

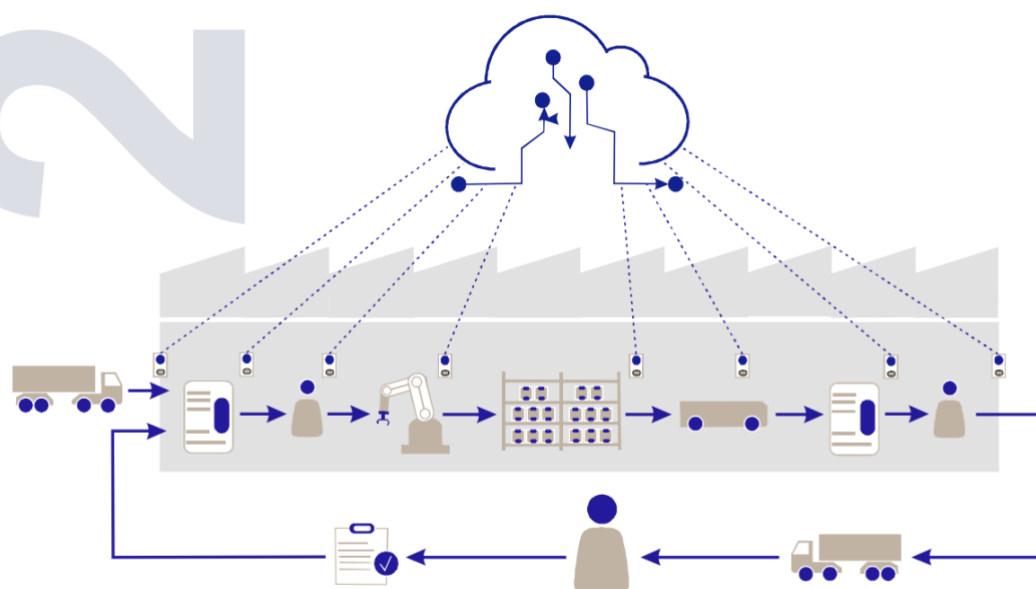
## ДОДАТОК А

Апробація результатів наукових досліджень

<https://nure.ua/>кафедра  
Комп'ютерно-інтегрованих  
технологій, автоматизації та мехатроніки

ХНУРЕ

## ЗБІРНИК

студентських наукових статей  
«Автоматизація та приладобудування»  
ADED-2023  
(Випуск 1)  
[електронне видання]

Industry 4.0

УДК 621.396

**АНАЛІЗ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ****Карпов М.С.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: maksym.karpov@nure.ua

**Анотація:** Бездротові сенсорні мережі використовуються в багатьох промислових і користувачьких додатках, таких як моніторинг і контроль процесів, показники стану здоров'я, моніторинг якості води, запобігання стихійному лиху, контроль дії порушників об'єкта, що охороняється. Бездротові сенсорні мережі можна використовувати у важкодоступних районах, де вони можуть залишатися протягом багатьох років без необхідності заміни джерел живлення.

У статті описується концепція сенсорних мереж, реалізація якої стала можливою внаслідок поєднання мікроелектромеханічних систем, бездротового зв'язку та цифрової електроніки. Вивчено задачі та потенціал сенсорних мереж, проведено огляд факторів, що впливають на їх розвиток. Також розглядається архітектура побудови сенсорних мереж та області застосування сенсорних мереж.

**Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, архітектура мережі, топологія мережі, сенсорний вузол.

**ANALYSIS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS****Karpov M.S.**

Kharkiv National University of radio electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave

E-mail: maksym.karpov@nure.ua

**Annotation:** Wireless sensor networks are used in many industrial and user applications, such as process monitoring and control, health indicators, water quality monitoring, disaster prevention, control of the actions of violators of a protected facility. Wireless sensor networks can be used in hard-to-reach areas where they can remain for years without having to replace power supplies.

The article describes the concept of sensor networks, the implementation of which became possible due to the combination of microelectromechanical systems, wireless communication and digital electronics. The problems and potential of sensor networks were studied, the factors influencing their development were reviewed. The architecture of the construction of sensor networks and the application of sensor networks are also considered.

**Key words:** wireless sensor network, network architecture, network topology, sensor node.

**ВСТУП.** Останні досягнення в галузі мікроелектроніки бездротового зв'язку дозволили створити недорогі, багатофункціональні моти (вузли), що "зв'язуються" один з одним. Сенсорні мережі, засновані на спільній роботі великої кількості таких вузлів, зазвичай складаються з модулів збору та обробки даних та передавача.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) відноситься до групи просторово-розподілених та спеціалізованих мереж на основі датчиків для моніторингу та запису фізичних умов навколишнього середовища та організації зібраних даних в одному вузлі. З допомогою сенсорів (датчиків) вимірюють такі умови довкілля, як: температура, звук, забруднення, вологість, вітер і т.п.

Більш сучасні мережі є двоспрямованими, що дозволяє контролювати активність датчиків [1]. Розвиток бездротових сенсорних мереж було продиктовано військовими цілями, такими як спостереження за полем бою.

Сьогодні такі мережі використовуються в багатьох промислових та користувальницьких додатках, таких як моніторинг та контроль процесів, показників здоров'я, моніторинг якості води та навіть запобігання стихійним лихам.

Сенсорні мережі можуть складатися з різних типів датчиків, таких як сейсмічні, датчики магнітного поля, теплові, інфрачервоні, акустичні, які здатні проводити різні виміри умов навколишнього середовища, динамічних характеристик [2].

Датчики можуть використовуватися для безперервного моніторингу, виявлення та ідентифікації подій. Вони класифікуються за основними напрямками: застосування у військовій промисловості, екологічні дослідження, охорона здоров'я, комерційне застосування. Сенсорні вузли можуть відрізнятися за розміром, вартістю. Ціна сенсорних вузлів також варіюється від кількох сотень доларів, залежно від складності побудови кожного вузла. Обмеження за розміром та вартістю на вузлах датчиків призводять до відповідних обмежень ресурсів, таких як енергія, пам'ять, швидкість обчислень та пропускна спроможність мережі. Топологія WSN може змінюватись від простої зіркової мережі до вдосконаленої бездротової комірчастої мережі.

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ ВІД ЇЇ ТОПОЛОГІЇ.** Одним з вагомих чинників, які впливають на властивості мережі, є її топологія, тобто. спосіб та архітектура розташування вузлів щодо один одного в зоні обслуговування [3]. Визначення цілей використання мережі є однією із вирішальних особливостей її побудови. Аналіз задач, для вирішення яких створюється мережа, є другим важливим критерієм, оскільки область застосування сенсорних мереж дуже велика, від медичних приладів до моніторингу довкілля. Виходячи з цього, не може бути зроблено вибір однієї універсальної топології.

Перед початком проектування та будівництва мережі необхідно врахувати такі показники ефективності:

- 1) продуктивність та пропускна здатність;
- 2) надійність мережі передачі даних;
- 3) здатність до реконфігурації за необхідності реструктуризації та оптимізації існуючої мережі.

Пропускна здатність можна представити у двох варіантах: максимальній кількості біт, які пропускає мережу в певну одиницю часу, чи кількості пакетів, переданих мережею. Ці параметри не пов'язані між собою і, як правило, можуть дати комплексну картину продуктивності мережі. У таблицю 1 винесено характеристики основних показників ефективності.

Таблиця 1 – Характеристики основних показників ефективності

Продуктивність	Надійність	Реконфігурація
Основною характеристикою продуктивності мережі є час реакції. Це певний інтервал часу між запитом користувача та отриманням відповіді на цей запит	Характеризує її властивість виконувати функції, зберігаючи значення встановлених показників якості у заданих умовах технічної експлуатації. Цей параметр відбиває вплив на працездатність мережі переважно внутрішніх чинників – різних відмов телекомунікаційного устаткування	Реконфігурація мережі зазвичай пов'язана з необхідністю збільшити довжину мережі, зі зростанням трафіку в мережі чи потребою в збільшенні надійності мережі

На каналному рівні у стандарті IEEE 802.15.4 [4, 5] наведено загальні рекомендації щодо побудови топології мережі. Мережі можуть бути однорангові P2P (peer – to-peer, P2P-peer

toequal) або мати топологію «зірка» (рис. 1). Однорангові мережі мають децентралізоване керування. В основному ці мережі працюють без виділених серверів, і кожна точка (peer) є як клієнтом, так і сервером. Основна перевага полягає в тому, що така організація дозволяє зберігати працездатність мережі за будь-якої кількості та будь-якого поєднання доступних вузлів.

На основі топології P2P [6] формуються довільні лінії зв'язків, обмежені лише відстанню між парами вузлів. Маючи це на увазі, існують різні варіанти топологічної структури BSS, зокрема «дерево» кластерів – структура, в якій вузли, будучи «листами дерева», пов'язані лише з одним повнофункціональним пристроєм (тобто пристроєм, який може виконувати як функції координатора, так і вузла), а більшість вузлів у мережі є неповнофункціональними пристроями.

Можлива також топологія коміркової мережі на основі кластерних «дерев» з локальним координатором для кожного кластера і координатора глобальної мережі [7]. Виходячи з сказаного вище, основні моменти винесені в таблицю 2, щоб полегшити візуальне сприйняття.

Таблиця 2 – Топології сенсорних мереж зв'язку

Точка-точка	Зірка	Дерево (кластерна топологія)
У топології «точка-точка» кожен пристрій може обмінюватися даними з будь-яким іншим у межах, обмежених радіоканалом. Кожен пристрій пов'язаний з кількома сусідніми, і дані передаються найбільш зручним маршрутом	При використанні топології «зірка» зв'язок встановлюється між кінцевими вузлами та координатором. Кожен пристрій безпосередньо зв'язується зі шлюзом (координатором)	Ієрархічна мережа може бути реалізована у вигляді кластерного дерева. Кінцеві пристрої підключаються до вузла, що здійснює роль маршрутизатора, який має підключення до координатора. Передбачається наявність кореневого, батьківських та дочірніх вузлів

Сенсорна мережа складається з трьох основних компонентів (рис. 1): сенсорного вузла, маршрутизатора та шлюзу (координатора):

а) вузол датчика працює від батареї та відправляє дані вимірювань на шлюз. Сенсорний вузол поділений на два основні компоненти: плата зв'язку та сенсорна плата. Функції плати зв'язку: бездротовий зв'язок, керування живленням, планування вимірювань та інтерфейс сенсорної плати. Плата датчика різна кожному за типу датчика. Її функція – зчитувати показання датчика та передавати дані вимірювань в уніфікованому форматі на плату зв'язку. Поділ датчиків від решти WSN дозволяє додавати нові датчики в мережу без змін в обладнанні та в програмному забезпеченні решти мережі. Крім того, поділ враховує незалежний розвиток бездротової мережі та датчиків;

б) вузол маршрутизатора може передавати дані від вузлів датчиків до шлюзу;

в) шлюз отримує дані від сенсорних вузлів і надсилає це через мобільну мережу (GPRS) до веб-сервера.

Топологія мережі є основним чинником під час виборів технології фізичного і каналного рівнів, і навіть протоколів організації мережі. Варто наголосити, що розташування вузлів у просторі або на об'єкті залежить в першу чергу від призначення мережі. Наприклад, якщо датчики «прикріплені» до деяких об'єктів структури, що обслуговується, наприклад, до контрольованих або керованих об'єктів, то їх розташування визначається, по-перше, розміщенням цих об'єктів, а також способом розміщення деяких вузлів, що виконують допоміжні функції. При «прикріпленні» до об'єктів структури їх розміщення можна вважати детермінованим, при якому відомі координати вузлів і відстані між ними. При розгляді мережі з фіксованими (нерухомими) вузлами, залежно від призначення, розподіл вузлів у зоні

обслуговування може бути виконано різними способами. При цьому можуть вирішуватися такі задачі як покриття певної області або областей у зоні обслуговування зонами дії сенсорних пристроїв, що входять до складу вузлів мережі, забезпечення зв'язності мережі та її надійності. Загалом, розміщення вузлів можна як випадкове.

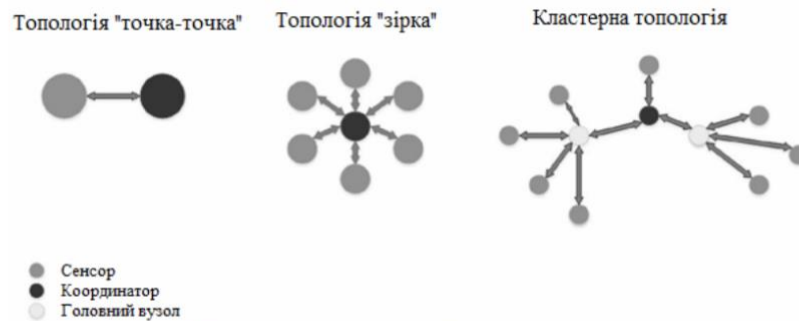


Рисунок 1 – Топології сенсорних мереж

У реальній мережі при детермінованому (певному) розміщенні вузлів неможливо забезпечити абсолютну точність їх встановлення [8], тому цей випадок не суперечить припущенню про випадковий характер їхнього розміщення. При прив'язці вузлів до користувачів, наприклад, розподілі індивідуальних пристроїв, аналогічний розміщенню терміналів мереж рухомого зв'язку, визначається розподілом користувачів (абонентів). При прив'язці до речей, що оточують людину, розподіл вузлів у просторі визначається розподілом цих речей. Топологія бездротової мережі, що самоорганізується, значною мірою впливає на основні показники її функціонування, якими є доступність і час доставки повідомлення (даних) [9, 10]. Як правило, поняття доступності сприймається як можливість надання послуги.

ТИПИ WSN. Також можна виділити кілька типів бездротових сенсорних мереж.

Залежно від середовища типи мереж вибираються таким чином щоб їх можна було розгорнути під водою, землею, землі і т.д. Різні типи WSN включають:

- 1) наземні WSN;
- 2) підземні WSN;
- 3) підводні WSN;
- 4) мультимедійні WSN;
- 5) мобільні WSN.

1. Наземні WSN. Наземні WSN здатні ефективно зв'язуватися з базовими станціями і складаються із сотень або тисяч вузлів бездротових датчиків, розгорнутих неструктурованим (спеціальним) або структурованим (попередньо запланованим) способом. У неструктурованому режимі вузли датчика випадково розподіляються в межах цільової області, яка випадає з фіксованої площини. Попередньо запланований чи структурований режим враховує оптимальне розміщення, розміщення сітки та 2D, 3D моделі розміщення.

У цій WSN ємність акумулятора обмежена; проте батарея може бути оснащена сонячними елементами як вторинне джерело живлення. Енергозбереження цих WSN досягається за рахунок використання операцій з низьким робочим циклом, мінімізації затримок, оптимальної маршрутизації тощо [11, 12].

2. Підземні WSN. Підземні бездротові сенсорні мережі дорожчі за наземні з точки зору розгортання, обслуговування, вартості обладнання та ретельного планування. Мережі WSN складаються з кількох сенсорних вузлів, які приховані в землі для моніторингу підземних умов. Для передачі від вузлів датчиків до базової станції додаткові вузли приймача розташовані над землею.

Підземні бездротові сенсорні мережі, розгорнуті у землі, важко перезарядити. Акумуляторні вузли датчика оснащені обмеженим зарядом акумулятора складно перезарядити. На додаток до цього підземне середовище робить бездротовий зв'язок ненадійним через високий рівень загасання та втрати сигналу.

3. Підводи WSN. Понад 70 % Землі зайнято водою. Ці мережі складаються з низки сенсорних вузлів та транспортних засобів, розгорнутих під водою. Автономні підводні апарати використовуються для збору даних із цих сенсорних вузлів. Проблемаю підводного зв'язку є тривала затримка розповсюдження, а також пропускна здатність та відмова датчиків.

Підводні WSN оснащені обмеженим акумулятором, який не можна заряджати або замінювати [13]. Проблема енергозбереження для підводних мереж WSN включає розробку методів підводного зв'язку та мереж.

4. Мультимедійні WSN. Бездротові сенсорні мережі Multimedia були запропоновані для відстеження та моніторингу подій у вигляді мультимедіа, таких як зображення, відео та аудіо. Ці мережі складаються з недорогих сенсорних вузлів, обладнаних мікрофонами та камерами. Ці вузли пов'язані один з одним по бездротовому з'єднанню для стиснення даних, пошуку та кореляції даних.

Проблеми з мультимедійним WSN включають високе енергоспоживання, високі вимоги до пропускної здатності, методи обробки даних і стиснення. На додаток до цього, мультимедійний контент вимагає високої пропускної здатності, щоб контент доставлявся правильно та швидко.

5. Мобільні WSN. Ці мережі складаються з набору сенсорних вузлів, які можуть переміщатися самостійно та можуть взаємодіяти з фізичним середовищем. Мобільні вузли мають можливість обчислювати зміст та спілкуватися.

Мобільні бездротові сенсорні мережі набагато більш універсальні, ніж статичні сенсорні мережі. Переваги WSN у порівнянні зі статичними бездротовими сенсорними мережами включають покращене покриття, кращу енергоефективність, чудову пропускну здатність каналу і т.д.

**ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ.** Бездротові сенсорні мережі можуть застосовуватися для моніторингу та контролю різних середовищ – від військових до цивільних та у багатьох наукових та технічних галузях. Також ця технологія охоплює безліч сфер життя людини, таких як медицина, технології приладобудування та машинобудування, виявлення лісових пожеж, зсувів, моніторинг забруднення повітря і запобігання стихійним лихам [14].

Моніторинг території. Зональний моніторинг є найпоширенішим застосуванням сенсорної мережі. В області моніторингу WSN розгорнуть у регіоні, де необхідно відстежувати якесь явище. Військовим прикладом є використання датчиків виявлення вторгнення противника; громадянський приклад – геозони газових чи нафтопроводів.

Моніторинг охорони здоров'я. Існує кілька типів сенсорних мереж для медичних застосувань: імплантовані, носні та вбудовані у навколишнє середовище. Імплантовані медичні пристрої це ті, які вводяться в організм людини. Носимі пристрої використовуються на поверхні тіла людини або в безпосередній близькості від користувача. Вбудовані у середовище системи використовують датчики, які у навколишньому середовищі. Можливі застосування включають вимірювання положення тіла, місцезнаходження людей, загальний моніторинг хворих пацієнтів у лікарнях та вдома. Пристрої, вбудовані в середу, відстежують фізичний стан людини для безперервної діагностики стану здоров'я, використовуючи як вхідні дані від мережі камер, вимірювальних датчиків або інших подібних пристроїв. Мережі області тіла можуть збирати інформацію про здоров'я людини, її фізичну форму та витрати

енергії. У додатках охорони здоров'я першорядне значення має конфіденційність і справжність даних користувача [15]. Особливо через інтеграцію сенсорних мереж з IoT (Інтернет Речей) автентифікація користувача стає більш складною.

Навколишнє середовище. Існує безліч програм для моніторингу параметрів довкілля, приклади яких наведені нижче. Вони поділяють додаткові проблеми суворих умов та зниження енергоспоживання.

Моніторинг забруднення повітря. Бездротові сенсорні мережі були розгорнуті у містах для моніторингу концентрації небезпечних газів для громадян. Вони можуть використовувати переваги спеціальних бездротових ліній зв'язку, а не дротових установок, що також робить їх мобільнішими для тестування показань у різних областях.

Виявлення лісових пожеж. Мережа сенсорних вузлів може бути встановлена у лісі, щоб визначити, коли почалася пожежа. Вузли можуть бути оснащені датчиками для вимірювання температури, вологості та газів, які утворюються внаслідок пожежі на деревах або рослинності. Раннє виявлення має вирішальне значення для успішної дії пожежників; завдяки бездротовим сенсорним мережам пожежна команда зможе дізнатися, коли почалася пожежа і як вона поширюється.

Виявлення зсуву. Система виявлення зсувів використовує бездротову сенсорну мережу для виявлення незначних рухів ґрунту та змін у різних параметрах, які можуть статися до або під час зсуву ґрунту. Завдяки зібраним даним можна дізнатися про наближення виникнення зсувів задовго до того, як це відбудеться.

Моніторинг якості води. Моніторинг якості води включає аналіз властивостей води у греблях, річках, озерах та океанах, а також запасів підземних вод. Використання розподілених бездротових датчиків дозволяє створювати більш точну карту стану води і забезпечує постійне розгортання станцій моніторингу в важкодоступних місцях без необхідності ручного вилучення даних.

Запобігання стихійним лихам. Бездротові сенсорні мережі можуть бути ефективними у запобіганні несприятливим наслідкам стихійних лих, таких як повені. Бездротові вузли були успішно розгорнуті у річках, де зміни рівня води мають контролюватись у режимі реального часу.

Моніторинг стану машин. Бездротові сенсорні мережі були розроблені для технічного обслуговування обладнання, оскільки вони забезпечують значну економію коштів та надають нові функціональні можливості. Бездротові датчики можуть бути розміщені в місцях, важкодоступних або недоступних за допомогою дротової системи, таких як як обертові механізми та транспортні засоби.

Моніторинг ЦОД (Центр обробки даних). Через високу щільність серверних стійок у центрі обробки даних часто виникають проблеми з температурним режимом. Щоб вирішити цю проблему, все більше і більше стійок оснащуються бездротовими датчиками температури для контролю температури стійок. Оскільки ASHRAE рекомендує використовувати до шести датчиків температури на стійку, бездротова технологія дає перевагу в порівнянні з традиційними кабельними датчиками.

Реєстрація даних. Бездротові сенсорні мережі також використовуються для збирання даних для моніторингу екологічної інформації. Це може бути так само просто, як моніторинг температури у холодильнику або рівня води у переливних баках на атомних електростанціях. Потім статистична інформація може бути використана для демонстрації роботи систем. Перевага WSN у порівнянні зі звичайними реєстраторами полягає в тому, що можливий «живий» потік даних.

## ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день технологія бездротових сенсорних мереж є єдиною бездротовою технологією, за допомогою якої можна вирішити проблему контролю та управління, критичну

до вимог до терміну служби батарей пристроїв, їх надійності, автоматичної або напівавтоматичної конфігурації кожного з них, можливості простого додавання або видалення пристрою з мережі, розповсюдження сигналів через стіни та стелі за низької вартості системи. А технологія ретрансляції короткохвильового радіозв'язку, відома як «сенсорні мережі», є одним із сучасних напрямів розвитку самоорганізованих стійких до відмови розподілених систем промислового моніторингу та управління ресурсами і процесами.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любович, 2011. 312 с.
2. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0 : монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова ; – Oktan Print – Prague. 2023. – 321 с.
3. Attar, H., & et al.. (2022). Control System Development and Implementation of a CNC Laser Engraver for Environmental Use with Remote Imaging. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article ID 9140156, <https://doi.org/10.1155/2022/9140156>.
4. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. *Scientific Collection «InterConf»*, (140), P. 648-651.
5. Yevsieiev V. (2023) Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / Yevsieiev V., Starodubcev N. // *Scientific Collection «InterConf»*, (141), P. 331-334.
6. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
7. A Small-Scale Manipulation Robot a Laboratory Layout Development / Yevsieiev V., Starodubcev N., Maksymova S., Stetsenko K. // *International independent scientific journal*, №47, 2023. P.18-28.
8. Nevludov, I., Razumov-Fryziuk, I., Yevsieiev, V., Nikitin, D., Blyzniuk, D., & Strelets, R. (2022). Cost estimation of photopolymer resin for 3D exposure of circuit boards. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(64)), 43–49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>
9. Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N. Software Implementation Concept Development for the Mobile Robot Control System on ESP-32CAM // *Current issues of science, prospects and challenges: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 2)*, June 10, 2022. Sydney, Australia: European Scientific Platform., 2022. P. 54-56
10. Automation of Flexible HMI Interface Development for Cyber-Physical Production Systems / I. Nevludov, V. Yevsieiev, N. Starodubcev, N. Demska // *International periodic scientific journal SWorldJournal*. – Issue No9, Part 1. – 2021. – P. 11-27.
11. Невлюдов, И., Стародубцев, Н., Евсеев, В., & Демская, Н. (2021). AUTOMATION OF FLEXIBLE HMI INTERFACE DEVELOPMENT FOR CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS. *SWorldJournal*, 1(09-01), 11–27. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2021-09-01-009>
12. Yevsieiev , . V., Maksymova, S. ., & Starodubcev, N. . (2022). DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ESP32-CAM OPERATION IN HTTP SERVER MODE FOR STREAMING VIDEO. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (July 8, 2022; Paris, France), 177–179. <https://doi.org/10.36074/logos-08.07.2022.049>

**ДОДАТОК Б**  
**Демонстраційний матеріал**

