.M.
Development of a cyberphysical system for monitoring fire safery 100

Ivon A.I. Software for investigation of statistical parameters of microstructure objects 108

Spirintsev V.V., Spirintseva O.V., Mykhaylenko M.O.
Web-oriented application for keeping a dental chronicle for recording and analysing the state of the oral cavity 117

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Кравець О.В., Махоніна К.В.
Вплив матеріалу та товщини теплоізоляційного прошарку на тепловий потік крізь багатошарову зовнішню стінову панель житлового будинку 127

Твердоступ М.І.
Про вимірювання складових індуктивного імпедансу методом трьох вольтметрів 135

Пономарьов І.В.
Створення децентралізованого додатку продажу зображень з використанням IPFS 141

Тонкошкур О.С., Лозовський А.С.
Алгоритм комп'ютерної обробки кінетичних залежностей відгуку газового сенсора з інтелектуальними компонентами 147

Хандецький В.С., Карпенко Н.В.
Аналіз ефективності блочної передачі фреймів в комп’ютерних мережах IEEE 802.11 158

Білоус І.Ю., Голубенко О.О.
Енергоспоживання школи в умовах неповної зайнятості для різних режимів опалення приміщень 166

Kravets O.V., Makhonina K.V.
The influence of the material and the thickness of the thermal insulation layer on the heat flow through a multilayer external wall panel of a residential building 127

Tverdostup N.I.
On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method 135

Ponomarev I.V.
Creating a decentralized application for selling images using IPFS 141

Tonkoshkur A.S., Lozovskyi A.S.
Algorithm for computer processing of kinetic dependences of the response of a gas sensor with intelligent components 147

Khandetskyi V.S., Karpenko N.V.
Analysis of the efficiency of block frame transmission in IEEE 802.11 computer networks 158

Bilous I., Holubenko O.
Energy consumption of the school under conditions of partial occupancy for different heating modes 166

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

РЕФЕРАТИ

УДК 528.235:681.3:628.1

Гнатушенко В.В., Миросенко Д.О. **Математична модель топологічної структури міської мережі водопостачання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.3 – 15.

Запропоновано математичну модель топологічної структури мережі водопостачання, ви значено бази геопросторових даних про об'єкти мережі та взаємозв'язки цих об'єктів з враху ванням топологічної структури цієї мережі для забезпечення геоінформаційного та матема тичного моделювання гідравлічного стану мережі водопостачання, вирішення задач обробки аварійних ситуацій, контролю якості питної води, оптимізації мережі, енергозбереження.

Бібл. 11, рис. 6.

УДК 004.896

Льовкін В.М. **Використання принципів системного аналізу при розробці інтегрованого середовища прогнозування забрудненості повітря** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.16 – 24.

Прогнозування забрудненості повітря досліджується в контексті менш дослідженого за бруднювача повітря, яким є діоксид азоту, з врахуванням впливу на його концентрацію автомобільного трафіку на основі прогнозованих значень, що не розглядається в інших існуючих дослідженнях. Мета роботи полягала в дослідженні впливу використання системно го підходу на точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту. Проведене ек спериментальне дослідження вказує на те, що використання підходу, що базується на принци пах системного аналізу, дозволяє підвищити точність прогнозування забрудненості повітря діоксидом азоту за рахунок використання в якості вхідних ознак моделі прогнозованих зна чень автомобільного трафіку замість значень за минулі періоди.

Бібл. 11, табл. 1.

УДК 616 093

Багрій В.В., Волошин Р.В., Жульковський О.О., Ульяновська Ю.В. **Імітаційне моделю вання системи контролю психофізіологічного стану людини на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.25 – 35.

Зараз, коли створюються системи штучного інтелекту, існує значний попит на системи інтелектуального контролю, системи «людина машина». В роботі застосовано метод командної системи в режимі однократного доступу до об'єкту, що дозволяє досягти необхідного ефекту через складність навчання системи і аналізу коротких ключових фраз. Вирішено задачу фільтрації голосових даних у системах моделювання контролю «людина оператор» на основі невербальних екстралінгвістичних характеристик для імітаційного моде лювання ПФС людини. Машина сприймає команди від користувача й виконує їх тільки в тому

випадку, якщо голос оператора відповідає зареєстрованому. Дана задача є частиною загальної проблеми автоматичного розпізнавання та розуміння мови.

Бібл. 10, іл. 7.

УДК 528.235:681.3:628.1

Каштан В.Ю., Шевцова О.С. **Інформаційна технологія попередньої обробки супутни кових знімків з використанням згорткової нейронної мережі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.36 – 50.

Запропоновано інформаційну технологію попередньої обробки цифрових супутникових знімків з використанням загорткової нейронної мережі, яка здатна ефективно вилучати деталі текстури та просторові залежності, а також локальну та нелокальну інформацію. Це дозволи ло покращити точність та деталізацію отриманих зображень.

Бібл. 16, рис. 5.

УДК 004.021, 004.042, 519.688

Сизоненко О., Божуха Л. **Виявлення об'єктів на зображенні в потоковому режимі при використанні YOLOv5 і Faster R CNN** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.51 – 60.

У роботі наведені результати аналізу найбільш поширених моделей YOLOv5 і Faster R CNN виявлення об'єктів, етапи збору та анотування відповідного набору даних для навчання, результати навчання і валідації на зібраному наборі даних. Для порівняння результатів двох різних моделей глибокого навчання для виявлення цілей застосовано низку стандартних мет рик. На основі отриманих під час експерименту результатів запропонований вибір найбільш відповідної моделі для вирішення визначеної проблеми.

Бібл. 3, іл. 3, табл. 2.

УДК 519.6:656.1

Доровці А.Ф. **Використання нечіткої логіки для аналізу соціально економічного добробуту населення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.61 – 74.

Запропоновано застосувати метод нечіткої логіки для більш ефективного аналізу неод нозначностей у даних про добробут населення. Була обґрунтована модель, яка базується на створенні лінгвістичних змінних, визначенні термінологічних множин та розробці правил для аналізу. Акцентовано увагу на аналізі ключових факторів, що впливають на рівень життя на селення, включаючи доходи домогосподарств, витрати на ліки та харчування, освітній рівень, стан житлових умов, важливість особистого господарювання тощо. Отримані результати, вия вилися більш точними та виправданими, ніж ті, що були отримані за допомогою класичних методів. Використання отриманих даних у плануванні соціально економічних стратегій дозволяє розробляти ефективні ініціативи для покращення добробуту населення на різних рівнях.

Бібл. 14, іл. 3., табл. 2

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

УДК 519.6:656.1

Кирилов С.О. **Проєктування багатопродуктових транспортних мереж з дискретним потоками магістральних данних** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.75 – 85.

Були розроблені алгоритмічні методи для створення розумних багатопотокових багатопродуктових транспортних мереж, здатних інтегрувати різні економічні сектори або ініціативи шляхом відбору найкращих вхідних параметрів з економічних підсистем за допомогою потокового підходу. Було запропоновано деталізований опис «простору проектування», заснований на визначенні областей об'єктів та транспортних потоків. Розроблена модель бази знань для системи синтезу представлена у вигляді «простору об'єктів», де виокремлюються область універсальних понять та область предметно орієнтованих понять, включаючи базу структурних компонентів, які застосовуються у створенні транспортних потоків.

Бібл. 12, іл. 1., табл. 2

УДК 519.8

Коряшкіна Л.С., Лубенець Д.Є. **Системний аналіз та математичне моделювання частково двоетапних процесів розподілу матеріальних потоків** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.86 – 99.

Розглянуто частково двоетапний процес розподілу матеріальних потоків у логістичній системі, елементами якої є підприємства, що виробляють певну продукцію і здійснюють її збут або безпосередньо споживачам, або через розподільчі центри. При цьому передбачається, що попит на продукцію неперервно розподілений по всій території деякого регіону. Мета роботи забезпечення зниження транспортних та організаційних витрат, пов'язаних із збутом та зберіганням готової продукції, для мережі підприємств шляхом розроблення моделей і методів оптимізаційних задач, які дозволять визначати кількість, місткість і координати розміщення розподільчих центрів і проводити організацію логістичних процесів, раціонально розподіляючи транспортні та матеріальні потоки між усіма учасниками логістичного процесу.

Бібл. 10, іл. 3.

УДК 004.77; 658.7

Матвєєва Н.О., Папанов О.М. **Розробка кіберфізичної системи моніторингу пожежної безпеки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.100 – 107.

Здійснено розробку кіберфізичної системи пожежної безпеки фірми «Megamart» з можливістю гнучкої зміни виду та набору виконуваних функцій шляхом перепрограмування. Кіберфізична система застосовує RFID технологію з опрацюванням комп'ютерної мережі. Комп'ютерна система дозволяє здійснювати технічну і програмну модернізацію системи, а також забезпечує виконання всіх функцій технічного завдання. Робота системи перевірена за допомогою моделі схеми корпоративної мережі із застосуванням програми Cisco Packet Tracer.

Бібл. 9., іл. 4.

УДК 004.42:621.317.351

Івон О.І. **Програмне забезпечення для дослідження статистичних параметрів об'єктів мікроструктури** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник науко вих праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.108 – 116.

Метою роботи є створення засобами HTML5, CSS3, JavaScript і технології Canvas ПЗ для дослідження статистичних параметрів об'єктів мікроструктури: середнього розміру, середньо квадратичного відхилення розміру та гістограми розподілу розмірів. Для вимірювання розмірів об'єкту мікроструктури виконується сканування координат в чотирьох точках його границі.

Бібл.3, іл.5.

УДК 004.42

Спірінцев В.В., Спірінцева О.В., Михайленко М.О. **Веб орієнтований застосунок веден ня дентальної хроніки для запису і аналізу стану ротової порожнини** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.117 – 126.

Запропоновано веб орієнтований застосунок для ефективного моніторингу та догляду за станом ротової порожнини пацієнта. Для реалізації застосунку було використано модель клієнт серверної архітектури, шаблон проектування MVC, мова програмування реалізації JavaScript, HTML, препроцесор SCSS, стек програмування MERN, який включив наступні модулі: MySQL, Express(.js), Node.js, React.

Бібл. 12, іл. 7.

УДК 536.212:699.059

Кравець О.В., Махоніна К.В. **Вплив матеріалу та товщини теплоізоляційного прошар ку на тепловий потік крізь багатошарову зовнішню стінову панель житлового будинку** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.127 – 134.

За допомогою інженерної методики стаціонарного теплового розрахунку багатошарової плоскої стінки розраховано поля температур та теплових потоків крізь чотиришарову плоску стінку з використанням п'яти різновидів теплоізоляційних матеріалів; побудовано графіки залежностей температури та теплового потоку (наведено в роботі) крізь чотиришарову стінку від товщини теплозахисного прошарку, що дозволяє оптимально підібрати теплозахисне по криття та визначити товщину теплоізоляційного шару багатошарової зовнішньої плоскої стінки житлового будинку.

Бібл. 6, іл. 2, табл. 1.

УДК 621.382.08(035.5)

Твердоступ М.І. **Про вимірювання складових індуктивного імпедансу методом трьох вольтметрів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.135 – 140.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Визначено можливості методу трьох вольтметрів для вимірювання індуктивності, актив ного опору, а також їх частотних характеристик. Встановлено, що в діапазоні частот до 100 кГц похибка вимірювання індуктивності становить не більше 0,3%, активного опору 8,7%.

Бібл. 2, іл. 2, табл. 1

УДК 004.415.2

Пономарьов І.В. **Створення децентралізованого додатку продажу зображень з ви користанням IPFS** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.141 – 146.

Розглядаються особливості створення децентралізованого додатку продажу зображень на блокчейні Ethereum з використанням децентралізованого сховища IPFS. Описується міжпланетна файлова система, яка є однорангова розподілена система зберігання файлів та протокол передачі для спільного використання файлів. Розглядаються особливості підключення та роботи з децентралізованим сховищем IPFS.

Досягається повна децентралізація додатку, оскільки смарт контракти з логікою роботи знаходяться всередині блокчейна Ethereum, а дані та клієнтський інтерфейс у децентралізованому сховище IPFS.

Бібл. 3., іл.1.

УДК 004.8

Тонкошкур О.С., Лозовський А.С. **Алгоритм комп'ютерної обробки кінетичних залеж ностей відгуку газового сенсора з інтелектуальними компонентами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.147 – 157.

Наведено алгоритм обробки експериментальної кінетичної залежності відгуку газових сенсорів на основі моделі розтягнутої експоненціальної функції з інтелектуальними складо вими, які дозволяють вибрати найбільш інформативний інтервал часу з оброблених кінетичних залежностей. Використання запропонованого алгоритму узгоджується з даними, отриманими іншими методами, а також існуючими концепціями. Алгоритм видається перспек тивним для реалізації автоматизації обробки даних при побудові та застосуванні інформаційно вимірювальних систем для дослідження газочутливих сенсорних матеріалів.

Бібл. 23, іл. 4.

УДК 681.3.07

Хандецький В.С., Карпенко Н.В. **Аналіз ефективності блочної передачі фреймів в комп’ютерних мережах IEEE 802.11** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.158 – 165.

Проаналізовано механізм блочної передачі фреймів в бездротових комп’ютерних мере жах IEEE 802.11 DCF з інфраструктурною топологією. В захищеному режимі визначені залежності пропускної здатності мережі від швидкості передачі даних і кількості фреймів у блоці. Показано, що механізм блочної передачі фреймів суттєво збільшує пропускну здатність мережі особливо в діапазоні більш високих швидкостей передачі. При помітному збільшенні інтенсивності завад передача блоків ускладняється. Вже при BER=10 6 і кількості фреймів порядку 10 і більше у ряді випадків виникає необхідність здійснення повторних передач вик

ривлених в блоці фреймів, а при BER=10 5 повторних передач стає багато і результуюча пропускна здатність мережі суттєво знижується.

Бібл.7, іл.3., табл. 1

УДК 620.91

Білоус І.Ю., Голубенко О.О. **Енергоспоживання школи в умовах неповної зайнятості для різних режимів опалення приміщень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1(150). – Дніпро, 2024. – С.166 – 181.

У статті розглядається актуальна проблема зниження енергоспоживання в українських школах. Дослідження фокусується на енергоефективному використанні шкільних просторів в умовах неповної зайнятості приміщень. Методи аналізу включають енергетичне моделювання в DesignBuilder. Основні результати показують, що розміщення класних кімнат одна над одною забезпечує найвищу енергоефективність, на 22,3% вищу порівняно з іншими конфігураціями. Також виявлено, що без модернізації опалювальної системи неможливо забезпечити комфортні умови у холодні періоди. Результати цієї роботи важливі для розробки стратегій управління шкільними просторами в умовах неповної зайнятості приміщень.

Бібл.15.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

UDC 528.235:681.3:628.1

Hnatushenko V.V., Myrosenko D.O. **Mathematical model of the topological structure of the urban water supply network** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.3 – 15.

A mathematical model of the topological structure of the water supply network has been proposed, geospatial data bases on network objects and the interrelationships of these objects have been determined, taking into account the topological structure of the network to provide geoinformation and mathematical modeling of the hydraulic state of the water supply network, solving problems of emergency processing, drinking water quality control, network optimization, and energy saving.

Bibl. 11, Fig. 6.

UDC 004.896

Lovkin V. **Application of the principles of systems analysis for the development of environment for integrated air pollution forecasting** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.16 – 24.

Air pollution forecasting problem is considered for nitrogen dioxide which is less fre quently investigated as an air pollutant. Traffic, presented by forecasted values, is taken into account as input features for forecasting models. It differs this paper from existing investiga tions. The objective of the study is to investigate impact of system approach on accuracy of forecasting air pollution by nitrogen dioxide. Experimental investigation of the approach based on the principles of systems analysis increases accuracy of forecasting air pollution by nitrogen dioxide. It is caused by usage of forecasted traffic values as input features instead of values over previous hours.

Refs. 11, table 1.

UDC 616 093

Bagriy V., Voloshin R., Zhulkovskyi O., Ulianovska Yu. **Simulation modeling of the sys tem of managing the psychophysiological state of a person based on non verbal extralinguistic characteristics** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.25 – 35.

At present, when artificial intelligence systems are being developed, there is a signifi cant demand for intelligent control systems, man machine systems. In this work, the method of a command system in the mode of single access to an object is used to achieve the required effect due to the complexity of system training and analysis of short key phrases. The paper solves the problem of voice data filtering in human operator control modelling systems based on non verbal extralinguistic characteristics for simulation modelling of human PPS. The ma chine accepts commands from the user and executes them only if the operator's voice match es the registered one. This task is a part of the general problem of automatic speech recogni tion and understanding.

Ref. 10, im. 7.

UDC 528.235:681.3:628.1

Kashtan V.Yu., Shevtsova O.S. **Information technology of satellite imagery pre processing using convolutional neural network** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.36 – 50.

An information technology for preprocessing digital satellite images using a convolu tional neural network has been proposed. It is effective in extracting texture details and spa tial dependencies, in addition to capturing local and non local information. This technology has enabled us to improve the accuracy and level of detail in the obtained images.

Bibl. 16, Fig. 5.

UDC 004.021, 004.042, 519.688

Syzonenko O., Bozhukha L. **Detection of objects in the image in streaming mode us ing YOLOv5 i Faster R CNN** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.51 – 60.

The paper presents the results of the analysis of the most common YOLOv5 and Faster R CNN object detection models, the stages of collecting and annotating the appropriate data set for training, the results of training and validation on the collected data set. To compare the results of two different deep learning models for target detection, a number of standard met rics are applied. Based on the results obtained during the experiment, the selection of the most suitable model for solving the specified problem.

Bibl. 3, ill. 3, table 2.

UDC 519.2:330.4

Dorovtsi A. **Use of fuzzy logic for analyzing the socio economic well being of the population** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.61 – 74.

It is proposed to apply the method of fuzzy logic for a more effective analysis of ambi guities in data on the welfare of the population. A model based on the creation of linguistic variables, the definition of terminological sets and the development of rules for analysis was substantiated. Attention is focused on the analysis of key factors affecting the standard of living of the population, including household income, expenditure on medicine and food, ed ucational level, the state of housing conditions, the importance of personal management, etc. The obtained results turned out to be more accurate and justified than those obtained using classical methods. The use of the obtained data in the planning of socio economic strategies allows the development of effective initiatives to improve the welfare of the population at various levels.

Bible 14, fig. 3, tabl. 2.

UDC 519.6:656.1

Kyrylov S. **Design of multi product transport networks with discrete bus data flows** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.75 – 85.

Algorithmic methods have been developed to create smart multi flow multi product transport networks capable of integrating different economic sectors or initiatives by select ing the best input parameters from economic subsystems using a flow approach. A detailed description of the "design space" was proposed, based on the definition of areas of objects

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

and traffic flows. The developed model of the knowledge base for the synthesis system is pre sented in the form of "space of objects", where the area of universal concepts and the area of subject oriented concepts are distinguished, including the base of structural components used in the creation of transport flows.

Bible 12, fig. 1, tabl. 2.

UDC 519.8

Koriashkina L.S., Lubenets D.Y. **Systems analysis and mathematical modeling of par tially two stage processes of material flow distribution** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.86 – 99.

The partially two stage process of material flow distribution in a logistics system is con sidered, which consists of enterprises that produce certain products and sell them directly to consumers or through distribution centers. It is assumed that the demand for products is con tinuously distributed throughout the territory of a certain region. The purpose of the work is to reduce transportation and organizational costs associated with the sale and storage of fin ished products for a network of production enterprises by developing models and methods of optimization tasks that allow determining the quantity, capacity, and coordinates of distribu tion centers and organizing logistics processes, rationally distributing transportation and ma terial flows among all participants in the logistics process.

Bibl. 10, ill. 3.

UDC 004.77; 658.7

Matveeva N.O., Papanov A.M. **Development of a cyberphysical system for monitoring fire safery** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.100 – 107.

The Megamart company's cyber physical fire safety system was developed with the pos sibility of flexible changing types and sets of functions performed by reprogramming. system uses RFID technology with the development of a computer network. The computer system al lows for the system's technical and software modernization, as well as ensures the fulfillment of all functions of the technical assignment. The system was validated using a model of the corporate network scheme using the program Cisco Packet Tracer program.

Bibl. 9., fig. 4.

UDK 004.42:621.317.351

Ivon A.I. **Software for investigation of statistical parameters of microstructure ob jects** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.108 – 116.

The purpose of the work is to create using HTML5, CSS3, JavaScript and Canvas software technology to study statistical parameters of microstructure objects: average size, root mean square deviation of size and histogram of size distribution. To measure the dimensions of the microstructure object, coordinates are scanned at four points on its border.

Bibl. 3, il. 5.

UDC 004.42

Spirintsev V.V., Spirintseva O.V., Mykhaylenko M.O. **Web oriented application for keeping a dental chronicle for recording and analysing the state of the oral cavity** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.117 – 126.

A web based application for effective monitoring and care of the patient's oral cavity is proposed. The client server architecture model, MVC design template, JavaScript implementation programming language, HTML, SCSS preprocessor, MERN programming stack with such modules as MySQL, Express(.js), Node.js, React were used to implement the application.

Bible 12, fig. 7.

UDK 536.212:699.059

Kravets O.V., Makhonina K.V. **The influence of the material and the thickness of the thermal insulation layer on the heat flow through a multilayer external wall panel of a residential building** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.127 – 134.

With the help of the engineering method of stationary thermal calculation of a multi layer flat wall, the fields of temperatures and heat flows through a four layer flat wall were calculated using five types of heat insulating materials; graphs of the dependence of temperature and heat flow (given in the work) through a four layer wall on the thickness of the heat shielding layer are plotted, which allows you to optimally choose a heat shielding coating and determine the thickness of the heat insulating layer of a multi layered outer flat wall of a residential building.

Bibl. 6, il. 2, tabl. 1.

UDK 621.382.08(035.5)

Tverdostup N.I. **On measuring the components of inductive impedance using the three voltmeter method** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.135 – 140.

The possibilities of the method three voltmeters to measure inductance, a resistance, and their frequency characteristics. It is found that in the frequency range up to 100 kHz, the inductance of the measurement error is not more than 0.3%, resistance 8.7%.

Bibl. 2, ill. 2, tabl. 1.

UDC 004.415.2

Ponomarev I.V. **Creating a decentralized application for selling images using IPFS** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.141 – 146.

The features of creating a decentralized application for selling images on the Ethereum blockchain using IPFS decentralized storage are considered. Describes the interplanetary file system, which is a peer to peer distributed file storage and transfer protocol for file sharing. Features of connecting and working with IPFS decentralized storage are considered.

Complete decentralization of the application is achieved, since smart contracts with work logic are inside the Ethereum blockchain, and data and the client interface are in the decentralized IPFS storage.

Bibl. 3., Fig.1.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

UDC 004.8

Tonkoshkur A.S., Lozovskyi A.S. **Algorithm for computer processing of kinetic de pendences of the response of a gas sensor with intelligent components** // System tech nologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.147 – 157.

The algorithm for processing the experimental kinetic dependence of the response of gas sensors based on the model of a stretched exponential function with intelligent compo nents that allow choosing the most informative time interval from the processed kinetic de pendences is give. The use of the proposed algorithm is consistent with data obtained by oth er methods, as well as existing concepts. The algorithm seems promising for the implementa tion of automation of data processing in the construction and application of information and measurement systems for the study of gas sensitive sensor materials.

Bibl. 23, ill. 4.

UDC 681.3.07

Khandetskyi V.S., Karpenko N.V. **Analysis of the efficiency of block frame transmis sion in IEEE 802.11 computer networks** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.158 – 165.

The mechanism of frames block transmission in wireless computer networks IEEE 802.11 DCF with infrastructure topology has been analyzed. In protected mode, the dependencies of network throughput on data transmission rate and the number of frames in a block are deter mined. It is shown that the mechanism of block transmission significantly increases the net work throughput, especially in the range of higher transmission rates. With a marked increase in the intensity of interference the transmission of blocks becomes more complicated. Already with BER=10 6 and the frames number of the order of 10 and more, in some cases there is a need to retransmit distorted in a block frames, and at BER=10 5 there are many retransmis sions, so the resulting network throughput becomes small.

Bibl. 7, fig. 3, table 1.

UDC 620.91

Bilous I., Holubenko O. **Energy consumption of the school under conditions of partial occupancy for different heating modes** // System technologies. N 1(150) Dnipro, 2024. P.166 – 181.

The article examines the current problem of reducing energy consumption in Ukrainian schools. The study focuses on the energy efficient use of school spaces in under occupied conditions. Analysis methods include energy modeling in DesignBuilder. Key results show that stacking classrooms on top of each other provides the highest energy efficiency, 22.3% higher than other configurations. It was also found that without upgrading the heating sys tem it is impossible to provide comfortable conditions during cold periods. The results of this work are important for the development of strategies for managing school spaces under con ditions of under occupancy.

Bibl. 15.

Системні технології

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 1 (150)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 17.02.2024. Підписано до друку 20.02.2024.
Формат 60х84 1/16. Друк - різограф. Папір типограф.
Умов. друк арк. – 12,79. Обл.–видавн. арк. –11,188.
Тираж 300 прим. Замовл. – 01/24

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493
http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна ***(головний редактор)*** доцент, кандидат технічних наук	Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна
Алпатов Анатолій Петрович Член-кореспондент НАН України, професор, доктор технічних наук	Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ, Україна
Архипов Олександр Євгенійович професор, доктор технічних наук	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна
Бабічев Сергій Анатолійович доцент, доктор технічних наук	Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem Університет імені Яна Євангеліста Пуркінє, Усті над Лабем, Чеська Республіка
Білозьоров Василь Євгенович професор, доктор фізико-математичних наук	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна
Гече Федір Елемирович професор, доктор технічних наук	Ужгородський національний університет, Україна
Гуда Антон Ігорович ***(заст. головного редактора)*** професор, доктор технічних наук	Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна
Гнатушенко Вікторія Володимирівна ***(вчений секретар)*** професор, доктор технічних наук	Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна
Гнатушенко Володимир Володимирович професор, доктор технічних наук	Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна
Гожий Олександр Петрович професор, доктор технічних наук	Чорноморський національний університет імені П.Могили, Україна
Єрьомін Олександр Олегович професор, доктор технічних наук	Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна
Кіріченко Людмила Олегівна професор, доктор технічних наук	Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна
Світличний Дмитро Святозарович професор, доктор технічних наук	Akademia Górniczo-Hutnicza Краківська гірничо-металургійна академія ім. С. Сташіца, Польща
Скалозуб Владислав Васильович професор, доктор технічних наук	Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»Україна
Хандецький Володимир Сергійович професор, доктор технічних наук	Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна