

І. Б. ТУРКІН, В. А. ЛЕЗНОВСЬКИЙ*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна*

ІоТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Предметом вивчення в статті є цифрова платформа для вібраційної діагностики промислового обладнання. Метою є підвищення інформативності процесів вібраційної діагностики промислового обладнання шляхом розробки та впровадження ІоТ-орієнтованих рішень, заснованих на концепції інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів відповідно до стандарту IEEE 1451.0-2007. Завдання: обґрунтувати доцільність використання платформоорієнтованих технологій для вібраційної діагностики промислового обладнання та обрати хмарний сервіс для реалізації платформи, розробити програмно-апаратні рішення ІоТ-платформи для вібраційної діагностики промислового обладнання; відкалібрувати систему вібраційної діагностики та перевірити точність вимірювання. Використовуваними методами є: мікросервісний підхід, багаторівнева архітектура, методи оцінки стану обладнання за вібраційними показниками. Отримано такі результати. В якості хмарної обчислювальної платформи для системи вібраційної діагностики промислового обладнання обрана платформа Microsoft Azure IoT, що забезпечує інфраструктуру для створення і управління програмами в хмарі. Azure Internet of Things Suite є однією з служб Microsoft Azure IoT та призначена для інтеграції та організації потоків даних, аналізу та представлення даних у форматі, який допомагає людям приймати обґрунтовані рішення. Архітектура розробленої і представленої в статті ІоТ-системи вібраційної діагностики промислового обладнання є трьохрівневою. Рівень автономних сенсорів забезпечує зчитування показників вібраційного прискорення і через канал цифрової бездротової передачі даних BLE передає дані на рівень Hub, який реалізовано на базі одноплатного мікрокомп'ютера BeagleBone. Обчислювальна потужність BeagleBone забезпечує роботу з алгоритмами штучного інтелекту. На третьому рівні платформи-сервера вирішуються завдання діагностування і прогнозування стану обладнання, для чого застосовано алгоритм Dictionary Learning, реалізований на мові програмування Python. Висновки. Випробування ІоТ-системи для вібраційної діагностики промислового обладнання було виконано з використанням спеціального стенду, який дає можливість калібрування сенсорів і перевірки точності вимірювальної системи. Коректність роботи всієї системи підтверджена збігом очікуваних і вимірних результатів. Напрямок розвитку ІоТ-системи для вібраційної діагностики промислового обладнання є розробка додаткових мікросервісів, які додадуть можливість застосування сучасних технологій штучного інтелекту для комплексного діагностування і прогнозування стану обладнання.

Ключові слова: *Інтернет речей; цифрова платформа; вібраційна діагностика; калібрування; акселерометр; промислове обладнання.*

Вступ

На відміну від невідновлюваних природних ресурсів, таких як вугіль, або нафта, інформація та дані мають штучне походження. Вони виробляються, вільно обмінюються та використовуються людьми та технічними пристроями, що розроблено інженерами відповідно до певних цілей. Дані та інформація не тільки не зношуються при використанні, але навіть можуть поступово набувати нове значення. Вони можуть бути монополізованими, але їх важко зберігати в таємниці, зокрема тому, що їх виробництво стає менш затратним, а їх використання створює синергетичний ефект, коли ціле коштує більше, ніж сума складових [1]. В зазначеному аспекті неможливо переоцінити можливості Інтернету

речей (ІоТ), який поєднує дані, інформацію, розум, уяву та формує і основу, і зміст цифрової революції.

Термін ІоТ був запропонований Кевіном Ештоном Массачусетського технологічного інституту, в 1999 році [2]. Офіційно датою народження ІоТ вважають період між 2008-2009 роком, коли кількість пристроїв, що підключено до Internet, перевершила кількість людей на планеті [3].

Різноманітні компанії та просто розробники в наступні роки створили величезну кількість екосистем ІоТ відкритого і закритого типу. Розвиток та здешевлення обчислювальної техніки, поширення промислових рішень ІоТ-платформ, зменшення масо-габаритних характеристик і зниження енергоспоживання не тільки мікроконтролерів, а й різноманітних датчиків, засобів аудіо-, відеоспостережен-

ня тощо є об'єктивною передумовою швидкого впровадження IoT. IoT вирішує цілий ряд потреб у всіх галузях, насамперед, для оптимізації продуктивності та захисту навколишнього середовища.

Пандемія COVID-19 беззаперечно змінила світ в 2020 році. Хоча пандемія сповільнила бізнес по всьому світу, IoT залишається галуззю зі зростаючою траєкторією розвитку після входження світу в епоху карантинних обмежень. Опитування [4], зроблене в 2020 році, показало, що 90 % осіб, які приймають рішення щодо IoT, вважають, що IoT має вирішальне значення для подальшого успіху їхньої компанії, а 64 % планують запровадити ще більше IoT-рішень у майбутньому. Кожен третій з тих, хто приймає рішення, заявляє, що їх організації збільшать свої інвестиції в IoT, незважаючи на наслідки COVID-19, тоді як ще 41 % кажуть, що вони будуть підтримувати однаковий рівень. Підтвердженням цього твердження є публікація [38], де мова йде про те, що COVID-19 – став шоком для всієї мірової економіки, але в охороні здоров'я, побудові розумних будинків, будівель та міст, в транспорті та промислового застосуванні IoT став каталізатором для інновацій та технологічних здобутків. Найбільш суттєвим є висновок статті [38], що для забезпечення готовності галузей до майбутніх пандемій необхідні дослідження та розробки у різних важливих напрямках, насамперед таких як цифрове обслуговування обладнання, наскрізна автоматизація тощо.

Для різноманітних механічних систем кількісне вимірювання та подальший аналіз характеристик руху, що відбувається за різних траєкторій, амплітуд та частот, має вирішальне значення для розуміння взаємодії складових систем, а також для поліпшення їх продуктивності та надійності. Ці завдання є центральними в багатьох галузях застосування, таких як виробництво, транспорт, генерація енергії, тому вібраційна діагностика є принципово важливим методом оцінки стану механічних систем.

Реалізація концепції технічного обслуговування на основі стану (Condition-based maintenance - CBM), що відстежує фактичний стан обладнання для прийняття рішення про необхідність обслуговування має багато переваг. CBM надає можливість підвищити надійність обладнання та скоротити витрати ресурсів на обслуговування в порівнянні зі стратегією заздалегідь запланованого обслуговування. Відповідно до CBM технічне обслуговування має проводитися лише тоді, коли певні показники показують ознаки зниження продуктивності або майбутніх відмов. Головним недоліком CBM є необхідність витрачати значні ресурси на реалізацію засобів моніторингу стану обладнання, які зазвичай включають такі неінвазивні вимірювання, як візуа-

льний огляд, вимірювання енергоспоживання, шуму, вібрації тощо.

Подолання значної ресурсовитратності концепції CBM можливо шляхом застосування цифрового обслуговування промислового обладнання та наскрізної автоматизації на основі IoT-технологій. Саме таке рішення пропонує ця стаття, метою якої є розробка нових ресурсоекономічних IoT-орієнтованих рішень та технологій для вібраційної діагностики промислового обладнання.

Вібраційна діагностика промислового обладнання: завдання та проблеми

Запропоноване в статті рішення базується на контактному методі вимірювання вібрації за допомогою мікроелектромеханічної системи (МЕМС) акселерометрів.

Методи аналізу стану обладнання та виявлення пошкоджень за допомогою вібраційної діагностики Рітгер класифікував на основі рівня ідентифікації [5]:

- визначення наявності пошкодження у структурі;
- визначення геометричного розташування пошкодження;
- кількісна оцінка тяжкості пошкодження;
- прогнозування терміну служби, що залишився.

У літературі основна увага приділяється першим трьом рівням. Відомі публікації, такі як [39, 40] надають конструктивні рішення та розглядають експериментальні питання підтвердження точності вимірювань, але не містять опису методів для передбачення терміну служби діагностованого обладнання, що безсумнівно є кінцевою метою для CBM-концепції [6].

Методи виявлення пошкоджень також різняться за кількістю необхідних для роботи датчиків. Резонансні частоти можуть бути виміряні з використанням тільки одного датчика, тоді як визначення форми або динамічної гнучкості вимагають декількох датчиків. Таким чином, виникають питання економічної ефективності, особливо якщо намір полягає в тому, щоб контролювати мережу обладнання.

Виробник акселерометра після найрізноманітніших випробувань визначає вихідні характеристики, які зазвичай включають чутливість, частотну і фазову характеристику, резонансну частоту, лінійність по амплітуді, поперечну чутливість, температурну характеристику, постійну часу, ємність та залежність від умов експлуатації, таких як чутливості до змін температури, магнітного поля тощо. За-

звичай акселерометр вимагає додаткової калібрації після монтажу на конкретному місці. Ця калібрація здійснюється шляхом порівняння результатів вимірювання з еталонним акселерометром, що має гарантовано низьку чутливість до шуму в умовах калібрування. Обидва датчики піддаються загальному механічному збудженню, тому їх вихідні сигнали можуть бути безпосередньо порівняні [7, 8]

Сучасні стандарти серії ISO 16063 [9] в чотирьох розділах визначають вимоги до вібраційних датчиків та методів їх калібрування:

1) первинне калібрування:

- 16063-11 – Вібраційна інтерферометрія;
- 16063-12 – Взаємність вібрації;
- 16063-13 – Ударна інтерферометрія;
- 16063-15 – Кутова вібраційна інтерферометрія;
- 16063-16 – Статична сила тяжіння;
- 16063-17 WD – Статична центрифуга;

2) вторинне калібрування:

- 16063-21 – Вібраційне порівняння;
- 16063-22 – Шокове порівняння;
- 16063-23 – Порівняння кутових вібрацій;

3) калібрування у важких умовах:

- 16063-31 – Поперечна чутливість;
- 16063-32 DIS – Резонансне тестування;
- 16063-33 – Випробування чутливості до магнітного поля;

4) інші методи калібрування:

- 16063-41 – Калібрування лазерних віброметрів;
- 16063-42 DIS – Калібрування сейсмометрів з високою точністю під дією сили тяжіння;
- 16063-44 WD – Калібрування польових вібраційних калібраторів;
- 16063-45 PWI – Калібрування перетворювачів із вбудованою калібрувальною котушкою.

Відомі публікації [40, 41] досить детально розглядають побудову програмно-апаратних рішень засобів вібродіагностики з низької вартістю, яка досягається використання сучасних MEMS, при цьому поза увагою авторів залишаються питання використання IoT-рішень для вертикальної інтеграції засобів вимірювання з цифровими платформами. Саме платформоорієнтовані рішення з використанням технологій Big Data, обробки складних подій (Complex Event Processing), онлайн-аналітики надають нові можливості для діагностування несправностей, прогнозування стану та реалізації СВМ-концепції.

Аналіз можливостей IoT-платформ для вібраційної діагностики промислового обладнання

На сьогоднішній день відсутні публікації, які розглядають можливості IoT-систем та концепції

Industrie 4.0 для вібраційної діагностики промислового обладнання.

В концепції Індустрія 4.0 цифровізація приходить на зміну інформатизації (при цьому інформатизація – це складова цифровізації). Під цифровізацією розуміють системний підхід до використання цифрових технологій для підвищення продуктивності праці, конкурентоспроможності виробництва продукції та прискорення соціально-економічного розвитку [11]. Тобто обов'язково має бути створена цифрова система, яка може діяти незалежно, має аналітичні і прогностичні функції, сама вирішує завдання.

Термін Industrie 4.0 вперше було проголошено офіційно у 2011 році на Ганноверському ярмарку у Німеччині і означив процес корінного перетворення глобальних ланцюгів створення вартості. Приклади прояву Четвертої промислової революції вже спостерігаються і в Україні. Основним драйвером Industry 4.0 є нові фізичні кібер-системи, котрі дають змогу пов'язати реальні об'єкти з віртуальними за допомогою інформаційних мереж. Впровадження Індустрії 4.0 у роботу підприємств дає змогу отримати конкретні економічні ефекти [10].

Кабінет міністрів України в 2018 році схвалив концепцію переходу до цифрової економіки [12], яка включає до себе складний комплекс системних перетворень, які є безпрецедентними за масштабами, значенням та впливом на життя країни і окремої людини.

Цифрова платформа - це нова, характерна лише для «цифрової економіки» бізнес-модель, сутність якої полягає в наданні різним учасникам бізнесу і населенню специфічної послуги з координації діяльності різних учасників ринку. Платформа надає учасникам ринку ряд зручностей, автоматично формує рейтинги довіри між ними, а головне - дозволяє продавцям і покупцям товару або послуги швидко знайти один одного, швидко укласти угоду і провести розрахунки. Функціонування платформ прискорює і здешевлює процеси виробництва і обміну товарами і послугами, усуває з них зайві посередницькі ланки, різко підвищує ефективність ринків і продуктивність праці [13].

Цифрові платформи є складним об'єктом для дослідження через їх розповсюджений характер та взаємозв'язок з установами, ринками та технологіями [14]. Нові виклики в галузі досліджень виникають внаслідок експоненціального зростання масштабів інноваційних платформ, зростаючої складності архітектурних платформ та поширення цифрових платформ у багатьох галузях. На початку еволюції цифрових платформ такі платформи, як Google, Facebook, Amazon та eBay, створювались в закритих прикладних галузях, але в подальшому сфера їх за-

стосування швидко поширилася, включаючи банківську справу [15], охорону здоров'я [16], транспорт тощо.

На сьогодні швидкість впровадження технологічних інновацій на тлі розвитку нових технологій (великі дані, хмарні технології, штучний інтелект, розподілений реєстр, інтернет речей та інші) дозволяє перебудовувати бізнес- та управлінські моделі, видаляти посередників між виробниками товарів/послуг та їх споживачами, здійснювати прямі транзакції між ними в рамках так званої уберізації економіки (від «Uber» - назва компанії США, що створила однойменний мобільний застосунок для пошуку, виклику та оплати таксі або приватних водіїв в 2009 році) [17]. З роками, декілька інших компаній успадкували подібну модель бізнесу, яка в подальшому отримала назву «уберифікація» (Uberification) або «уберизація» (Uberisation) [18].

Зміна технологій та бізнес-моделей в традиційних галузях в рамках четвертої промислової революції здійснюється щорічно, що вимагає підвищення швидкості прийняття управлінських рішень [19]. Автори роботи [20] відзначають, що в даний час для виготовлення інноваційного продукту (надання послуги), що відповідає вимогам користувачів, необхідно, як правило, об'єднання ресурсів і компетенцій декількох компаній. На відміну від звичайної, аналогової економіки, яка представлена господарською діяльністю товариства і сукупністю відносин у системі виробництва, розподілу, обміну та споживання, цифрова економіка включає в себе область електронних товарів і послуг із використанням цифрових технологій. Одна з основних характеристик цифрової економіки – висока роль інформації та знань при виробництві матеріальних продуктів і послуг, а також активне використання цифрових прийомів зберігання, обробки та передачі даних [21].

Високотехнологічна бізнес-модель цифрової платформи створює вартість, полегшуючи обмін між двома або більшою кількістю взаємозалежних груп учасників. За своїм технічним змістом платформа – це система «алгоритмізованих взаємовигідних відносин значної кількості незалежних учасників галузі економіки (або сфери діяльності), які здійснюються в єдиному інформаційному середовищі, що призводить до зниження транзакційних витрат за рахунок застосування пакету цифрових технологій роботи з даними і зміни системи поділу праці» [22]. Цифрова платформа містить різні модулі, що розширюють функціональність основного програмного продукту. Ці модулі можна розглядати як «додаткові підсистеми програмного забезпечення», які часто розробляються та впроваджуються сторонніми організаціями.

Цифрові технології передбачають гомогенізацію (однорідність) даних, їх розповсюдженість, редагованість та здатність до самореференування, можливість їх перепрограмувати. Такі характеристики цифровізації дозволяють реалізувати багатократне успадкування в розподілених програмних застосунках, коли відсутній єдиний власник, який би володів ядром платформи і диктував всю ієрархію дизайну. Поєднуючи модульність фізичних товарів із шаруватою архітектурою програмного забезпечення, отримані рішення можуть довільно поєднуватися через стандартизовані інтерфейси, що веде до того, що продукти стають відкритими для нових призначень після їх виробництва. Останнє дозволяє відкласти на майбутнє остаточне рішення щодо особливостей продукту, яке в результаті розподіленого інноваційного процесу стає позбавленим від завчасного обмеження можливостей сторонніх розробників.

Необхідною складовою платформоорієнтованої системи вібраційної діагностики промислового обладнання є інтелектуальні датчики. Відповідно до стандарту IEEE 1451.0-2007 [34] інтелектуальними слід вважати датчики, що забезпечують функції, які перевищують мінімально достатні для здійснення вимірювань. Додатково до цифрового інтерфейсу та самотестування ця надлишкова функціональність датчика спрощує його інтеграцію в додатки в мережевому середовищі та зазвичай включає можливості:

- самоідентифікації та самопису;
- представлення не тільки кількісного результату вимірювання, але й метрик, одиниць виміру, передісторії, сповіщень про спрацювання тощо;
- доступу до мережі та простоту у використанні (plug-and-play).

Бізнес-модель використання цифрової платформи повинна вирішувати багато протиріч. Цифрова платформа має одночасно залишатися стабільною, щоб створити міцний фундамент для подальшого розширення можливостей, і все ж бути достатньо гнучкою, щоб підтримувати її практично необмежений зріст. Як централізоване, так і розподілене управління цифровою платформою мають право на існування та є життєздатними, що наочно демонструють екосистеми операційних систем IOS від Apple та Android від Google [23], з їх розвиненими магазинами додатків.

На жаль, сьогоднішні наукові публікації сконцентровані на напрямках, які є неприйнятними для практичного застосування, оскільки не відповідають діючим стандартам. Прикладами таких публікацій є дослідження нових методів для IoT-мереж, таких як стиску даних [35], кібербезпеки [36], або аналізу вразливостей [35].

Вибір IoT-платформи для вібраційної діагностики промислового обладнання

Кількість пристроїв технології IoT значно зросла за останні роки [24]. Серед IoT-застосувань промислове використання IoT як в виробництві, так і в сільському господарстві займає почесне місце [25]. Як вважає світовий постачальник програмних рішень, консалтингових та допоміжних послуг CyberVision, Inc., до першого десятка IoT-платформних лідерів відносяться наступні [26].

Google Cloud IoT [27] – платформа, що швидко прогресує, та на сьогодні надає повний набір інструментів для підключення, обробки, зберігання та аналізу даних як на краю, так і в хмарі. Вона використовує переваги популярних хмарних сервісів GCP, таких як Cloud Dataflow та BigQuery, а також забезпечує інтегрований стек програмного забезпечення для крайових/локальних обчислень із можливостями машинного навчання для всіх потреб. Але Google Cloud IoT є досить складною і не має можливостей налаштування, що може бути проблемою для швидких темпів IoT-проектів та стартапів.

Amazon [28] залишається перевіреним постачальником хмарних технологій для багатьох компаній, тому цілком природно для цих компаній розглядати рішення AWS IoT як логічний наступний крок у своїй цифровій трансформації. Перевагою Amazon AWS IoT є добре структурована колекція послуг IoT, що включає аналітичні послуги. До недоліків відноситься: необхідність використовувати платну підтримку пакетів, якщо потрібна більш інтенсивна допомога, та урахувати обмеження для ресурсів, які залежать від регіону.

Стек технологій платформи PTC ThingWorx [29] перетворює IoT дані на інформацію, яка потім зберігається внутрішньо за допомогою Thing Model [30]. Вбудовані інструменти аналітики дозволяють швидко розблокувати ефективні статистичні дані з інформації для відображення на інформаційних панелях або реагування на них у реальному часі за допомогою вбудованої аналітики машинного навчання. ThingWorx орієнтована на створення наскрізних інтелектуальних додатків для сільського господарства, міст, енергетики, водопостачання, будівництва та телематики. Користувачі можуть створити комплексні мобільні інтерфейси без кодування, скористатися перевагами ThingWorx Composer для моделювання додатків, а також інформаційними панелями в режимі реального часу.

Рішення Інтернету речей SAP Internet of Things [31] полегшують зв'язок, щоб користувачі могли взаємодіяти зі своїми пристроями по-новому. Трансформація операцій у виїзному сервісному об-

слуговуванні та віддаленому управлінні активами, забезпечення видимості ланцюжка поставок та прогнозування та усунення вузьких місць логістики – лише деякі із проблем, вирішених дистанційним обслуговуванням та сервісом SAP.

Microsoft Azure IoT [32] – хмарна обчислювальна платформа Microsoft, яка забезпечує інфраструктуру для створення та управління програмами в хмарі. Azure Internet of Things Suite – це інтегрована служба, яка використовує всі відповідні можливості Azure для підключення пристроїв. Набір фіксує різноманітні дані, які генерують ці пристрої. Azure Internet of Things Suite інтегрує та організовує потік цих даних, управляє ними, аналізує та подає у форматі, який допомагає людям приймати відповідні рішення. Ці високо аналізовані та керовані дані також допомагають в автоматизації різних процесів та операцій.

Таким чином, для подальшої реалізації виберемо Microsoft Azure IoT, оскільки ця платформа пропонує усталені рішення, а її кошторисні вимоги є прийнятними для стартапів на початковому етапі.

Програмно-апаратні рішення IoT-платформи для вібраційної діагностики промислового обладнання

Архітектуру IoT-платформи системи вібраційної діагностики представлено на рис. 1. Апаратне забезпечення системи побудоване на мікроконтролері STM32L476 і трьохосьовому цифровому акселерометрі IIS3DWB. Акселерометр IIS3DWB встановлюється на об'єкті моніторингу (наприклад на фрезерній головці фрезерувального верстата з ЧПК) і підключається по шині SPI до мікроконтролера.

IIS3DWB – це мініатюрний трьохосьовий цифровий акселерометр фірми STMicroelectronics з малим енергоспоживанням, високою роздільною здатністю (16 біт) і діапазоном вимірювання, який можна програмно обрати з ряду: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$. Результат вимірювань можна прочитати побайтно через цифровий інтерфейс SPI (3-х або 4-х провідний) або I2C у вигляді 16-бітних даних.

IIS3DWB відносять до класу ємнісних акселерометрів зі смугою пропускання від 0,05 до 6000 Гц, що дозволяє реєструвати вібрацію з частотою 1000 Гц). На цю характеристику впливає частота дискретизації вбудованого АЦП акселерометра, яка повинна бути як мінімум у два рази більше смуги пропускання. Максимальна частота дискретизації для IIS3DWB складає 25600 Гц.

Акселерометри є механічними структурами з елементами, що вільно рухаються. Ці рухомі елементи можуть бути дуже чутливими до механічних впливів (ударів, трясок), набагато чутливіми ніж

сама електроніка. Зміщення при 0 g є важливою метрикою акселерометра, оскільки вона визначає поріг для вимірювання реального прискорення. Додаткові похибки вимірювання виникають при монтуванні системи з акселерометром. Ці похибки можуть бути викликані напруженнями в друкованій платі при монтуванні, застосуванням різних компаундів до компонента. Тому, калібрування рекомендовано проводити після збірки системи, щоб компенсувати їх вплив. Найпростіший спосіб калібрування акселерометра полягає в усередненні значень вимірів (вибірок), використовуючи так звану схему з єдиною точкою калібрування. В схемі з єдиною точкою калібрування систему з акселерометром орієнтують, так щоб одна вісь, як правило вісь Z, знаходиться в гравітаційному полі 1 g, а інші осі X і Y в полі 0 g. Рекомендється провести щонайменше 10 вибірок з інтервалом в 0,1 с при частоті вимірювання 100 Гц.

Ці значення надалі зберігаються в OFFSET-регістрах акселерометра IIS3DWB та використовуються для автоматичної компенсації похибки. Вміст кожного регістра додається до вимірюваного значення прискорення по відповідній осі, а результати розміщуються в регістрах даних DATA.

База даних цифрової платформи. Цифрова платформа для вібраційної діагностики промислового обладнання повинна зберігати дані протягом тривалого часу. Для досягнення цієї мети була обрана СКБД PostgreSQL. PostgreSQL є потужною СКБД з відкритим кодом. PostgreSQL розвивається, починаючи з 1996 року, та має перевірену архітектуру, яка заслужила високу репутацію за надійність, цілісність даних і коректність. PostgreSQL має складні функції, такі як Multi-Version управління паралелізму (MVCC), асинхронну реплікацію, вкладені транзакції (точки збереження).

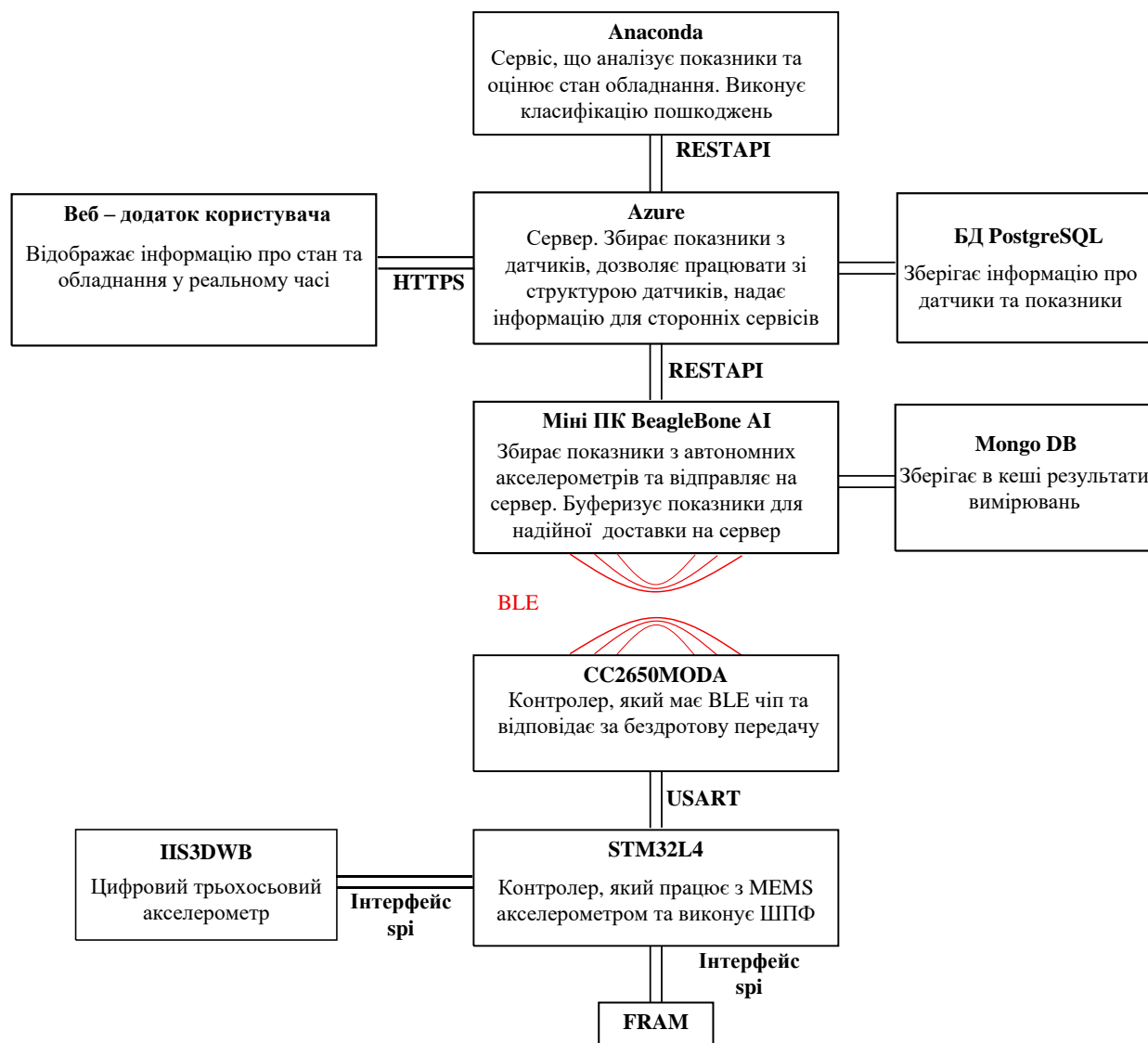


Рис. 1. Архітектура IoT-системи вібраційної діагностики

Для кешування показників на Міні ПК BeagleBone AI була обрана NoSQL база даних MongoDB.

ER-модель бази даних цифрової платформи (рис. 2) характеризує взаємозв'язки між наступними сутностями: сенсори, IoT-пристрої, до яких вони входять, дані про результати вимірювань цими сенсорами.

Сутності в БД, що є основою для бізнес-логіки, містять наступні дані відповідно до стандарту IEEE 1451.0-2007:

– AverageValue – середні значення результатів вимірювання датчиками, такі, як середня швидкість обертання;

– Sensor – дані о сенсорах: ідентифікатор сенсору, назва;

– SensorValue – дані про поточні та історичні результати вимірювань: відмітка часу (Timestamp) та результат (Value);

– Thing – дані про обладнання, на якому встановлено датчики: назва та розташування.

Визначення зв'язків між сутностями представлені наступним чином:

– сутність «Sensor» пов'язана з сутністю «AverageValue» відношенням «1: N» - кожен сенсор має багато числових показників;

– сутність «Sensor» пов'язана з сутністю «SensorValue» відношенням «1: N» - кожен сенсор має багато результатів вимірювань;

– сутність «Thing» пов'язана з сутністю «Sensor» відношенням «1: N» - кожне промислове обладнання може мати багато сенсорів.

Особливості організації взаємодії клієнтів та цифрової платформи. Основною особливістю організації взаємодії клієнтів і цифрової платформи є багаторівнева передача та обробка даних. Це зумовлено тим, що для проведення ефективного вібраційного моніторингу у реальному часі потрібна автономна мережа датчиків. Це накладає певні обмеження на методи збору, аналізу та бездротової передачі даних, щоб зменшити ціну установки та експлуатації, забезпечити високу енергоефективність для довгої автономної роботи.

Виходячи з вищевказаних обмежень була обрана архітектура з 3 рівнями:

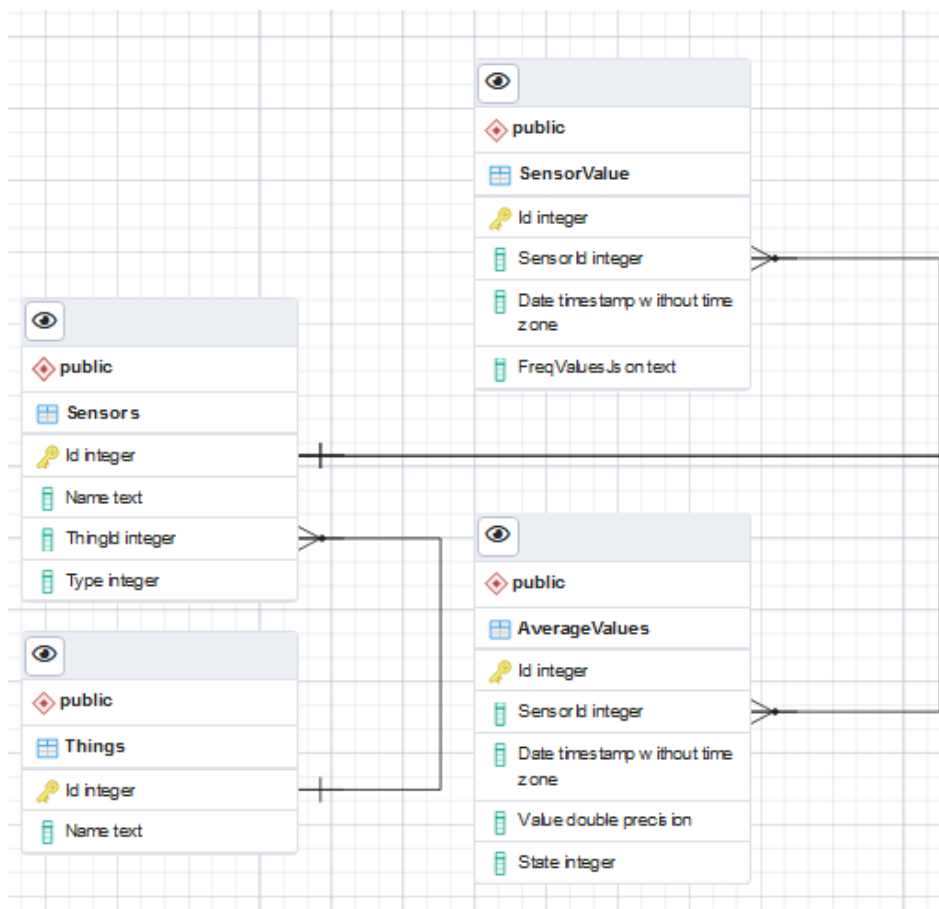


Рис. 2. ER-модель бази даних цифрової платформи

Рівень автономних сенсорів, що зчитують показники вібраційного прискорення. Ці сенсори розраховані на автономну роботу продовж 6-12 місяців в залежності від частоти опиту. Для передачі показників на рівень Hub використовується технологія цифрової бездротової передачі даних BLE (Bluetooth low energy – Bluetooth з низьким енергоспоживанням);

Рівень Hub реалізовано на пристрої, що побудований на базі одноплатного мікрокомп'ютера BeagleBone® AI [33], який призначено для роботи з алгоритмами штучного інтелекту. Має вихід до мережі Інтернет та модуль BLE. Отримує показники з рівня автономних сенсорів та передає їх на рівень серверу. В залежності від обраного алгоритму аналізу має можливість попередньо обробляти показники перед відправленням що значно зменшує навантаження на сервер.

Рівень сервера надає API для роботи зі структурою сенсорів та даними клієнту та стороннім сервісам.

Ключові алгоритми взаємодії клієнтів та цифрової платформи. Для покращення автономності на рівні автономних сенсорів використовується алгоритм дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), який визначає частотний склад дискретних сигналів. Створене ПЗ для обчислення ДПФ використовує програмну бібліотеку FFTW. Спектральні дані отримані з ДПФ сигналів віброприскорення для кожної осі записуються.

Цифрова платформа надає клієнтам оцінку стану обладнання у вигляді класифікації: «нормальна робота» або «є проблема». При розробці алгоритму оцінки в першу чергу потрібно досягти мінімальну потрібність алгоритму у навчанні, коли оцінка стану обладнання вимагає найменшого об'єму розмічених даних. Для цього алгоритм потрібен мати змогу ідентифікувати патерни та донавчатись на вхідних нерозмічених даних. Подібні техніки називають System Identification. Наведеним вище вимогам задовольняє алгоритм на базі Dictionary Learning, який і був прийнятий за основу.

Для реалізації алгоритму була використана мова програмування Python через те, що вона має значну бібліотеку засобів для аналізу сигналів, роботи з нейронними мережами та багату функціональність. Оскільки при побудованні системи обрана мікросервісна архітектура, то алгоритм оцінки стану обладнання також представлено у вигляді окремого сервісу. Це дозволяє легко та зручно масштабуватись, додаючи нові екземпляри сервісу.

Випробування IoT-системи для вібраційної діагностики промислового обладнання

Реалізація апаратної частини системи вібраційної діагностики. Для оцінки придатності роботи системи було виготовлено стенд (рис. 3), що імітує з'єднані муфтою електричний двигун та генератор, для чого використано 3D принтер Anycubic Mega S.



Рис. 3. Стенд, вид спереду

Стенд імітує умови роботи насосного агрегату на підприємстві. Однією з переваг обраного складу стенду є можливість регулювати і отримувати показники обертів не тільки на вбудованому контролері, але й в системі, що дозволяє співставити швидкість обертання і отриманих результатів вимірювання датчиком вібрацій.

В корпусі стенду розміщено блок живлення та електроні плати, що керують двигунами, розташованими зверху: один з двигунів імітує електродвигун, а другий - генератор. На корпус другого двигуна закріплено вібраційний сенсор. Керуючий пульт з графічним інтерфейсом дозволяє керувати швидкістю обертання двигуна. До стенду входять два крокових двигуна (один з них є навантаженням), контролер крокових двигунів, адаптер змінного струму, тестова плата STM32F4 Discovery, DC-DC перетворювач. Керуючий пульт, що побудовано на базі контролера STM32F437, має графічний сенсорний екран для відображення інформації та прийняття команд. Контроль вібрації в подібних агрегатах проводиться на вузлах навантаження та двигуна. Схематичне представлення місць кріплення датчиків наведено на рис. 4.

Алгоритм роботи системи вимірювань включає такі кроки.

1. Ініціалізація акселерометра IIS3DWB на шині SPI.
2. Зчитування значення з регістра WHO_AM_I і перевірка номера акселерометра.
3. Налаштування акселерометра IIS3DWB.
4. Встановлення значень дискретизації та режиму переривань.

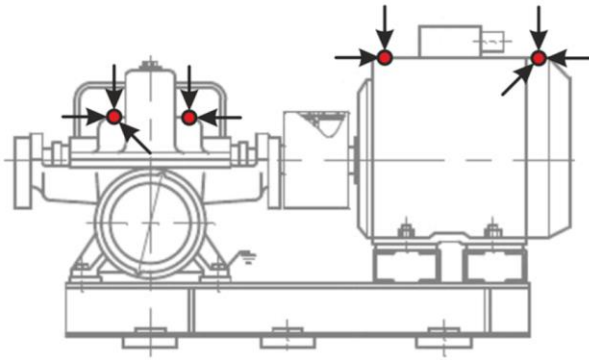


Рис. 4. Точки розміщення датчиків для контролю вібрацій

5. Встановлення діапазону вимірювання та розподіленої здатності .
6. Старт вимірювання.
7. Запис значень у буфер по перериванню та очікування заповнення буферу.
8. Після заповнення буферу використання ДПФ для переведення ряду у частотне представлення.
9. Передача за допомогою BLE.
10. Після передачі повторення кроків, починаючи з п. 6.

Відповідно до алгоритму найбільш енерговитратними будуть кроки 6 та 9. Тестування потрібно проводити у два етапи: тестування енергоспоживання у всіх можливих режимах за допомогою вимірювального обладнання та довгострокове тестування у польових умовах.

Калібрування датчика. До початку тестування необхідно перевірити точність калібрування датчика. Для цього можливо використовувати відладку за допомогою інтерфейсу JTAG. У датчика є три осі, тому калібрування проводиться за умови установки однієї осі перпендикулярно площині робочого столу.

Якщо вісь Z є перпендикулярною площині робочого столу (рис. 5), то результати вимірювання в стані спокою за віссю Z дорівнюватимуть 1 g, а за осями X та Y – 0 g.

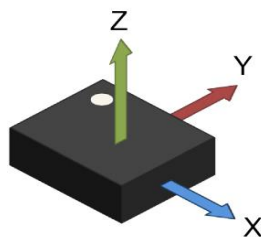


Рис. 5. Схема розташування осей вимірювання

Результат вимірювання при калібруванні сенсора представлено на рисунку 6.

Name	Value
x^y "id"	
x^y "x"	0.021
x^y "y"	0.014
x^y "z"	1.015
+ Add new expression	

Рис 6. Результат вимірювання при калібруванні

Виходячи з цих результатів калібрування проведено успішно. По осі Z діє сила земного тяжіння, по осі Y та X значення прискорення близько нуля.

Тестування автономності сенсорів проводиться для оцінювання термінів можливого використання апаратної частини без обслуговування, при цьому результати, що отримано за допомогою відладчика і засобів візуалізації середовища розробки, порівнюються з даними, що візуалізує цифрова платформа.

Для інструментального тестування недостатньо простого обладнання, такого як мультиметр, оскільки пристрій має режим зниженого енергоспоживання між передачею пакетів. Передача пакету триває кілька десятків мілісекунд, під час якого пристрій споживає кілька десятків міліампер. Після передачі пристрій засинає до наступного циклу, споживаючи одиниці мікроампер.

Після калібрування датчиків проведено перевірку загальної точності системи. Перетворення методом ДПФ цифрових осцилограм (рис. 7) в частотну область (рис. 8) надає можливість зробити такий висновок: на частоті біля нуля присутня постійна складова, що дорівнює силі тяжіння, а на частоті 190 Гц – перемінна складова, яка відповідає частоті обертання стенду. Співпадання очікуваних та вимірених результатів підтверджує коректність роботи системи вимірювань.

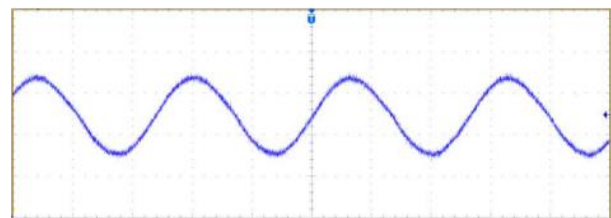


Рис 7. Приклад цифрової осцилограми результатів вимірювань вертикального прискорення при швидкості 190 обертів в секунду

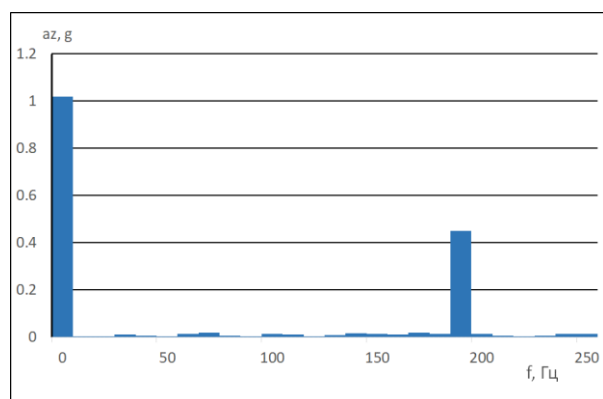


Рис 8. Амплітудно-частотна характеристика вертикального прискорення

Порівняння з аналогами

Розглянуто 3 аналогічні системи, кожна з яких дозволяє підключення декількох акселерометрів.

1. Система IoT-зв'язаних пристроїв для вимірювання та аналізу вібрації [39].

2. Низьковартісна система вібровимірювань для промислового застосування, яка на відміну від всіх інших єдина використовує дротовий засіб передачі даних та мережеве живлення [40].

3. Низьковартісна система вимірювання вібрації для визначення стану будівельних споруд [41].

Техніко-економічні показники розробленої системи в порівнянні з аналогами мають наступні переваги.

Застосування спеціалізованого акселерометра IIS3DWB компанії STM, призначеного саме для вібраційної діагностики, дозволило збільшити частотний діапазон вимірювань з 1000 Гц до 6000 Гц.

Використання енергетично економного протоколу зв'язку BLE 5.1 та мікроконтролера STM32L476 з відповідними алгоритмами енергозбереження дозволило збільшити час роботи без заміни батареї до 1 року, у той час, як система-аналог [39] – вимагає заміни вже через 8 годин. Як наслідок, за збереження приблизно такої ж вартості обладнання та його монтажу, що й у безпроводних аналогів, забезпечується суттєве зниження вартості експлуатації.

Висновки

В статті запропоновано IoT-орієнтована технологія вібраційної діагностики промислового обладнання. У якості хмарної обчислювальної платформи для системи вібраційної діагностики промислового обладнання обрана платформа Microsoft Azure IoT, яка забезпечує інфраструктуру для створення та управління програмами в хмарі. Microsoft Azure IoT

містить службу Azure Internet of Things Suite, яка інтегрує та організовує потік даних, управляє ними, аналізує та подає у форматі, який допомагає людям приймати відповідні рішення.

Архітектура платформиорієнтованої IoT-системи вібраційної діагностики промислового обладнання є трьохрівневою. Дані з рівня автономних сенсорів, що зчитують показники вібраційного прискорення, через канал цифрової бездротової передачі даних BLE поступають на рівень Hub, що реалізовано на базі одноплатного мікрокомп'ютера BeagleBone, обчислювальної потужності якого достатньо для роботи з алгоритмами штучного інтелекту. На рівні платформи-сервера вирішуються завдання діагностування та прогнозування стану обладнання, для чого застосовано алгоритм Dictionary Learning, реалізований мовою програмування Python. Реалізована концепція мікросервісної архітектури дозволяє легко та зручно масштабуватись, додаючи нові екземпляри сервісу.

Випробування IoT-системи для вібраційної діагностики промислового обладнання виконано з використанням спеціального стенда, що надає можливість калібрування сенсорів та перевірки точності вимірювальної системи. Коректність роботи всієї системи підтверджена співпаданням очікуваних та вимічених результатів.

Подальшим напрямом розвитку IoT-системи для вібраційної діагностики промислового обладнання є розробка додаткових мікросервісів, що нададуть можливість застосування методів аналізу часових рядів та сучасних технологій штучного інтелекту для комплексного діагностування та прогнозування стану обладнання.

References (GOST 7.1:2006)

1. Daidj, Nabya. *From Cooperation to Coopetition [Text] / Nabya Daidj. – ISTE and Wiley, 2017. – P. 113-126. DOI: 10.1002/9781119476511.ch6.*
2. Ashton, Kevin. *That 'Internet of Things' Thing [Електронний ресурс] / Ashton Kevin // RFID Journal. – 2009. – Режим доступу: <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>. – 10.04.2021.*
3. Evans, Dave. *The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything [Електронний ресурс] / Dave Evans // Cisco, 2011. – Режим доступу: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf. – 10.05.2021.*
4. *IoT Signals Research, edition 2: global insights for 2020 and beyond [Електронний ресурс] // Microsoft – Режим доступу: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/iot-signals-research-edition-2-global-insights-for-2020-and-beyond/>. – 10.05.2021.*
5. Rytter, Anders. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures [Text]: Ph.D.-Thesis de-*

fended publicly at the University of Aalborg, April 20, 1993 / Rytter Anders. – University of Aalborg – 1993.

6. Park, G. Self-monitoring and self-healing jointed structures [Text] / G. Park, D. E. Muntges, D. J. Inman // *Damage Assessment of Structures, Proceedings of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures. – Key Engineering Materials, 2001 – Vols. 204-205. – P. 75-84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.204-205.75*

7. Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard [Text] / Franck Larssonier, Guillaume Rouillé, Claire Bartoli, Leonard Klaus and Philipp Begoff // 19th International Congress of Metrology – 2019. – Article No. 27003. DOI: 10.1051/metrology/201927003.

8. Bilgic, Eyup. Determination of Pulse Width and Pulse Amplitude Characteristics of Materials Used in Pendulum Type Shock Calibration Device [Text] / Eyup Bilgic // *Acta Physica Polonica. – 2017. – Vol. 132, No. 3-II. – P. 857-860. DOI: 10.12693/APhysPolA.132.857.*

9. ISO 16063-11:1999, *Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry. – International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1999. – 27 p.*

10. Четверта промислова революція: зміна напрямів міжнародних інвестиційних потоків [Текст] : моногр. / за наук. ред. д.е.н., проф. А. І. Крисоватого та д.е.н., проф. О. М. Сохацької. – Тернопіль : Осада Ю. В., 2018. – 478 с.

11. Федулова, Л. І. Інвестування в цифрову економіку: глобальні тенденції та практика України [Текст] / Л. І. Федулова, Л. М. Ємельяненко // *Економіка та держава. – 2020. – № 4. – С. 6-13.*

12. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018. № 67-р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#Text>. – 15.05.2021.

13. Ілляшенко, С. М. Перспективи і загрози четвертої промислової революції та їх урахування при виборі стратегій інноваційного зростання [Текст] / С. М. Ілляшенко, Н. С. Ілляшенко // *Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2016. – № 1. – С. 11-21.*

14. de Reuver, Mark. The digital platform: a research agenda [Text] / Mark de Reuver, Carsten Sørensen, Rahul C. Basole // *Journal of Information Technology. – 2018. – Vol. 33, Iss. 2. – P. 124-135. DOI: 10.1057/s41265-016-0033-3.*

15. Шелудько, С. А. Вплив цифровізації на банківський бізнес в Україні [Текст] / С. А. Шелудько, П. П. Браткевич // *Класичний приватний університет. – 2019. – № 5(16). – С. 334-339. DOI: 10.32840/2522-4263/2019-5-57.*

16. Индекс здоров'я. Україна – 2019: Результати загальнонаціонального дослідження [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [\[http://health-index.com.ua/HI_Report_2019_Preview.pdf\]\(http://health-index.com.ua/HI_Report_2019_Preview.pdf\). – 12.04.2021.](http://health-</p></div><div data-bbox=)

17. Карпинская В. А. Экосистема как единица экономического анализа [Текст] / В. А. Карпинская // *System Problems of the Domestic Mesoeconomics, Microeconomics, and Economics of Enterprises. – С. 125-141. DOI: 10.33276/978-5-8211-0769-5-125-141.*

18. Goodwin, Tom. The Battle Is for the Customer Interface [Text] / Tom Goodwin // *TechCrunch. – 2015 – Режим доступу: <https://techcrunch.com/2015/03/03/in-the-age-of-disintermediation-the-battle-is-all-for-the-customer-interface>. – 12.04.2021.*

19. Государство как платформа. (Кубер)государство для цифровой экономики. Цифровая трансформация [Электронный ресурс] / М. Петров, В. Буров, М. Шкляржук, А. Шаров. – М. : Центр стратегических разработок, 2018. – Режим доступу: <https://www.csr.ru/upload/iblock/313/3132b2de9cccf0db1eecd56071b98f5f.pdf>. – 12.04.2021.

20. Методология исследования сетевых форм организации бизнеса [Текст] : колл. моногр. / М. А. Бек, Н. Н. Бек, Е. В. Бузулукова и др. ; под науч. ред. М.Ю. Шерешевой ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2014. – 446 с.

21. Чорна, М. В. Цифрові платформи в економіці: сучасні тенденції та напрями розвитку [Текст] / М. В. Чорна, К. Ю. Петленко // *Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг. – 2019. – № 1. – С. 50-60.*

22. Evans, P. C. The Rise of the Platform Enterprise: A Global Survey [Електронний ресурс] / P. C. Evans, A. Gawer // *The Emerging Platform Economy. – 2016. – Series No. 1. – Режим доступу: https://www.thecge.net/app/uploads/2016/01/PDF-WEB-Platform-Survey_01_12.pdf. – 12.04.2021.*

23. Tilson, D. Change and Control Paradoxes in Mobile Infrastructure Innovation: The Android and iOS Mobile Operating Systems Cases [Text] / David Tilson, Carsten Sørensen, Kalle Lyytinen // 2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences. – 2012. – P. 1324-1333. DOI:10.1109/HICSS.2012.149.

24. Nordrum, Amy. Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated [Електронний ресурс] / Amy Nordrum // *IEEE Spectrum. – 2016. – Режим доступу: <https://spectrum.ieee.org/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>. – 12.04.2021.*

25. A Survey on Internet of Things Security Issues and Applications [Text] / Pouyan Ahmadi, Khondkar Islam, Trevor Maco, Manilya Katam // 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). – 2018. – P. 925-934. DOI: 10.1109/CSCI46756.2018.00182.

26. CyberVision, Inc. 10 Best IoT Platforms for 2021 [Електронний ресурс] / CyberVision, Inc. – Режим доступу: <https://www.cybervisiontech.com/blog/10-best-iot-platforms-2021>. – 15.04.2021.

27. Google Cloud IoT solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cloud.google.com/solutions/iot>. – 15.04.2021.
28. AWS IoT Core [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://aws.amazon.com/iot-core/?nc1=h_ls. – 15.04.2021.
29. ThingWorx Industrial IoT Platform [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://developer.thingworx.com/platform>. – 15.04.2021.
30. ThingWorx Thing Model Visual Representation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://support.ptc.com/help/thingworx/platform/r9/en/index.html#page/ThingWorx/Help/Composer/Things/ThingWorxThingModelVisualRepresentation.html>. – 15.04.2021.
31. Solis, Brian. *Insights on the Future of the Internet of Things (IoT)* [Електронний ресурс] / Brian Solis. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.briansolis.com/2017/08/insights-future-internet-things-iot/>. – 15.04.2021.
32. *Building the Hyperconnected Society* [Text] / Elias Tragos, Henrich Pöhls et al. // *Securing the Internet of Things*. – River Publishers, 2015. – 33 p. DOI: 10.13052/rp-9788793237988.
33. BeagleBone® AI [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://beagleboard.org/ai>. – 15.04.2021.
34. IEEE 1451.0-2007 - IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats [Електронний ресурс] / CFAT - Common Functionality and TEDS Working Group. – 2007. – Режим доступу: https://standards.ieee.org/standard/1451_0-2007.html. – 23.07.2021.
35. Манжос, Ю. С. Метод стиснення даних у мережі інтернет речей [Текст] / Ю. С. Манжос, Є. В. Соколова // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 4(96). – С. 57-67. DOI: 10.32620/reks.2020.4.05
36. IoT Botnet Detection Using Various One-Class Classifiers [Text] / Mehedi Hasan Raj, A. Rahman, et al. // *Vietnam Journal of Computer Science*. – 2021. – Vol. 8, No. 2. – P. 291-310. DOI: 10.1142/S2196888821500123.
37. Kolisnyk, M. *Vulnerability Analysis and Method of Selection of Communication Protocols for Information Transfer in Internet of Things Systems* [Text] / M. Kolisnyk // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2021. – №1(97). – С. 133–149. DOI: 10.32620/reks.2021.1.12.
38. *Impact of COVID-19 on IoT Adoption in Healthcare, Smart Homes, Smart Buildings, Smart Cities, Transportation and Industrial IoT* [Text] / M. Umair, M. A. Cheema, O. Cheema, H. Li, H. Lu // *Sensor*. – 2021. – Vol. 21, Iss. 11. – Article No. 3838. DOI: 10.3390/s21113838.
39. Koene, I. *IoT connected device for vibration analysis and measurement* [Text] / Ivar Koene, Ville Klar, Raine Viitala // *HardwareX*. – 2020. – Vol. 7. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.
40. Villarroel, A. *Development of a Low-Cost Vibration Measurement System for Industrial Applications* [Text] / Adrian Villarroel, Grover Zurita, Romeo Velarde // *Machines*. – 2019. – Vol. 7, Iss. 1. – Article No. 12. DOI: 10.3390/machines7010012.
41. *Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System* [Text] / J. J. Villacorta, L. del-Val, R. D. Martínez, et al. // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, Iss. 2. – Article No. 648. DOI: 10.3390/s21020648.

References (BSI)

1. Daidj, Nabya. *From Cooperation to Coopetition*. ISTE and Wiley, 2017, pp. 113-126. DOI: 10.1002/9781119476511.ch6.
2. Ashton, Kevin. That 'Internet of Things' Thing. *RFID Journal*, 2009. Available at: <https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing> (accessed 10.04.2021).
3. Evans, Dave. *The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco, 2011. Available at: http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf. (accessed 10.04.2021).
4. *IoT Signals Research, edition 2: global insights for 2020 and beyond*. Available at: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/iot-signals-research-edition-2-global-insights-for-2020-and-beyond/> (accessed 10.04.2021).
5. Rytter, Anders. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Ph.D.-Thesis defended publicly at the University of Aalborg, April 20, 1993.
6. Park, G., Muntges, D. E., Inman, D. J. Self-monitoring and self-healing jointed structures. In: *Damage Assessment of Structures, Proceedings of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures*, KeyEngineering Materials, 2001, vols. 204-205, pp. 75-84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.204-205.75
7. Larssonier, F., Rouillé, G., Bartoli, C. et al. Comparison on seismometer sensitivity following ISO 16063-11 standard. *19th International Congress of Metrology*, 2019, article no. 27003. DOI: 10.1051/metrology/201927003.
8. Bilgic, Eyup. Determination of Pulse Width and Pulse Amplitude Characteristics of Materials Used in Pendulum Type Shock Calibration Device. *Acta Physica Polonica*, 2017, vol. 132, no. 3-II, pp. 857-860. DOI: 10.12693/APhysPolA.132.857.
9. *ISO 16063-11:1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 1999. 27 p.
10. Krisovatij, A. I., Sokhatska, O. M. *Chetverta promyslova revoliutsiia: zmina napriamiv mizhnarodnykh investytsiinykh potokiv* [The fourth industrial revo-

lution: change directly in international investment flows], Ternopil, Osadtsa Yu. V. Publ., 2018. 478 p.

11. Fedulova L. I., Amelianenko L. M., *Investuvannya v tsyfrovu ekonomiku: hlobalni tendentsii ta praktyka ukraïny* [Investing in Digital Economy: Global Trends and Practice of Ukraine]. *Economy and Power*, 2020, no. 4. pp. 6-13.

12. *Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku tsyfrovoy ekonomiky ta suspilstva Ukraïny na 2018-2020 roky ta zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo yii realizatsii: pryniat Kabinetom Ministriv Ukraïny. Rozpor-yadzhenyia Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 17 sichnya 2018. # 67-r.* [About the meeting of the Concept of development of digital economy and support of Ukraine for 2018-2020 and the consolidation of the plan of visits by the Cabinet of Ministries of Ukraine. Order of the Cabinet of the Ministry of Finance of Ukraine from 17 June 2018. No. 67-r.]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#Text>. (accessed 15.05.2021).

13. Ilyashenko S. M., Ilyashenko N. S. *Perspektyvy i zahrozy chetvertoi promyslovoi revoliutsii ta yikh urakhuvannia pry vybori stratehii innovatsiinoho zrostannia* [Prospects and Threats to the Fourth Industrial Revolution and Urahuvannya in the Variety of Strategies for Innovative Growth Marketing and Management Innovation]. *Marketynh i menedzhment innovatsii – Marketing and Management*, 2016, no. 1, pp. 11-21.

14. de Reuver, Mark., Sørensen, Carsten., Basole, Rahul C. The digital platform: a research agenda. *Journal of Information Technology*, 2018, vol. 33, iss. 2, pp. 124-135. DOI: 10.1057/s41265-016-0033-3.

15. Sheludko, S., Bratkevych P. Vplyv tsyfrovizatsii na bankivskiy biznes v Ukraïni [Impact of digitalization on banking business in Ukraine]. *Classical private university*, 2019, no. 5(16), pp. 334-339. DOI: 10.32840/2522-4263/2019-5-57.

16. *Indeks zdorovia. Ukraïna – 2019: Rezultaty zahalnonatsionalnoho doslidzhennia* [Health Index. Ukraine – 2019: Results of the national national awareness], Kyiv, 2020, Available at: http://health-index.com.ua/HI_Report_2019_Preview.pdf. (accessed 12.04.2021).

17. Karpinskaya, V. A. *Ekosistema kak edinitsa ekonomicheskogo analiza* [Ecosystem as a unit of economic analysis]. *System Problems of the Domestic Meso-economics, Microeconomics, and Economics of Enterprises*, pp. 125-141. DOI: 10.33276/978-5-8211-0769-5-125-141.

18. Goodwin, Tom. *The Battle Is for the Customer Interface*. TechCrunch, 2015. Available at: <https://techcrunch.com/2015/03/03/in-the-age-of-disintermediation-the-battle-is-all-for-the-customer-interface>. (accessed 12.04.2021).

19. Petrov, M., Burov, V., Shklyaruk, M., Sharov, A. *Hosudarstvo kak platforma. (Kyber)hosudarstvo dlia tsyfrovoy ekonomiky. Tsyfrovaia transformatsiia* [State as a platform. (Cyber) state for the digital economy. Digital transformation]. Center for Strategic Research,

2018. Available at: <https://www.csr.ru/upload/iblock/313/3132b2de9ccef0db1eecd56071b98f5f.pdf>. (accessed 12.04.2021).

20. Beck, M. A., Beck, N. N., Buzulukova, E. V. et al. *Metodolohiya yssledovaniya setevykh form orhanizatsyy byznesa* [Methodology for researching network forms of business organization], University Higher School of Economics, Moscow, Ed. House of the Higher School of Economics, 2014. 446 p.

21. Chorna, M., Petlenko, K. *Tsyfrovii platformy v ekonomitsi: suchasni tendentsii ta napriamy rozvytku* [Digital platforms in the economy: modern trends and directions of development]. *Ekonomichna stratehiya i perspektyvy rozvytku sfery torhivli ta posluh - Economic strategy and prospects for the development of the sphere of trade and services*, 2019, pp. 50-60.

22. Evans, P. C., Gawer, A. *The Rise of the Platform Enterprise: A Global Survey*. The Emerging Platform Economy, 2016, Series No. 1. Available at: https://www.thecge.net/app/uploads/2016/01/PDF-WEB-Platform-Survey_01_12.pdf. (accessed 12.04.2021).

23. Tilson, D., Sørensen, C., Lyytinen, K. Change and Control Paradoxes in Mobile Infra-structure Innovation: The Android and iOS Mobile Operating Systems Cases, *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2012, pp. 1324-1333. DOI: 10.1109/HICSS.2012.149.

24. Nordrum, Amy. *Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated*. IEEE Spectrum, 2016. Available at: <https://spectrum.ieee.org/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>. (accessed 12.04.2021).

25. Ahmadi, P., Islam, K., Maco, T., Katam, M. A Survey on Internet of Things Security Issues and Applications, *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2018, pp. 925-934. DOI: 10.1109/CSCI46756.2018.00182.

26. *CyberVision, Inc. 10 Best IoT Platforms for 2021*. CyberVision, Inc. Available at: <https://www.cybervisiontech.com/blog/10-best-iot-platforms-2021>. (accessed 15.04.2021).

27. *Google Cloud IoT solutions*. 2021, Available at: <https://cloud.google.com/solutions/iot>. (accessed 15.04.2021).

28. *AWS IoT Core*. Available at: https://aws.amazon.com/iot-core/?nc1=h_ls. (accessed 15.04.2021).

29. *ThingWorx Industrial IoT Platform*. Available at: <https://developer.thingworx.com/platform>. (accessed 15.04.2021).

30. *ThingWorx Thing Model Visual Representation*. Available at: <https://support.ptc.com/help/thingworx/platform/r9/en/index.html#page/ThingWorx/Help/Composer/Things/ThingWorxThingModelVisualRepresentation.html>. (accessed 15.04.2021).

31. Solis, Brian. *Insights on the Future of the Internet of Things (IoT)*. Available at:

<https://www.briansolis.com/2017/08/insights-future-internet-things-iot/>. (accessed 15.04.2021).

32. Elias Tragos, Henrich Pöhls et al. *Building the Hyperconnected Society*. Securing the Internet of Things, River Publishers, 2015. 33 p. DOI: 10.13052/rp-9788793237988.

33. *BeagleBone® AI*. Available at: <https://beagleboard.org/ai>. (accessed 15.04.2021).

34. *IEEE 1451.0-2007 - IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Common Functions, Communication Protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*. CFAT - Common Functionality and TEDS Working Group. Available at: https://standards.ieee.org/standard/1451_0-2007.html (accessed 23 07 2021).

35. Manzhos, Yu. S., Sokolova, Ye. V. Metod stysnennya danykh u merezhi internet rechey [The method of data compression in internet of things communication]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2020, no. 4(96), pp. 57-67. DOI: 10.32620/reks.2020.4.05

36. Raj, Mehedi Hasan., Rahman, A. et al. IoT Botnet Detection Using Various One-Class Classifiers. *Vietnam Journal of Computer Science*, 2021, vol. 08, no. 2, pp. 291-310. DOI: 10.1142/S2196888821500123.

37. Kolisnyk, M. Vulnerability Analysis and Method of Selection of Communication Protocols for Information Transfer in Internet of Things Systems. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2021, no. 1(97), pp. 133-149. DOI: 10.32620/reks.2021.1.12.

38. Umair, M., Cheema, M. A., Cheema, O., Li, H., Lu, H. Impact of COVID-19 on IoT Adoption in Healthcare, Smart Homes, Smart Buildings, Smart Cities, Transportation and Industrial IoT. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 11, article no. 3838. DOI: 10.3390/s21113838.

39. Koene, I., Klar, V., Viitala, R. IoT connected device for vibration analysis and measurement. *HardwareX*, 2020, vol. 7. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.

40. Villarroel, A., Zurita, G., Velarde, R. Development of a Low-Cost Vibration Measurement System for Industrial Applications. *Machines*, 2019, vol. 7, iss. 1, article no. 12. DOI: 10.3390/machines7010012.

41. Villacorta, J. J., del-Val, L., Martínez, R. D. et al. Design and Validation of a Scalable, Reconfigurable and Low-Cost Structural Health Monitoring System. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 2, article no. 648. DOI: 10.3390/s21020648.

Надійшла до редакції 15.08.2021, розглянута на редколегії 23.09.2021

IoT PLATFORM FOR VIBRATION DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

I. Turkin, V. Leznovsky

The **subject of study** in the article is a digital platform for vibration diagnostics of industrial equipment. The **aim** is to increase the informativeness of vibration diagnostics processes of industrial equipment by developing and implementing IoT-oriented solutions based on the concept of intelligent sensors and actuators according to the IEEE standard 1451.0-2007. Tasks: to substantiate the feasibility of using platform-oriented technologies for vibration diagnostics of industrial equipment and choose a cloud service for the implementation of the platform, to develop software and hardware solutions for IoT-platform for vibration diagnostics of industrial equipment; calibrate the vibration diagnostic system and check the accuracy of the measurement. The **methods** used are microservice approach, multilevel architecture, methods for assessing the condition of equipment by vibration indicators. The following **results** were obtained. The Microsoft Azure IoT platform, which provides the infrastructure for creating and managing cloud applications, was chosen as the cloud computing platform for the industrial equipment vibration diagnostic system. Azure Internet of Things Suite is a Microsoft Azure IoT service designed to integrate and organize data flows, analyze, and present data in a format that helps people make informed decisions. The architecture of the IoT-system of vibration diagnostics of industrial equipment developed and presented in the article is three-level. The level of autonomous sensors provides reading of vibration acceleration indicators and through the digital wireless data transmission channel BLE transmits data to the Hub level, which is implemented based on a single-board microcomputer BeagleBone. The computing power of BeagleBone provides work with artificial intelligence algorithms. At the third level of the server platform, the tasks of diagnosing and predicting the state of the equipment are solved, for which the Dictionary Learning algorithm implemented in the Python programming language is used. **Conclusions**. Tests of the IoT system for vibration diagnostics of industrial equipment were performed using a special stand, which allows the calibration of sensors and verification of the accuracy of the measuring system. The correctness of the entire system is confirmed by the coincidence of expected and measured results. The direction of development of the IoT-system for vibration diagnostics of industrial equipment is the development of additional microservices, which will add the possibility of using modern artificial intelligence technologies for complex diagnostics and forecasting of equipment status.

Keywords: Internet of Things; digital platform; vibration diagnostics; calibration; ak-selerometer; industrial equipment.

IoT-ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. Б. Туркин, В. А. Лезновский

Предметом изучения в статье является цифровая платформа для вибрационной диагностики промышленного оборудования. **Целью** является повышение информативности процессов вибрационной диагностики промышленного оборудования путем разработки и внедрения IoT-ориентированных решений, основанных на концепции интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов в соответствии со стандартом IEEE 1451.0-2007. **Задача:** обосновать целесообразность использования платформоориентированных технологий для вибрационной диагностики промышленного оборудования и выбрать облачный сервис для реализации платформы, разработать программно-аппаратные решения IoT-платформы для вибрационной диагностики промышленного оборудования; откалибровать систему вибрационной диагностики и проверить точность измерения. **Используемыми методами** являются: микросервисный подход, многоуровневая архитектура, методы оценки состояния оборудования по вибрационным показателям. Получены следующие **результаты**. В качестве облачной вычислительной платформы для системы вибрационной диагностики промышленного оборудования выбрана платформа Microsoft Azure IoT, что обеспечивает инфраструктуру для создания и управления программами в облаке. Azure Internet of Things Suite является одной из служб Microsoft Azure IoT и предназначена для интеграции и организации потоков данных, анализа и представления данных в формате, который помогает людям принимать обоснованные решения. Архитектура разработанной и представленной в статье IoT-системы вибрационной диагностики промышленного оборудования является трехуровневой. Уровень автономных сенсоров обеспечивает считывание показателей вибрационного ускорения и через канал цифровой беспроводной передачи данных BLE передает данные на уровень Hub, который реализован на базе одноплатного микрокомпьютера BeagleBone. Вычислительная мощность BeagleBone обеспечивает работу с алгоритмами искусственного интеллекта. На третьем уровне платформы сервера решаются задачи диагностики и прогнозирования состояния оборудования, для чего применен алгоритм Dictionary Learning, который реализован на языке программирования Python. **Выводы.** Испытания IoT-системы для вибрационной диагностики промышленного оборудования было выполнено с использованием специального стенда, который дает возможность калибровки сенсоров и проверки точности измерительной системы. Корректность работы всей системы подтверждена совпадением ожидаемых и измеренных результатов. Направлением развития IoT-системы для вибрационной диагностики промышленного оборудования является разработка дополнительных микросервисов, которые дадут возможность применения современных технологий искусственного интеллекта для комплексного диагностирования и прогнозирования состояния оборудования.

Ключевые слова: Интернет вещей; цифровая платформа; вибрационная диагностика; калибровка; акселерометр; промышленное оборудование.

Туркин Игорь Борисович – д-р техн. наук, профессор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лезновський Вячеслав Андрійович – магістр інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Ihor Turkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department of Software Engineering and Business Faculty, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: i.turkin@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3986-4186, Scopus Author ID: 57203145725.

Viacheslav Leznovskiy – Master in Software Engineering, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: lieznovskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6189-7312.