

І. НЕВЛЮДОВ, С. НОВОСЕЛОВ, О. СИЧОВА

МЕТОД ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Технологія цифрових двійників передбачає створення віртуальної моделі фізичного об'єкта, процесу або системи, яка може бути використана для моделювання, моніторингу, тестування та прогнозування можливого розвитку подій на основі інформації від розподіленої мережі сенсорів технологічного обладнання. Упровадження цифрових двійників у систему автоматизованого управління технологічними процесами дасть змогу підвищити ефективність виробничих процесів на інтелектуальних виробництвах. **Предметом дослідження** є архітектура автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу. **Мета роботи** – вдосконалення методів децентралізованого управління ТП для підвищення ефективності виробничого процесу на інтелектуальному виробництві за допомогою інтеграції цифрових двійників в АСУ. **Завдання:** розробити архітектуру розподіленої АСУ ТП на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу; проаналізувати поняття "цифровий двійник" у контексті поєднання цієї технології з процесами сталого розвитку й трансформації виробничої галузі; дослідити запропонований метод інтеграції цифрового двійника в задачу управління ТП. У процесі досліджень упроваджено такі **методи:** комп'ютерне моделювання, теорія автоматичного управління, аналіз і синтез децентралізованих виробничих систем. Досягнуто таких **результатів:** розроблено архітектуру автоматизованої системи з використанням цифрового двійника як еталона, що описує ідеальний розвиток процесу керування об'єктом автоматизації із застосуванням цифрового ПД-регулятора. Результати моделювання продемонстрували, що фізичний макет досить точно відтворює поведінку математичної моделі ПД-регулятора із заданими параметрами. **Висновки.** Результати експериментального дослідження показали, що інтеграція цифрових двійників в АСУ дає змогу вдосконалити методи децентралізованого управління ТП та підвищити ефективність виробничого процесу на інтелектуальному виробництві. Успішне впровадження технології цифрових двійників у інтелектуальне виробництво в поєднанні з хмарними обчисленнями та машинним навчанням спрямоване на досягнення цілей сталого розвитку.

Ключові слова: промисловість; інновації; *Industry 5.0*; Інтернет речей; інтелектуальне виробництво; цифровий двійник.

Вступ

Інтелектуальне виробництво поєднує передові технології автоматизованого управління технологічними процесами (ТП), інформаційні мережі та технології, роботизовані засоби й системи, технології організації зв'язку та передавання даних, технології захисту інформації від кібератак, технології доповненої та віртуальної реальності, технології збирання та оброблення великих даних, технології 3D-друку та швидкого прототипування, інтелектуальні логістичні системи та планування маршрутів [1–3]. Особливу роль у цьому переліку відіграють цифрові двійники (рис. 1).

Цифрові двійники в інтелектуальному виробництві використовують для розв'язання значної кількості завдань: моніторингу стану технологічного процесу; моделювання та оптимізації виробничого процесу; оптимізації технологічного процесу та прогнозування його стану для запобігання відмовам обладнання; підвищення ефективності та якості виробництва [4, 5].

Також цифровий двійник можна застосовувати для оптимізації роботи кіберфізичної системи за допомогою моделювання її поведінки та виявлення сфер, де можна використати запропоновані ним вдосконалення [5].

Для застосування цифрових двійників потрібно розв'язувати комплекс завдань: отримання даних від кіберфізичної системи; зберігання та оброблення отриманих даних; виконання обчислень відповідно до математичної моделі системи або процесу, що моделюється. На рис. 2 подано схему, що пояснює принцип інтеграції цифрових двійників у децентралізовану автоматизовану систему управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві [6].

Для інтеграції цифрових двійників у автоматизовану систему управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві необхідно забезпечити цифровий простір потрібною інформацією. Завдяки застосуванню концепції *Industry 4.0* на сучасному

виробництві можна отримати доступ до кожного датчика та виконавчого пристрою безпосередньо з хмарного середовища [7]. Промисловий Інтернет речей (IIoT) – це концепція, яка ґрунтується на інтеграції виконавчих пристроїв, механізмів верстатів із ЧПК, що становлять основу виробничого

простору з мережевими датчиками, технологією передачі даних та програмним забезпеченням [8]. Інтернет-технології разом з промисловими мережами та протоколами слугують каналом, яким проходить інформація і завдяки якому пов'язуються між собою об'єкти на інтелектуальному заводі [9].

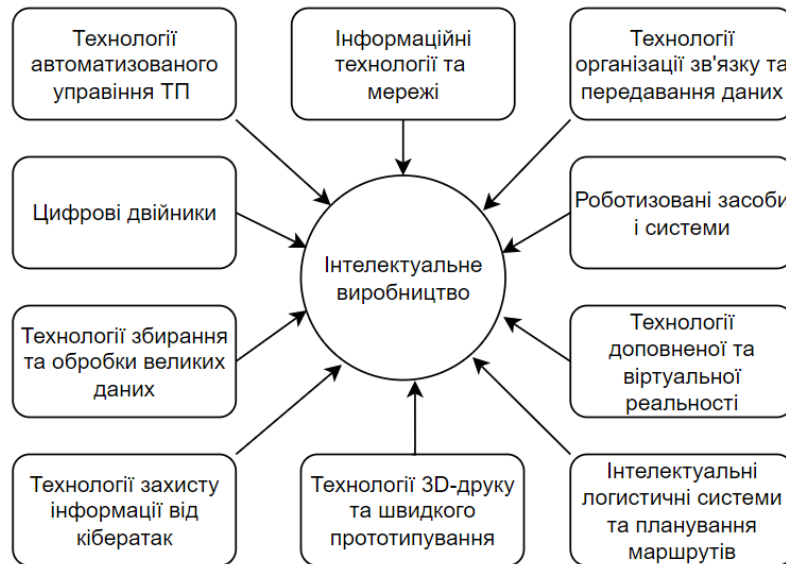


Рис. 1. Технології на інтелектуальному виробництві

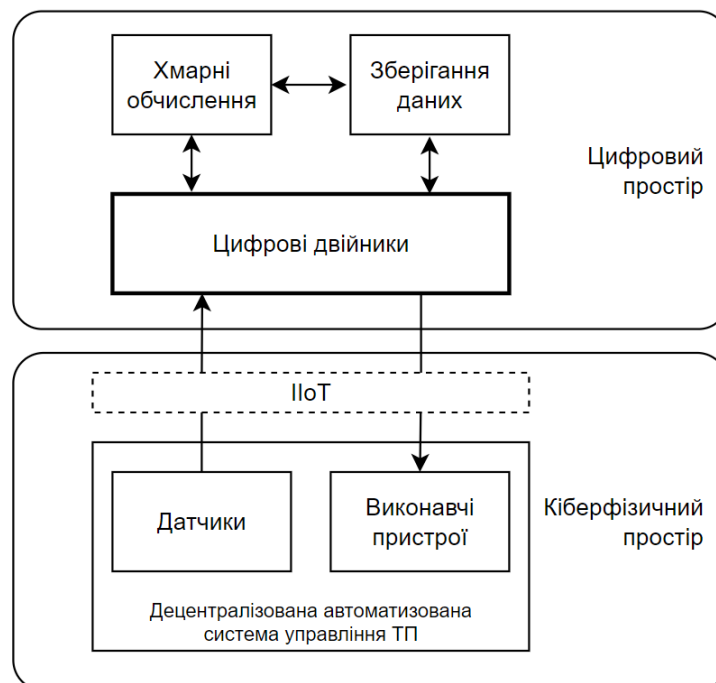


Рис. 2. Інтеграція цифрових двійників у децентралізовану автоматизовану систему управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві

IIoT керується комп'ютерними науками як розширення концепції Інтернету речей (IoT). Він оснований на стандартах сенсорних та інтернет-технологіями, і його можна розглядати

як розширення концепції Інтернету речей (IoT). Він оснований на стандартах сенсорних

і розподілених мереж. Кіберфізичні системи ґрунтуються на інженерних аспектах і фізичних системах реального світу, що становлять основу технологічного процесу сучасного виробництва, часто в системі замкнутого циклу управління.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення ефективності процесів інтелектуальних виробництв за допомогою впровадження цифрових двійників у систему автоматизованого управління технологічними процесами. Використання технології промислового Інтернету речей в інтеграції із сучасними технологіями зв'язку та оброблення великих даних у хмарному середовищі дає змогу впровадити розподілену систему управління інтелектуальним заводом відповідно до концепції *Industry 4.0* та *Industry 5.0*.

Технологія цифрових двійників – це новітній підхід, що передбачає створення віртуальної моделі фізичного об'єкта, процесу або системи, яка може бути використана для моделювання, моніторингу, тестування та прогнозування можливого розвитку подій на основі інформації від розподіленої мережі сенсорів технологічного обладнання.

Успішне впровадження технології цифрових двійників у інтелектуальне виробництво в поєднанні з хмарними обчисленнями та машинним навчанням спрямоване на досягнення цілей сталого розвитку, що наближає галузь індустрії до людини, щоб задовольнити потреби сучасних поколінь без шкоди для майбутніх поколінь [10].

Об'єкт дослідження – децентралізоване управління виробничими процесами на інтелектуальному виробництві. *Предмет дослідження* – архітектура розподіленої автоматизованої системи управління технологічним процесом на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу.

Метою дослідження є вдосконалення методів децентралізованого управління технологічними процесами для підвищення ефективності виробничого процесу на інтелектуальному виробництві внаслідок інтеграції цифрових двійників в автоматизовану систему управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автори роботи [9] визначають, що особливістю взаємодії між технічними засобами автоматизації сучасного виробництва в межах концепцій

Industry 4.0 та *Industry 5.0* є злиття цифрових і фізичних процесів. Переваги, що випливають з цифровізації та технологій, пов'язаних з *Big Data*, можуть бути успішно використані в промислових середовищах лише за умови поєднання подання фізичних об'єктів та засобів генерації даних – розумних датчиків та технології промислового Інтернету речей. Одним із підходів до отримання такого подання фізичних об'єктів у вигляді цифрового двійника є моделювання та оцифрування процесів, що виникають в кіберфізичних виробничих системах (CPPS).

У роботі [6] автори пропонують поняття цифрового двійника, віртуальної симуляції фізичної системи або процесу, що використовується для моніторингу, контролю та оптимізації його реального аналога. У контексті розумного виробництва цифровий двійник застосовується для створення віртуального подання заводу або виробничої лінії, що дає змогу виробникам моделювати та оптимізувати свої виробничі процеси, виявляти потенційні проблеми й можливості для вдосконалення, а також приймати обґрунтовані рішення щодо планування виробництва та розподілу ресурсів.

Цифровий двійник для інтелектуального виробництва зазвичай передбачає використання датчиків та інших інструментів для збору даних у режимі реального часу про фізичну систему або процес, такі як продуктивність машини, температура, тиск та інші параметри [6]. Потім ця інформація подається в цифрову модель, що моделює поведінку фізичної системи та дає змогу виробникам візуалізувати й аналізувати їхню роботу в режимі реального часу.

У праці [11] розглянуто цифрові двійники, які є основною концепцією в автоматизованих системах управління технологічними процесами та відіграють ключову роль в реалізації структури інтелектуального заводу. Автори показали, що за допомогою цифрових двійників можна отримати цифрові копії фізичних систем для того, щоб вони відтворювали внутрішню поведінку реальних систем. У роботі показано, що синхронізація необхідна з метою підтримання відповідності стану цифрових двійників і стану їх фізичних аналогів. Автори розглянули три різні архітектури для цифрових двійників, а також дослідили їх здатність стежити за поведінкою фізичної системи.

У статті [12] визначено концепцію цифрових двійників, показано еволюцію та розвиток цифрових

двійників, розглянуто їх базові характеристики, визначено роль ІоТ як опори цифрових двійників, досліджено тенденції розвитку цифрових двійників і методи їх застосування у виробничому процесі у впровадженні концепції *Industry 4.0*. Автори дають визначення концепції *Industry 5.0* як розвитку передових технологій цифровізації та технологій на основі штучного інтелекту з метою підвищення ефективності та адаптивності виробництва до принципів соціальної справедливості та сталого розвитку.

Industry 4.0 пропонує потенціал для підвищення гнучкості та ефективності виробництва, зниження витрат на вихід штучної продукції та збільшення конкурентних переваг виробничих потужностей [13]. У цій роботі показано, що сучасні тенденції до *Industry 5.0* є додатковим поглядом, спрямованим на сталий розвиток індустрії, що орієнтована на людину. Концепція *Industry 5.0* є ще більш комплексною стратегією в галузі науки, технологій та інновацій, забезпечуючи водночас ефективне реагування на зростання економічних, технологічних і соціальних викликів [14].

Цифрові двійники перебувають в авангарді промислової революції та концепції *Industry 4.0/5.0*, чому сприяють розширені підходи до аналітики даних та інтеграція з промисловим Інтернетом речей [14, 15]. Багате даними середовище ІоТ у поєднанні з аналітикою великих даних забезпечує необхідний ресурс для розв'язання різних проблем на рівні цифро-фізичного інтерфейсу, зокрема прогнозоване обслуговування та вчасне виявлення небезпечних ситуацій на інтелектуальному виробництві [13].

Інтеграція цифрових двійників у автоматизовану систему управління технологічними процесами

Цифровий двійник – це цифрове подання фізичної системи або процесу, за допомогою якого можна виконувати моніторинг стану ТП, аналіз та оптимізацію виробництва в режимі реального часу [6].

Цифровий двійник дає змогу забезпечити точне подання фізичного об'єкта або системи в цифровому середовищі, зважаючи на його поведінку, продуктивність і взаємодію з навколишнім середовищем кіберфізичної системи [16].

Для виконання цього завдання цифрові двійники використовують машинне навчання, технологію оброблення великих даних, математичні моделі та засоби моделювання для того, щоб відтворити та проаналізувати різні умови роботи обладнання, поведінку процесу та інші фактори, що впливають на протікання виробничих процесів на інтелектуальному виробництві.

Аналізуючи дані з фізичного об'єкта в реальному часі, цифровий двійник може виконувати обчислення відповідно до математичної моделі та надавати зворотний зв'язок у вигляді очікуваних даних для порівняння їх з тими, що отримані від датчиків реального обладнання. Це дає змогу контролювати ефективність і продуктивність виробничого процесу, виявляти потенційні проблеми на різних етапах технологічного процесу, ще до того, як вони можуть виникнути.

Розподілена система управління – це спеціально розроблена децентралізована система, яка використовується для управління складними, великими та територіально розподіленими застосунками в промислових процесах. У цьому разі контролери розподілені по всій площі заводу (рис. 3, а).

Пристрої польового рівня, такі як датчики (Д) та виконавчі пристрої (В) (рис. 3, а), безпосередньо під'єднуються до модулів контролера входу та виходу через шину зв'язку. Ці польові пристрої або розумні прилади здатні обмінюватися даними з програмованими логічними контролерами (ПЛК) або іншими контролерами, взаємодіючи з реальними параметрами, такими як температура, тиск тощо. Контролери територіально розподілені по різних ділянці диспетчерської зони й під'єднані до діючих та інженерних станцій, які використовуються для моніторингу й реєстрації даних, сигналізації та управління по іншій шині високошвидкісного зв'язку.

Децентралізована система управління з використанням цифрових двійників зображена на рис. 3, б [17]. У цій архітектурі промисловий простір поділяється на два основні сегменти: фізичний простір та віртуальний простір. Фізичний простір містить фізичні сутності (ФС), тоді як віртуальний простір є цифровим середовищем, де реалізовані цифрові двійники. Інтерфейс між ними організують промислові комунікаційні шлюзи, здатні обробляти різні промислові протоколи (наприклад, *OPC-UA*, *Modbus* і *MQTT*).

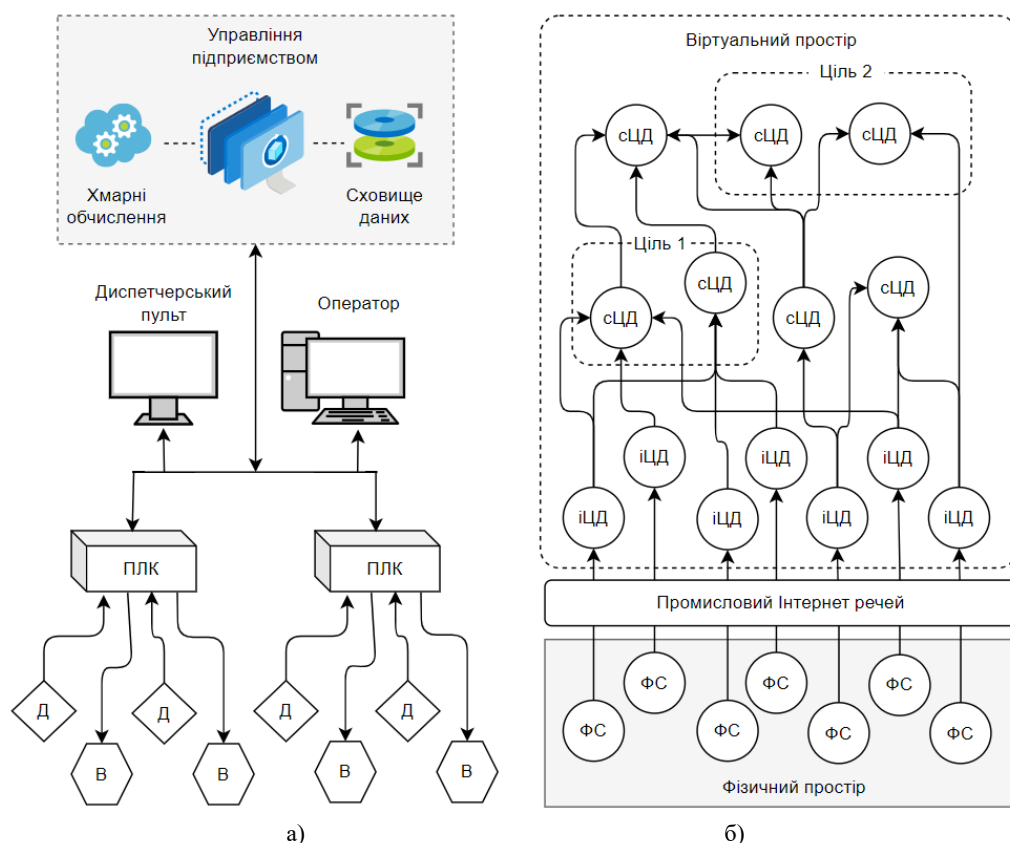


Рис. 3. Запропонована архітектура розподіленої АСУ ТП на інтелектуальному заводі:

- а) архітектура розподіленої системи управління виробничим процесом;
- б) децентралізована система управління з використанням цифрових двійників

У віртуальному просторі набір основних компонентів відіграє важливу роль в організації безшовного об'єднання та нагляду за цифровими двійниками й пов'язаними з ними послугами. Ґрунтуючись на принципах сервіс-орієнтованої архітектури (SOA) та мікросервісів, ці компоненти забезпечують гнучку систему, що задовольняє складні потреби сучасного промислового середовища [17]. Реєстр цифрових двійників (РЦД) слугує репозиторієм, що сприяє ефективній каталогізації цифрових двійників та їх відповідних служб у межах архітектури. Він дотримується принципів SOA, сприяючи слабким зв'язкам між цифровими двійниками та послугами, унаслідок чого здійснюється компонування цілеспрямованих цифрових двійників. РЦД розширює концепцію реєстру послуг у SOA, не лише керуючи кінцевими точками служби, але й інкапсулюючи детальну інформацію про цифрових двійників, що сприяє ефективному виявленню та управлінню у віртуальному просторі.

На рис. 3, б запропоновано такі позначки: індивідуальний цифровий двійник (іЦД) і складений

цифровий двійник (сЦД). Індивідуальні цифрові двійники адаптовані для індивідуального відтворення окремих фізичних сутностей у відповідні цифрові аналоги. Охоплюючи сутність окремих фізичних сутностей, іЦД формують основу для створення промислового ландшафту, орієнтованого на програмне забезпечення. Складені цифрові двійники, на відміну від сЦД, створюються зі складу кількох іЦД. Ці структури використовують стратегію відношення "багато до багатьох", об'єднуючи кілька іЦД для створення всеосяжного та багатогранного цифрового подання. Вони слугують конкретним цілеспрямованим рішенням, реалізуючи спільну роботу різноманітних промислових елементів. Наприклад, сЦД може подавати цілу виробничу лінію за допомогою об'єднання іЦД складників технічних засобів автоматизації, датчиків і систем управління.

На рис. 4 подано запропоновану архітектуру автоматизованої системи управління технологічним процесом на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу.

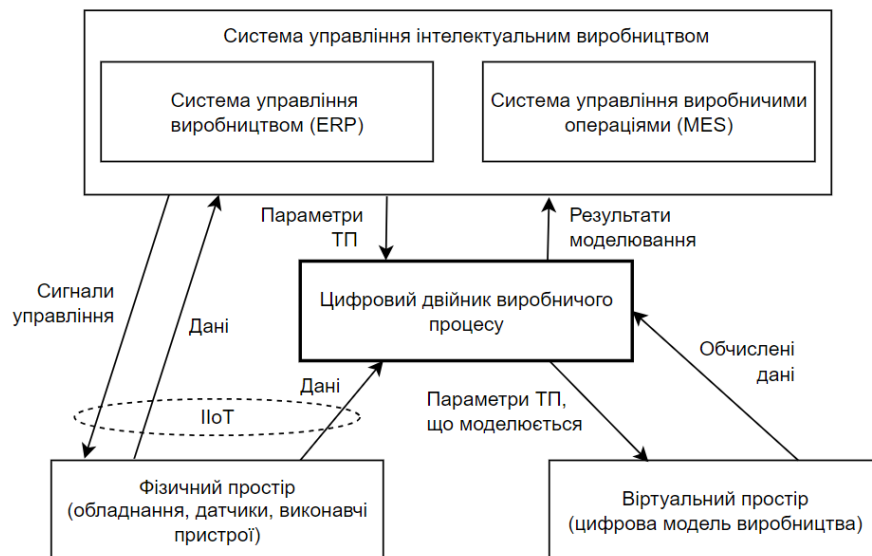


Рис. 4. Запропонована архітектура автоматизованої системи управління технологічним процесом на інтелектуальному заводі з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу

Запропонована архітектура інтеграції цифрових двійників у автоматизовану систему управління технологічними процесами містить такі компоненти:

- система управління інтелектуальним виробництвом, складниками якої є система управління ресурсами підприємства (ERP) та система управління виробничими операціями (MES);
- обладнання, датчики, виконавчі пристрої та інші технічні засоби автоматизації, що становлять фізичний простір;
- цифровий двійник виробничого процесу;
- цифрова модель виробництва, що становить віртуальний простір;
- сенсорні мережі та технології передавання даних, що належать до промислового Інтернету речей [18].

Фізичний простір генерує великий набір даних, що відтворюють поточний стан виробничого процесу. За допомогою технології промислового Інтернету речей створюється розподілена мережа датчиків і виконавчих пристроїв. Інформація збирається та передається в режимі реального часу, використовуючи комунікаційні протоколи та інтерфейси *Ethernet*, *Wi-Fi*, *LoRa*, *NB-IoT*, *5G*, *Bluetooth* тощо [19, 20].

Зібрані дані потрапляють як безпосередньо в систему управління інтелектуальним виробництвом, так і до цифрового двійника виробничого процесу. Основна мета системи управління інтелектуальним виробництвом полягає в досягненні максимальної автоматизації процесів, мінімізації втручання людини та забезпеченні можливості реагування на зміни

у виробничому середовищі з мінімальними затратами часу й ресурсів.

Для ефективного управління виробничим процесом загальна система інтегрується з іншими інформаційними системами, такими як система управління ресурсами підприємства (ERP) та система управління виробництвом (MES). Така інтеграція дає змогу з'єднувати бізнес-процеси з виробничими, забезпечуючи безперебійний обмін інформацією про запаси, ресурси, замовлення та інші ключові показники діяльності підприємства.

Запропонована архітектура передбачає застосування цифрового двійника як додаткового компонента загальної системи управління виробничим процесом. Цифровий двійник отримує таку саму інформацію від датчиків, що й загальна система, накопичує та обробляє її відповідно до математичної моделі цього процесу [21]. Для виконання обчислень, крім даних із датчиків, цифровий двійник отримує також і задані параметри технологічного процесу, що надаються системою управління.

Для моделювання поведінки технологічного процесу за умови різних вхідних параметрів використовується цифрова модель виробництва (віртуальний простір), що містить цифрові моделі обладнання, опис ланцюжків постачання сировини та перевезення заготівель між технологічним устаткуванням.

На основі симуляції виробничого процесу у віртуальному просторі генерується потік обчислених

даних, що є додатковою інформацією для цифрового двійника. У такий спосіб формуються результати моделювання, що передаються далі в систему управління інтелектуальним виробництвом.

Аналізуючи отримані дані з різних джерел, система управління порівнює результати обчислень із реальним станом технологічного процесу. На основі порівняння приймається рішення про вплив на виконавчі пристрої фізичного простору через розподілену мережу промислового Інтернету речей.

Отже, цифровий двійник відіграє роль ідеального виробничого середовища, з яким порівнюють стан фізичних процесів, що протікають на реальному

виробництві. Раннє виявлення проблем допомагає уникнути збоїв, здатних знизити якість виробництва. Завдяки інтегруванню цифрових двійників можна передбачити, коли виникне проблема та розв'язати питання технічного обслуговування обладнання до того, як воно вийде з ладу.

Експериментальні дослідження

Для проведення експерименту інтеграції цифрового двійника в управління технологічними процесами використовується архітектура автоматизованої системи (рис. 5).

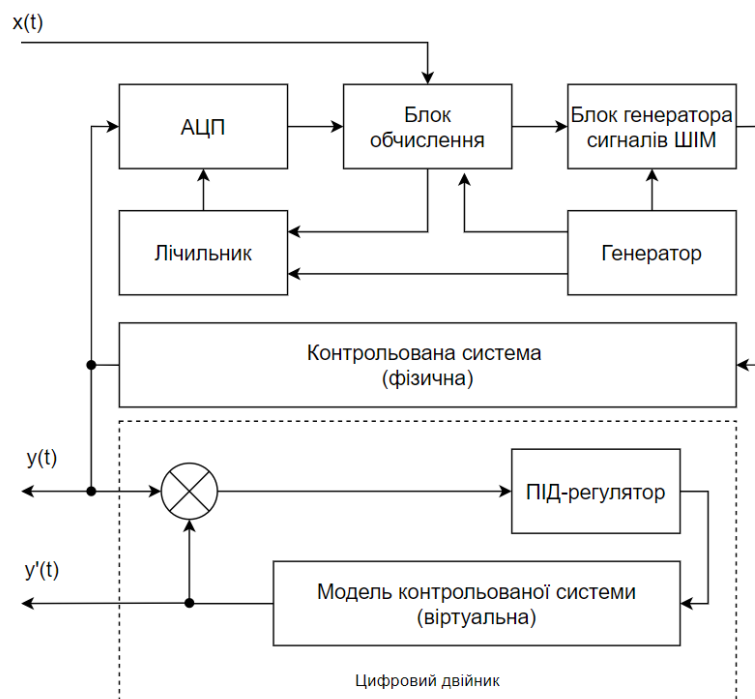


Рис. 5. Архітектура автоматизованої системи з використанням цифрового двійника

У цій автоматизованій системі виробляється два сигнали управління:

- $y(t)$ – сигнал на виході контрольованої системи;
- $y'(t)$ – сигнал на виході цифрового двійника

контрольованої системи.

Зазначені два сигнали надходять на вхід глобальної системи управління виробничим процесом, як це зображено на рис. 4. На основі порівняння сигналів $y(t)$ та $y'(t)$ глобальна система управління приймає рішення про зміну режимів управління блока обчислень унаслідок зміни вхідного сигналу $x(t)$, що надходить від системи прийняття рішень.

Прикладом контрольованої системи може бути RC-ланцюг, що отримує на вхід сигнали ШІМ від блоку обчислень та на виході формує напругу, пропорційну частоті ШІМ. Блок обчислень працює за принципом ПІД-регулятора. Залежно від параметрів налаштування ПІД-регулятора блок обчислень виробляє сигнали управління для блока ШІМ-генератора.

Замкнена система отримана внаслідок поєднання виходу RC-ланцюга з блоком аналого-цифрового перетворювача. Цей блок перетворює вхідну напругу в цифровий сигнал, щоб передати його на блок виконання обчислень. Лічильник потрібен для підрахунку імпульсів від генератора та управління АЦП.

Зовнішній вигляд макета для досліджень подано на рис. 6.

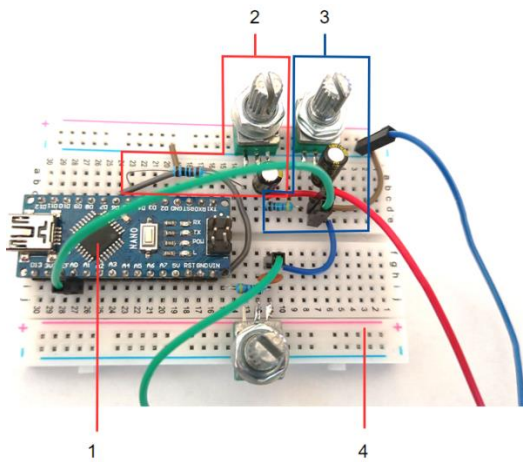


Рис. 6. Зовнішній вигляд макета для досліджень

Макет зібрано на основі *Arduino* (1), у який завантажено програмний цифровий ПІД-регулятор. Усі деталі макета поєднані за допомогою макетної

плати (4). Перша RC-ланка (2) реалізована на постійному резисторі з опором 1 кОм та змінному резисторі з опором 100 кОм, а також з використанням конденсатора ємністю 47 мкФ. Змінний резистор дає змогу змінювати параметри RC-ланки, змінюючи цим перехідну характеристику виконавчого елемента схеми. Друга RC-ланка (3) має схожу реалізацію, але постійний резистор має номінал 4,7 кОм. Змінний резистор і конденсатор мають такі самі номінали, що й у першій RC-ланці (2).

Функціональна схема макета на основі *Arduino Nano* зображена на рис. 7. RC-ланки під'єднані до виходу мікроконтролера, на якому реалізовано виведення ШІМ-сигналу. За структурною схемою це вихід $u(t)$. Вихід з RC-ланок, відповідно до функціональної схеми, – це вихід $y(t)$, він під'єднується до аналогового входу контролера під номером A0.

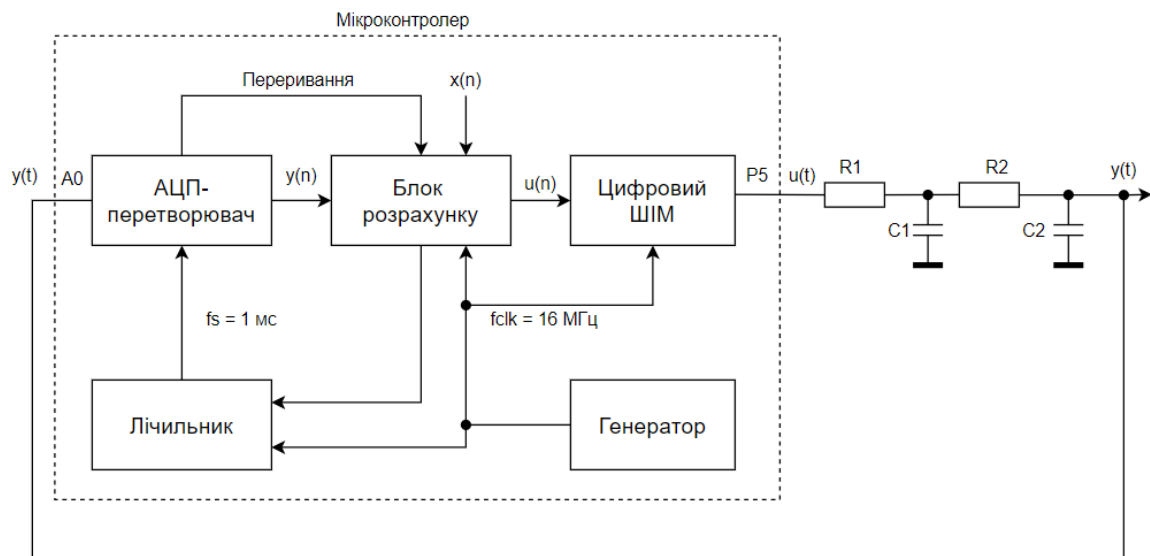


Рис. 7. Функціональна схема контролера

На рис. 8 подана загальна блок-схема системи автоматичного керування, що реалізована в макеті [22]. Система містить регулятор з передавальною функцією $G(s)$, об'єкт (об'єкт, керована система,

система) з передавальною функцією $H(s)$ і вузла підсумовування, у якому задане значення $X(s)$ порівнюється з вихідним сигналом $Y(s)$ [11].

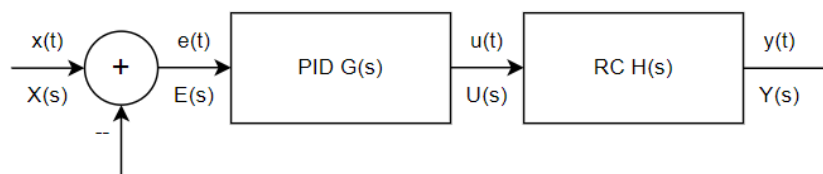


Рис. 8. Загальна блок-схема системи автоматичного керування, що реалізована в макеті

Для цієї системи управління можна записати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} Y(s) = E(s)G(s)H(s) \\ E(s) = X(s) - Y(s) \end{cases}, \quad (1)$$

де $X(s)$ – бажане значення процесу або задане значення; $E(s)$ – значення похибки як різниця між бажаним заданим значенням $X(s)$ і вимірним значенням процесу $Y(s)$, $E(s) = X(s) - Y(s)$; $G(s)$ – передатна функція регулятора; $H(s)$ – передатна функція керованої системи (об'єкта); $Y(s)$ – вимірне значення процесу; $U(s)$ – контрольна змінна.

Із системи рівнянь (1) можна визначити передатну функцію замкненої системи керування

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)H(s)}{1 + G(s)H(s)}. \quad (2)$$

Передатна функція аналогового ПІД-регулятора, що реалізована в макеті, визначається рівнянням

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (3)$$

де k_c – підсилення регулятора, параметр налаштування;

T_d – час похідної, параметр налаштування;

T_i – інтегральний час, параметр налаштування.

Для ПІД-регулятора керуюче значення $U(s)$ містить три члени:

– $U_p(s)$ – пропорційний член;

$$U(z) = E(z)k_c + k_c \frac{T_s}{2T_i} (E(z) + E(z)z^{-1}) + U_i(z)z^{-1} + k_c \frac{T_d}{T_i} (E(z) - E(z)z^{-1}). \quad (6)$$

Тепер значення змінної цифрового керування можна розрахувати за допомогою різничевого рівняння

$$u(n) = k_c e(n) + k_c \frac{T_s}{2T_i} (e(n) + e(n+1)) + u_i(n-1) + k_c \frac{T_d}{T_i} (e(n) - e(n+1)). \quad (7)$$

Цифрова керуюча змінна $u(n)$ перетворюється в аналогову форму цифро-аналоговим перетворювачем. У цьому разі ШІМ-модулятор також використовується як ЦАП [25].

Перед цифро-аналоговим перетворенням керуюча змінна $u(n)$ має бути масштабована до діапазону ЦАП і приведена до цілого типу:

$$u_N(n) = (\text{int})((1 + u(n))0, 5N_L), \quad (8)$$

– $U_i(s)$ – інтегральний член;

– $U_d(s)$ – диференційний член.

Отже, значення керуючої змінної ПІД-регулятора можна визначити за допомогою рівняння

$$U(s) = E(s)k_c + \frac{k_c}{T_i} \frac{1}{s} E(s) + k_c T_d E(s)s. \quad (4)$$

Інтегральний член (4) переводиться в цифрову форму за допомогою білінійного перетворення. Z -перетворення є цифровим аналогом безперервного перетворення Лапласа й використовується для аналізу дискретних систем. Після застосування білінійного перетворення зв'язок між змінною s (у домені Лапласа) і z (у домені z -перетворення) задається так:

$$s = \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1}, \quad (5)$$

де T_s – період вибірки;

z – змінна в ділянці z -перетворення (для цифрових систем);

s – змінна в ділянці Лапласа (для безперервних систем).

Цей перехід дає змогу перетворити безперервні передатні функції та рівняння регулятора на цифрові, щоб їх можна було використовувати в дискретних системах управління, таких як програмовані контролери або цифрові фільтри.

Унаслідок перетворення формула (4) матиме такий вигляд [23, 24]:

де N_L – кількість станів цифрового ШІМ-модулятора або цифро-аналогового перетворювача.

Діапазон змінної $u_N(n)$ становить $0 \dots N_L - 1$.

Для моделювання динамічних об'єктів використовується послідовне увімкнення двох інтегрованих RC-ланок. На рис. 9 подано двоступеневий RC-ланцюг, що утворює керовану систему другого порядку.

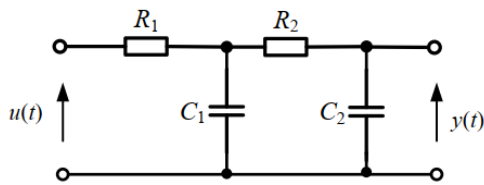


Рис. 9. Послідовне увімкнення двох інтегрованих RC-ланок

Ця схема обмежена, оскільки її добротність Q завжди менша ніж 0,5, з $R_1 = R_2$ і $C_1 = C_2$, $Q = 1/3$. У цій схемі Q наближається до максимального значення $1/2$, коли опір другого каскаду RC набагато більший, ніж перший.

Передавальна функція RC-ланки може бути записана у вигляді

$$H(s) = \frac{1}{1 + s(R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) + s^2 (R_1 C_1 R_2 C_2)}. \quad (9)$$

Для виконання моделювання встановимо такі параметри подвійної RC-ланки:

- $R_1 = 11,6$ кОм;

- $C_1 = 47$ мкФ;

- $R_2 = 9,4$ кОм;

- $C_2 = 47$ мкФ.

Отже, перехідна характеристика подвійної RC-ланки, відповідно до (9), після виконання арифметичних операцій запишеться у вигляді

$$H(s) = \frac{1}{1 + 1,53s + 0,24s^2}. \quad (10)$$

Виконаємо моделювання ПІД-регулятора за допомогою *Simulink*. Для цього побудуємо наступну структурну схему замкненої системи, як подано на рис. 10.

Після першого запуску симуляції роботи ПІД-контролера на виході осцилографа отримуємо графік $y(t)$ (рис. 11). З поданого рисунка можна бачити, що система має властивості перерегулювання.

У процесі моделювання використовувались такі параметри: $K_p = 2$; $T_i = 3$; $T_d = 0$.

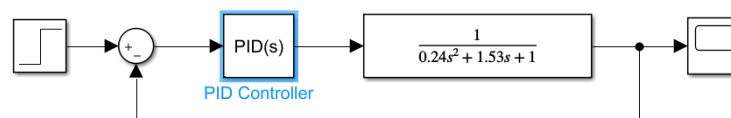
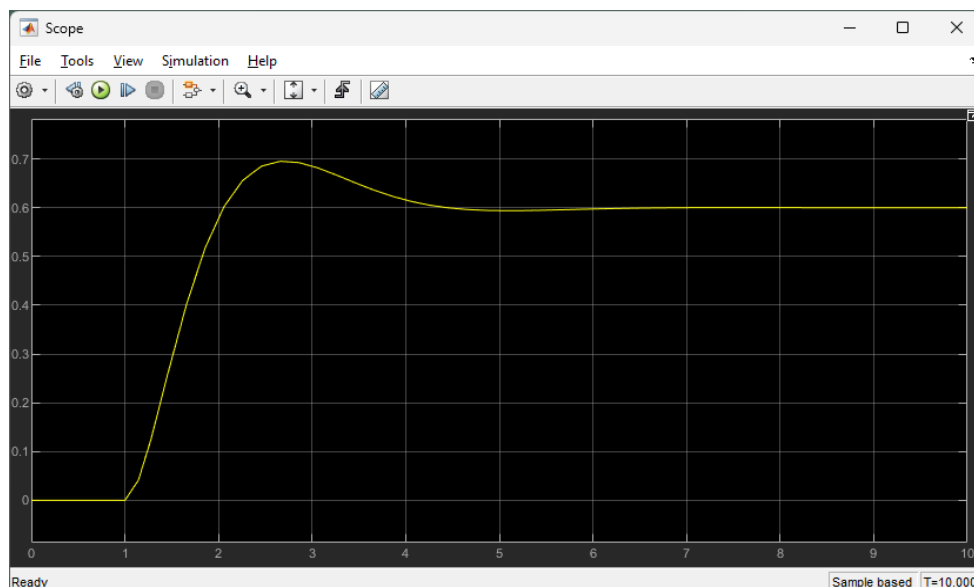


Рис. 10. Структурна схема модельованої системи

Рис. 11. Графік функції $y(t)$

Наступним кроком виконаємо порівняння результатів роботи фізичного макета з програмною моделлю цифрового двійника. На рис. 12 подані значення коефіцієнтів регулятора.

```
const float Kc = 10.0; // controller gain
const float Ti = 3.0; // 2.5; // integral time
volatile float x = 0.6; // setpoint value, range 0...1
const float Td = 1.0; // derivative time
```

Рис. 12. Значення коефіцієнтів ПІД-регулятора

За наведеними параметрами отримуємо наступний графік $y(t)$ (рис. 13).



Рис. 13. Графік $y(t)$ ПД-регулятора для першої спроби налаштування

З поданого графіка можна бачити ознаки перерегулювання, але зовнішній вигляд вихідного сигналу відповідає його цифровій моделі. Результати моделювання показали, що фізичний макет досить точно відтворює поведінку математичної моделі ПД-регулятора із заданими параметрами.

Висновки

У роботі запропоновано архітектуру розподіленої автоматизованої системи управління технологічним процесом на інтелектуальному підприємстві з інтеграцією технології промислового Інтернету речей та цифрового двійника виробничого процесу. Надано тлумачення поняття "цифровий двійник" у контексті поєднання цієї технології з процесами сталого розвитку та трансформації виробничої галузі.

Досліджено запропонований метод інтеграції цифрового двійника в управління технологічними процесами. Наведено архітектуру автоматизованої системи з використанням цифрового двійника як еталона, що описує розвиток процесу керування об'єктом автоматизації із застосуванням цифрового ПД-регулятора.

У процесі моделювання структури автоматичної системи управління розглянуто реакцію кола інтегруючого типу на одиничний вхідний перепад із заданою амплітудою та залежність часу досягнення стійкості системи від параметрів ПД-регулятора. Для реалізації цифрового ПД-регулятора використано внутрішній 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач для перетворення сигналу $y(t)$, а ШІМ-модулятор було застосовано як 8-розрядний цифро-аналоговий перетворювач для перетворення сигналу керуючої змінної. За результатами експерименту можна бачити ознаки перерегулювання, але зовнішній вигляд вихідного сигналу відповідає його цифровій моделі. Результати моделювання показали, що фізичний макет досить точно відтворює поведінку математичної моделі ПД-регулятора із заданими параметрами.

Отже, інтеграція цифрових двійників у автоматизовану систему управління дасть змогу вдосконалити методи децентралізованого керування технологічними процесами та підвищити ефективність інтелектуального виробництва.

Список літератури

1. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O. Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, No. 3. P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12>
2. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O. Control automation of assembly operations using a computer vision system in intelligent production. *Journal of natural sciences and technologies*. 2023. Vol. 2(2). P. 173–182. DOI: [10.5281/zenodo.8098567](https://doi.org/10.5281/zenodo.8098567)
3. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O. Modeling and practical implementation of the optimal wireless security gateway for the industrial automation network. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 19, No. 3. P. 303–327. DOI: <https://doi.org/10.2298/sjee2203303n>
4. Eckhart M., Ekelhart A. Digital twins for cyber-physical systems security: State of the art and outlook. *Security and Quality in CyberPhysical Systems Engineering*. Springer. 2019. P. 383–412. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25312-7_14
5. Soori M., Arezoo B., Dastres R. Digital twin for smart manufacturing, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. 2023. Vol. 2. 100017 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>
6. Integration of Blockchain and Digital Twins in the Smart Built Environment Adopting Disruptive Technologies / H. Sadri et al. *A Systematic Review*. *Sustainability*, 2023. Vol. 15(4). 3713 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043713>
7. Goudarzi M., Ilager Sh., Buyya R. Cloud Computing and Internet of Things: Recent Trends and Directions. *New Frontiers in Cloud Computing and Internet of Things*. Internet of Things. Cham: Springer. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05528-7_1
8. Technopolis Group. URL: <https://www.technopolis-group.com/wp-content/uploads/2020/05/internet-of-things.pdf> (дата звернення: 16.02.2025).
9. Industrial Internet of Things / ed. by S. Jeschke et al. Cham: Springer International Publishing. 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-42559-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7)
10. The 17 goals. *Sustainable Development*. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (дата звернення: 18.02.2025).
11. Akbarian F., Fitzgerald E., Kihl M. Synchronization in Digital Twins for Industrial Control Systems. *Systems and Control*. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.03447> (дата звернення: 15.01.2025).
12. Attaran Sh., Attaran M., Celik B. Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
13. Digital Twins Approach for Sustainable Industry / L. Xu et al. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2022. P. 126–134. DOI: [10.1007/978-3-031-07478-3_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-07478-3_11)
14. Industry 5.0. *Research and innovation*. URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en (дата звернення: 18.02.2025).
15. Timperi M., Kokkonen K., Hannola L. Digital twins for environmentally sustainable and circular manufacturing sector: visions from industry professionals. *Production & Manufacturing Research*. 2024. Vol. 12(1). DOI: [10.1080/21693277.2024.2428249](https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2428249)
16. Невлюдов І. ІІ., Новоселов С. П., Сичова О. В. Застосування цифрових двійників технічних засобів автоматизації для розроблення програмно-технічних комплексів АСУ ТП: Навчальний посібник. Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2023. 267 с. ISBN 978-617-8059-95-8. DOI: [10.30837/978-617-8059-95-8](https://doi.org/10.30837/978-617-8059-95-8)
17. Distributed Digital Twins as Proxies – Unlocking Composability & Flexibility for Purpose-Oriented Digital Twins / A. Aziz et al. *IEEE Access*. 2023. P. 1–17. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3340132](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3340132)
18. Novoselov S. Wireless Sensor Network for Communication Between Base Stations in the Local Positioning System. *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. 2018, P. 383–386, DOI: [10.1109/INFOCOMMST.2018.8632140](https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632140)
19. Leite J., Martins P., Ursini E. Internet of Things: An Overview of Architecture, Models, Technologies, Protocols and Applications. *Emerging Trends and Challenges in Technology*. 2019. DOI: [10.1007/978-3-319-93112-8_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93112-8_8)
20. New Technological Waves Emerging in Digital Transformation: Internet of Things IoT/IoE, 5G/6G Mobile Networks and Industries 4.0/5.0. / L. Emiliano et al. *Smart Innovation*. 2023. P. 329–339. DOI: [10.1007/978-3-031-31007-2_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31007-2_30)
21. Nevliudov I., Novoselov S., Sychova O. Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. 2023. P. 1–6. DOI: [10.1109/MEES61502.2023.10402485](https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402485)
22. Enhancing Industrial Process Control: Integrating Intelligent Digital Twin Technology with Proportional-Integral-Derivative Regulators / A. Dapkute et al. *Machines*. 2024. Vol. 12(5), No 319. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12050319>
23. Soza'nski K. Low Cost PID Controller for Student Digital Control Laboratory Based on Arduino or STM32 Modules. *Electronics*. 2023. Vol 12, No. 3235. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12153235>
24. Astrom K. J., Wittenmark B. Computer Controlled System, Theory and Design. Electronics and Power. 2013. ISBN: 0131643193. URL: https://www.academia.edu/37044747/Computer_Controlled_Systems_Astrom_3rdEdition
25. Ibrahim D. PID-based Practical Digital Control with Raspberry Pi and Arduino Uno. Elektor International Media B.V. 2022. 238 p. ISBN: 978-3-89576-520-9.

References

1. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O. (2024), "Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, No. 3, P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12>
2. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O. (2023), "Control automation of assembly operations using a computer vision system in intelligent production", *Journal of natural sciences and technologies*, Vol. 2(2), P. 173–182. DOI: 10.5281/zenodo.8098567
3. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O. (2022), "Modeling and practical implementation of the optimal wireless security gateway for the industrial automation network", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 19, No. 3, P. 303–327. DOI: <https://doi.org/10.2298/sjee2203303n>
4. Eckhart, M., Ekelhart, A. (2019), "Digital twins for cyber-physical systems security: State of the art and outlook", *Security and Quality in CyberPhysical Systems Engineering*. Springer, P. 383–412. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25312-7_14
5. Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R. (2023), "Digital twin for smart manufacturing, A review", *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, Vol. 2, 100017 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>
6. "Integration of Blockchain and Digital Twins in the Smart Built Environment Adopting Disruptive Technologies" / H. Sadri et al. (2023), *A Systematic Review. Sustainability*, Vol. 15(4), 3713 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043713>
7. Goudarzi, M., Ilager, Sh., Buyya, R. (2022), "Cloud Computing and Internet of Things: Recent Trends and Directions", *New Frontiers in Cloud Computing and Internet of Things. Internet of Things. Cham: Springer*, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-05528-7_1
8. "Technopolis Group". available at: <https://www.technopolis-group.com/wp-content/uploads/2020/05/internet-of-things.pdf> (last accessed: 16.02.2025).
9. "Industrial Internet of Things / ed. by S. Jeschke et al. " (2017), *Cham: Springer International Publishing*. DOI: 10.1007/978-3-319-42559-7
10. "The 17 goals". *Sustainable Development*. available at: <https://sdgs.un.org/goals> (last accessed: 18.02.2025).
11. Akbarian, F., Fitzgerald, E., Kihl, M. (2020), "Synchronization in Digital Twins for Industrial Control Systems", *Systems and Control*. available at: <https://arxiv.org/pdf/2006.03447> (last accessed: 15.01.2025).
12. Attaran, Sh., Attaran, M., Celik, B. (2024), "Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0", *Decision Analytics Journal*, Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
13. "Digital Twins Approach for Sustainable Industry / L. Xu et al." (2022), *Lecture Notes in Business Information Processing*, P. 126–134. DOI: 10.1007/978-3-031-07478-3_11
14. "Industry 5.0. Research and innovation". available at: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en (last accessed: 18.02.2025).
15. Timperi, M., Kokkonen, K., Hannola, L. (2024), "Digital twins for environmentally sustainable and circular manufacturing sector: visions from industry professionals", *Production & Manufacturing Research*, Vol. 12(1). DOI: 10.1080/21693277.2024.2428249
16. Nevlyudov, I. Sh., Novoselov, S. P., Sychova, O. V. (2023), "Application of digital twins of technical automation tools for the development of software and hardware complexes of automated control systems:" Textbook. [Zastosuvannya tsyfrovyykh divyinykhiv tekhnichnykh zasobiv avtomatyzatsiyi dlya rozrobky prohramno-tekhnichnykh kompleksiv ASU TP] Kharkiv: Ivanchenko I. S. Publishing House, 267 p. ISBN 978-617-8059-95-8. DOI: 10.30837/978-617-8059-95-8
17. "Distributed Digital Twins as Proxies - Unlocking Composability & Flexibility for Purpose-Oriented Digital Twins / A. Aziz et al. (2023) *IEEE Access*. P. 1-17. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3340132
18. Novoselov, S. (2018), "Wireless Sensor Network for Communication Between Base Stations in the Local Positioning System", *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, P. 383–386, DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632140
19. Leite, J., Martins, P., Ursini, E. (2019), "Internet of Things: An Overview of Architecture, Models, Technologies, Protocols and Applications", *Emerging Trends and Challenges in Technology*. DOI: 10.1007/978-3-319-93112-8_8
20. "New Technological Waves Emerging in Digital Transformation: Internet of Things IoT/IoE, 5G/6G Mobile Networks and Industries 4.0/5.0. / L. Emiliano et al." (2023), *Smart Innovation*, P. 329–339. DOI: 10.1007/978-3-031-31007-2_30
21. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O. (2023), "Modeling of a Decentralized System for Maintenance of Production Equipment Based on Transport Robots", *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402485
22. "Enhancing Industrial Process Control: Integrating Intelligent Digital Twin Technology with Proportional-Integral-Derivative Regulators / A. Dapkute et al." (2024), *Machines*, Vol. 12(5), No 319. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12050319>
23. Soza'nski, K. (2023), "Low Cost PID Controller for Student Digital Control Laboratory Based on Arduino or STM32 Modules", *Electronics*, Vol 12, No. 3235. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12153235>
24. Astrom, K. J., Wittenmark, B. (2013), "Computer Controlled System, Theory and Design", *Electronics and Power*. ISBN: 0131643193. available at: https://www.academia.edu/37044747/Computer_Controlled_Systems_Astrom_3rdEdition
25. Ibrahim, D. (2022), "PID-based Practical Digital Control with Raspberry Pi and Arduino Uno", *Elektor International Media B.V.*, 238 p. ISBN: 978-3-89576-520-9.

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Новоселов Сергій Павлович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: sergiy.novoselov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3190-0592>

Сичова Оксана Володимирівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oksana.sychova@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0651-557X>

Nevlyudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Novoselov Sergiy – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Sychova Oksana – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

METHOD OF DECENTRALIZED CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN INTELLIGENT MANUFACTURING

The technology of digital twins involves the creation of a virtual model of a physical object, process, or system that can be used for modeling, monitoring, testing, and predicting possible future developments based on information from a distributed network of sensors of technological equipment. The implementation of digital twins in the system of automated control of technological processes will allow increasing the efficiency of production processes in intelligent manufacturing. The **subject** of the research is the architecture of an automated process control system of technology process (ACS TP) in an intelligent factory with the integration of the Industrial Internet of Things technology and a digital twin of the production process. The **aim** of the research is to improve decentralized control methods for technological processes to enhance the efficiency of production processes in intelligent manufacturing by integrating digital twins into automated control systems. **Task:** to develop the architecture of a distributed ACS TP in an intelligent factory with the integration of the Industrial Internet of Things technology and a digital twin of the production process. To review the concept of "Digital Twin" in the context of combining this technology with the processes of sustainable development and transformation of the manufacturing industry. To conduct research on the proposed method of integrating a digital twin into the TP management task. In the research, the following **methods** were used: computer modeling, methods of automatic control theory, methods of analysis, and synthesis of decentralized production systems. The following **results** were obtained: an architecture of an automated system was developed using a digital twin as a reference model, which describes the ideal development of the control process of the automation object using a digital PID controller. The simulation results showed that the physical model quite accurately reproduces the behavior of the mathematical model of the PID controller with the given parameters. **Conclusions:** the results of the experimental research showed that the integration of digital twins into automated control systems improves decentralized control methods for technological processes and enhances the efficiency of production processes in intelligent manufacturing. The successful implementation of digital twin technology in intelligent manufacturing, in combination with cloud computing and machine learning, is aimed at achieving sustainable development goals, specifically addressing task 9.5.

Keywords: industrial; innovation; Industry 5.0; Internet of Things; intelligent manufacturing; digital twin.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Новоселов С. П., Сичова О. В. Метод децентралізованого управління технологічними процесами на інтелектуальному виробництві. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 166–179. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>

Nevlyudov, I., Novoselov, S., Sychova, O. (2025), "Method of decentralized control of technological processes in intelligent manufacturing", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (31), P. 166–179. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>