

**Владислав Дмитрович Байда<sup>1</sup>, Олександр Анатолійович Велігорський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>  
Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

<sup>2</sup>завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>  
Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

## МЕТОДИКА ПОРІВНЯННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ ДИСТАНЦІЙНИХ ЛАБОРАТОРІЙ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті проведено аналіз та порівняння сучасних інформаційних технологій, які використовуються для побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення для технічної освіти. Окреслено архітектурні рішення, що використовуються в існуючих системах, а також проаналізовані їхні переваги та недоліки. Запропоновано методику порівняння таких систем за комплексом критеріїв, які включають рівень технологій, оновлення та підтримка, можливість інтеграції з системами управління навчанням, простота, швидкодія в real-time режимі та простота конфігурації. На основі цієї методології здійснено порівняльний аналіз існуючих систем і визначено фреймворк LabDiscoveryEngine як найбільш оптимальну технологію.

**Ключові слова:** дистанційні лабораторії; апаратне забезпечення; архітектура програмного забезпечення; розподілені системи; дистанційне навчання.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 27.

**Актуальність теми дослідження.** Стрімкий розвиток інформаційних технологій та глобальні виклики останніх років суттєво змінили підходи до організації освітнього процесу, особливо в галузі технічних наук. Епідемія коронавірусу, яка охопила світ, у тому числі й Україну, змусила освітні установи швидко адаптуватися до нових реалій та шукати ефективні способи дистанційного навчання. Ця ситуація загострила потребу в розробці та впровадженні систем дистанційних лабораторій, зокрема для вивчення апаратного забезпечення електронних пристроїв та систем.

Необхідність дослідження сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення особливо помітна в наш час в Україні, де через військові дії багато студентів та викладачів змушені працювати та навчатися віддалено. У цих умовах забезпечення якісної технічної освіти стає не лише освітнім, але і стратегічним завданням для підтримки та розвитку країни як тепер, так і в майбутньому, оскільки вони дозволяють студентам проводити експерименти та виконувати практичні завдання незалежно від їхнього фізичного місцезнаходження та досягати практикоорієнтованих результатів навчання, які вимагаються конкретною галуззю знань та спеціальністю. Крім цього, це також важливо для студентів з обмеженими можливостями для пересування [1].

Варто також зауважити, що віртуальні та дистанційні лабораторії також сприяють розвитку навичок самостійної роботи та самонавчання у студентів, оскільки, здобувачі вищої освіти з використанням дистанційних технологій можуть працювати у власному темпі, обираючи час, який підходить для них якнайкраще. Крім цього, з використанням дистанційних лабораторій, вони можуть повторювати експерименти стільки разів, скільки потрібно для повного засвоєння матеріалу. Усе це суттєво підвищує ефективність навчання та сприяє формуванню у студента важливих професійних компетенцій [2] та досягнення програмних результатів навчання.

Нарешті, дистанційні та віртуальні лабораторії готують студентів до роботи в сучасному цифровому світі, де віддалена робота та взаємодія з обладнанням через інтернет стають все більш поширеними. Це допомагає формувати навички, які будуть затребувані на ринку праці в майбутньому [4].

Також дистанційні лабораторії сприяють більш ефективному використанню ресурсів навчальних закладів. Вони дозволяють оптимізувати використання дорогого обладнання шляхом збільшення кількості студентів, які можуть з ним працювати, без необхідності придбання додаткових фізичних установок. Це можливе, зокрема, завдяки тому факту, що дистанційна та/або віртуальна лабораторія може використовуватися не тільки в години, у які студент, навіть при очній формі навчання, перебувають в університеті, а й надає можливість виконувати роботу в домашніх умовах. Це значно економить кошти навчальних закладів [5].

Дистанційні лабораторії базуються на двох окремих програмних складових. Перша, основна, спрямована на безпосередню підтримку виконання лабораторної роботи, взаємодії користувача з обладнанням через людино-машинний інтерфейс, давачі та виконавчі механізми. Друга, допоміжна, спрямована на задачі «високого рівня», пов'язані з розподіленням доступу до обмеженої кількості обладнання в умовах, коли кількість студентів перевищує кількість одиниць лабораторного обладнання, обмеження тривалості сесії, інтеграції із системами керування навчанням (Learning Management Systems, LMS) [3].

Дистанційні лабораторії мають певну схожість з погляду роботи з ними з віртуальними лабораторіями [5], але мають велику перевагу у вигляді надання студенту відчуття роботи з реальним обладнанням, що значно покращує досвід навчання [6], тому питання створення саме дистанційних лабораторій є актуальним у наш час.

Таким чином, дослідження та систематизація сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення є надзвичайно актуальним з огляду на поточні глобальні та локальні виклики, з якими стикається освітня галузь. Воно спрямоване на пошук інноваційних рішень для забезпечення безперервності та якості технічної освіти в умовах дистанційного та змішаного навчання.

**Постановка проблеми.** Як було зазначено вище, у поточній ситуації в країні, а також при будь-яких інших кризових ситуаціях, що ускладнюють та/або унеможливають повноцінне вивчення студентами навчальних предметів, які стосуються навичок роботи з реальним обладнанням, виникає гостра необхідність у розробці та впровадженні ефективних систем дистанційних лабораторій. Ці системи повинні забезпечувати якісну практичну підготовку студентів технічних спеціальностей в умовах віддаленого навчання.

При цьому основною проблемою є те, що традиційні методи отримання практичних навичок роботи з реальним електронним обладнанням, вивчення їхнього апаратного та вбудованого програмного забезпечення вимагають безпосереднього фізичного доступу до обладнання, що стає неможливим в умовах дистанційного навчання. Це створює значний розрив між теоретичними знаннями та практичними навичками студентів, що може негативно вплинути на якість підготовки майбутніх фахівців у галузі комп'ютерної інженерії та суміжних дисциплін.

Станом на сьогодні вже відомі низка підходів до розробки віддалених лабораторій для навчання студентів спеціальностей електронного спрямування, однак, часто вони не відповідають сучасним вимогам до інтерактивності, реалістичності та масштабованості. Вони можуть бути обмежені у функціоналі, не забезпечувати достатньої взаємодії з реальним обладнанням або бути занадто складними у впровадженні та підтримці. Крім цього, вони мають різні підходи до забезпечення взаємодії користувача з обладнанням, архітектурної побудови системи, що ускладнює їх порівняння та вибір найкращого підходу.

Таким чином, постає необхідність у дослідженні, детальному аналізі та порівнянні сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного та вбудованого програмного забезпечення електронних систем з метою виявлення їхніх переваг, недоліків та потенціалу для вдосконалення. Це дослідження має охопити технічні аспекти впровадження таких систем у навчальний процес.

Важливо також визначити, які саме компоненти та характеристики систем дистанційних лабораторій є ключовими для забезпечення ефективного навчання в умовах віддаленого доступу. Це включає аспекти інтерфейсу користувача, методи регулювання питань доступу великої кількості користувачів до обмеженої кількості стендів з апаратним забезпеченням, механізми забезпечення безпеки та надійності роботи з віддаленим обладнанням.

Вирішення цієї проблеми дозволить не тільки адаптувати освітній процес до поточних викликів, але і створити основу для більш гнучкої та доступної системи технічної освіти в майбутньому, здатної швидко реагувати на зміни в зовнішньому середовищі та забезпечувати високу якість підготовки фахівців незалежно від фізичного місцезнаходження студентів та викладачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що питання використання віддалених лабораторій, що надають вебінтерфейс для доступу до реального обладнання, є актуальним і потребує дослідження [1].

Дослідження [7] показує, що впровадження дистанційної лабораторії ПЛІС у навчання студентів у Національному університеті Ірландії не тільки підвищило загальні кількісні показники взаємодії студентів з лабораторією у порівнянні з суто фізичною лабораторією, а й підвищило середній бал за екзамен з 57 до 65 % у порівнянні з минулим (до впровадження системи дистанційних лабораторій ПЛІС) роком, що у свою чергу зображує кореляцію між наявністю можливостей для виконання лабораторних робіт віддалено та успішність студентів. Щоправда, в дослідженні брало участь усього 16 студентів.

Дослідження, проведене в Папському католицькому університеті Ріо-де-Жанейро [8], виявило цікаву тенденцію: багато студентів активно використовували віддалені лабораторії у вечірній та нічний час. Це спостереження підкреслює перевагу дистанційних лабораторій - вони дозволяють задовольнити потребу студентів у проведенні експериментів поза традиційними годинами роботи навчального закладу. Завдяки такому формату навчання, студенти отримують можливість працювати з лабораторним обладнанням майже в будь-який зручний для них час, що було б неможливо при традиційному форматі організації лабораторних занять.

Разом зі зростаючим попитом на дистанційні лабораторії в цілому, росте зацікавленість і в лабораторіях розширеної реальності (Extended Reality, XR), про що свідчить дослідження [6]. Використання розширеної реальності в системах дистанційної лабораторії, на думку авторів дослідження [6], дозволить покращити рівень «занурення» користувачів у виконання лабораторних робіт. Іншими словами, ідея полягає в наданні більш реалістичного досвіду роботи в дистанційних лабораторіях, аніж людино-машинний інтерфейс на основі миші та клавіатури як органів керування і зображення на моніторі як органа спостереження за фізичним станом віддаленої лабораторії.

Дослідження [9] показує, що зацікавленість в створенні симульованих та віддалених лабораторіях це не тільки нове явище, що пов'язане з викликами сьогодення, а досліджується вже як мінімум з 2006 року, про що свідчить дата публікації оглядової статті [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на зростаючий інтерес до систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, а також наявність певної кількості підходів у реалізації таких систем, станом на сьогодні немає наукових робіт, що аналізують поточний стан розвитку систем дистанційних лабораторій, узагальнюють підходи й методи, що в них використовуються, а також порівнюють їх за чітко сформованою методологією, роблячи висновки про переваги й недоліки кожної окремо взятої системи. Крім цього, станом на сьогодні, немає загального та спільного підходу (архітектури) до побудови систем дистанційних лабораторій для використання в дистанційному освітньому процесі для студентів технічних спеціальностей електронного спрямування.

Вирішення зазначених недосліджених програм дозволить майбутнім розробникам обрати найкращу архітектуру та програмні компоненти для розробки такої лабораторії.

**Метою статті** є аналіз, огляд та класифікація існуючих систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, а також створення нової методології порівняння існуючих систем, і її використання задля вибору найкращої архітектури побудови дистанційних лабораторій.

**Виклад основного матеріалу.** Віддалені лабораторії з реальним обладнанням являють собою системи, які дозволяють студентам керувати фізичними приладами та проводити експерименти через інтернет. На рис. 1 зображено структурну схему типової віддаленої лабораторії, яка складається з:

1. Користувача.
2. Лабораторного сервера (Laboratory Server): елемент, який потрібний для цілей реалізації черги доступів до обладнання, збереження інформації про сесії, інтеграції з системами керування навчанням тощо.
3. Блоку контролю (Controlling block): елемент, що слугує для керування апаратним забезпеченням, а саме: встановлення сигналів, завантаження вбудованого програмного забезпечення, вимірювання сигналів на виході тощо.
4. Апаратного забезпечення (Hardware): власне саме апаратне забезпечення, що вивчається користувачем.
5. Опціонально в лабораторії може бути використана відеокамера, яка забезпечуватиме трансляцію обладнання, якщо це важливо для виконання лабораторної роботи (наприклад, шляхом візуального контролю за переміщенням рухомих частин, індикації на обладнанні тощо).

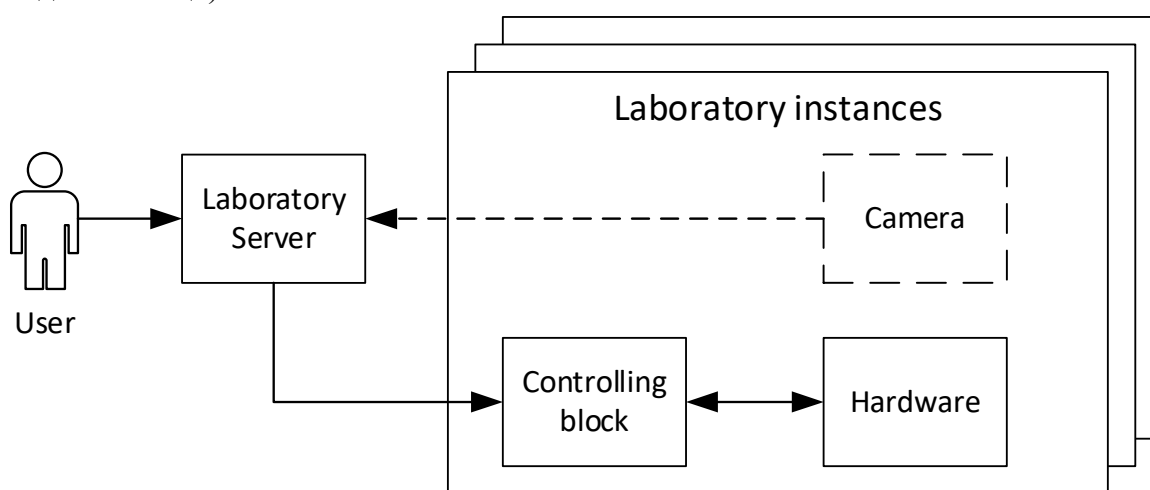


Рис. 1. структурна схема типової віддаленої лабораторії

Джерело: розроблено авторами.

Блок «Лабораторний сервер» здебільшого не є унікальним для кожної конкретної лабораторії, а має виконувати ті самі допоміжні задачі, такі як аутентифікація, авторизація, створення черги користувачів, бронювання лабораторії тощо [10; 11]. Тому постає необхідність у створенні додаткових програмних компонентів системи віддалених лабораторій, які можуть спростити створення дистанційних лабораторій шляхом реалізації однієї або багатьох таких функцій:

1. Надання доступу до безпосередньо інтерфейсу віддаленої лабораторії.
2. Аутентифікації та авторизації користувачів.
3. Створення черги для користувачів у разі перевищення кількості лабораторій кількістю користувачів.

4. Інтеграція з LMS, за допомогою якої викладачі можуть відслідковувати прогрес кожного окремого студента.

Такі програмні компоненти часто називають Remote Laboratory Management System (RLMS), оскільки вони виконують загальні задачі керування лабораторією.

**WebLabDeusto та LabDiscoveryEngine.** Станом на сьогодні відомі декілька таких систем, однією з таких систем є *LabDiscoveryEngine*, яка являє собою з відкритим вихідним кодом, що створена з використанням мови програмування Python [12]. Вона є логічним продовженням системи *WebLabDeusto* [13], що була розроблена в університеті Деусто в Іспанії. Варто зазначити, що *WebLabDeusto* є застарілою з технічного погляду в порівнянні з *LabDiscoveryEngine*, оскільки перша використовує Python версії 2 в той час, коли актуальною є версія 3. Помітно, що розвиток *WebLabDeusto* був зупинений у зв'язку з початком роботи над *LabDiscoveryEngine*, про що свідчить історія змін на github сторінці даної системи, остання зміна у якій (на момент написання статті) була зроблена 31 серпня 2022 року [14].

*WebLabDeusto* за замовчуванням виконує такі функції як складова дистанційної лабораторії:

1. Резервація певної лабораторії для використання користувачем.
2. Аутентифікація користувача.
3. Авторизація користувача.
4. Планування (черга користувачів).
5. Відстежування активності користувачів (вхід в систему, вихід з системи тощо).
6. Комунікація користувача з «блоком контролю» з рис. 1 [13].

Ця система може працювати в двох режимах:

1. Керована лабораторія (Managed laboratory).
2. Некерована лабораторія (Unmanaged laboratory).

У режимі керованої лабораторії *WebLabDeusto* повністю контролює комунікацію між клієнтом і сервером експерименту. Розробникам надано API та бібліотеку *WebLabDeusto* для створення клієнтської (переважно з використанням мови JavaScript) та серверної (з мовами програмування та технологіями Python, Java, .NET, C, C++, Node.js, LabVIEW тощо) частин лабораторії. Цей підхід добре підходить для команд, які менш досвідчені у веброзробці, оскільки *WebLabDeusto* бере на себе більшість складних аспектів.

У режимі некерованої лабораторії розробники мають більше свободи у виборі технологій та фреймворків для створення вебдодатка лабораторії, оскільки *WebLabDeusto* в цьому випадку відповідає лише за базові функції, такі як планування, аутентифікація та авторизація. Комунікація відбувається безпосередньо між клієнтом і сервером лабораторії. Цей підхід підходить для досвідчених веброзробників та складніших лабораторій.

*WebLabDeusto* підтримує різні типи некерованих лабораторій, включаючи використання бібліотеки *weblablib* для Python, HTTP-інтерфейс для будь-яких вебтехнологій, експериментальну підтримку *LabVIEW Remote Panels* та обмежену підтримку віртуальних машин.

Під HTTP-інтерфейсом мається на увазі те, що *WebLabDeusto* не вимагає від розробників, які хочуть використати систему задля отримання переваг, що описані вище, використання конкретних мов програмування і технологій, а дозволяє створювати на основі будь-яких технологій застосунки, що лише мають реалізувати певний набір операцій за допомогою протоколу HTTP та API, який описаний у документації.

Система забезпечує гнучкість у розгортанні, підтримує інтеграцію з системами управління навчанням (LMS) та федерацію лабораторій [10; 11] між різними установами, забезпечуючи доступ до ресурсів закладу-партнера з аналогічною дистанційною лабораторією, якщо всі екземпляри в першому закладі вже зайняті, у той час як у черзі все ще є охочі отримати доступ. *WebLabDeusto* також надає інструменти для аналітики навчання та моніторингу використання лабораторій.

Вибір між керованим та некерованим підходом залежить від досвіду розробників, складності лабораторії та конкретних вимог проєкту. *WebLabDeusto* прагне забезпечити гнучкість, щоб задовольнити різноманітні потреби в галузі віддалених лабораторій для освіти та досліджень [13].

На основі системи *WebLabDeusto* побудовано систему *LabsLand*, яка являє собою набір дистанційних лабораторій, що фізично розташовані в різних частинах світу. За допомогою даної системи, користувачі можуть отримати доступ до реального обладнання в будь-якій підключеній до системи лабораторії [15].

З точки зору організації архітектури, дистанційні лабораторії, що побудовані з використанням *WebLabDeusto*, остання виступає лабораторним сервером з рис. 1. Вона пере-направляє клієнтський застосунок до блоку контролю, що дозволяє самій *WebLabDeusto* бути лише прошарком і не залежати від конкретних лабораторій та експериментів.

Розробники системи *LabDiscoveryEngine*, яка, як було зазначено вище, є логічним продовженням системи *WebLabDeusto*, надають для використання інструмент *LabDiscoveryLib* з відкритим вихідним кодом [12]. Це бібліотека використовує мікро-фреймворк *Flask*, що базується на мові програмування *Python*. Вона спрощує створення дистанційних лабораторій, оскільки реалізує в собі той HTTP-інтерфейс, про який йшла мова вище, надаючи розробнику можливість використати його за допомогою декораторів в мові програмування *Python*.

Крім того, ця бібліотека, виходячи з документації [16], надає такі елементи функціональності:

1. Фонові задачі (Tasks), що виконуються в окремих потоках.
2. Підтримка протоколу *WebSockets*.
3. Підтримка багатьох лабораторій на одному сервері.
4. Використання користувачів з бази даних.
5. Сторінка для користувачів, що не мають доступу до системи.
6. Керування обмеженнями по часу.
7. Підтримка протоколу *http*.
8. Керування потоками та процесами.
9. Інтернаціоналізація (*i18n*).
10. Базова URL, що надає змогу реалізовувати більш, ніж одну лабораторію на одному сервері.

Для конфігурації лабораторій використовується файл у форматі *YAML*, де вказуються IP адреси конкретних блоків контролю (наприклад, застосунків з використанням бібліотеки *LabDiscoveryLib*) і певні теги, що слугують для кастомізації лабораторій.

На рис. 2 зображено структурну схему *LabDiscoveryEngine*, яка спільна так само і для *WebLabDeusto* з єдиною відмінністю в тому, що використовуються нові технології (*LabDiscoveryEngine* та *LabDiscoveryLib* замість *WebLabDeusto* та *WebLabLib*). Під “Custom Backend” мається на увазі те, що *LabDiscoveryLib* є лише опцією, якою можна знехтувати й написати власну реалізацію блоку контролю.

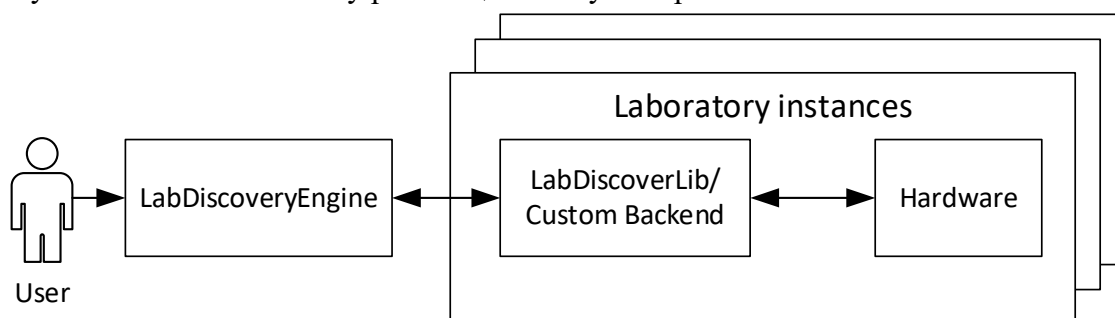


Рис. 2. Структурна схема системи *LabDiscoveryEngine*

Джерело: розроблено авторами.

**Дистанційні лабораторії в системі iLab.** Іншою системою дистанційної лабораторії є *iLab*, проект якої було розпочато в 1998 році в Массачусетському технологічному університеті в США. Основною причиною для створення системи, як зазначено в [17], була відсутність лабораторної складової курсу з напівпровідникових пристроїв в університеті, і було вирішено зробити лабораторні роботи з можливістю дистанційного доступу. Проект розвивався з часом і в 2003 році з'явився курс, що є предметом бакалаврату в Університеті Чалмерса в Швеції, на якому навчалися 350 студентів [17; 18].

Спочатку кожна лабораторія *iLab* розроблялася окремо, без використання спеціальних фреймворків. Згодом розробники *iLab* усвідомили, що розробляти кожен лабораторію і кожен експеримент з нуля є витратною по часу задачею. Крім того, у таких лабораторіях була помічена проблема підвищеного навантаження на менеджера лабораторій [17]. Таким чином почалася робота над *iLab Shared Architecture*, метою якої було підвищити масштабованість як процесу розробки дистанційних лабораторій, так і їхнього менеджменту.

Ця система реалізує ідею розподілення лабораторних експериментів на 3 категорії:

1. Серійні експерименти (*batched experiments*): експерименти, у яких весь хід роботи може бути описано та визначено заздалегідь. Наприклад, експерименти з FPGA, де чітко наперед прописані сигнали, що подаються на цифрову схему.

2. Інтерактивні експерименти (*interactive experiments*): експерименти, у яких студенту необхідним є доступ до лабораторії в режимі реального часу з можливістю впливати на систему, що досліджується.

3. Сенсорні експерименти (*sensor experiments*): у таких експериментах користувачі аналізують потоки даних у режимі реального часу, але не впливають на дані, що вимірюються [17].

Ідея полягає в тому, що інфраструктура під різні типи може бути різною. Так, наприклад, для експериментів другого типу зручно використати або чергу користувачів на експеримент, або бронювання певних часових інтервалів. Водночас для збільшення ефективності системи дистанційних лабораторій, експерименти першого типу можна проводити в режимі офлайн: користувач завантажує певний файл, що несе в собі інструкції з виконання лабораторної роботи, далі він може від'єднуватися від RLMS і чекати, поки не з'являться результати виконаної ним роботи.

Архітектура *iLab Shared Architecture* для серійних експериментів (*batched experiments*) зображена на рис. 3, яка досить схожа на зображену на рис. 1, та складається з:

1. Клієнтського застосунку *User*, який є унікальним для конкретного експерименту.
2. Лабораторного сервера, *Service Broker* в термінології *iLab*.
3. Блоку контролю, *Lab Server* у термінології *iLab*, який також є унікальним для конкретного експерименту.

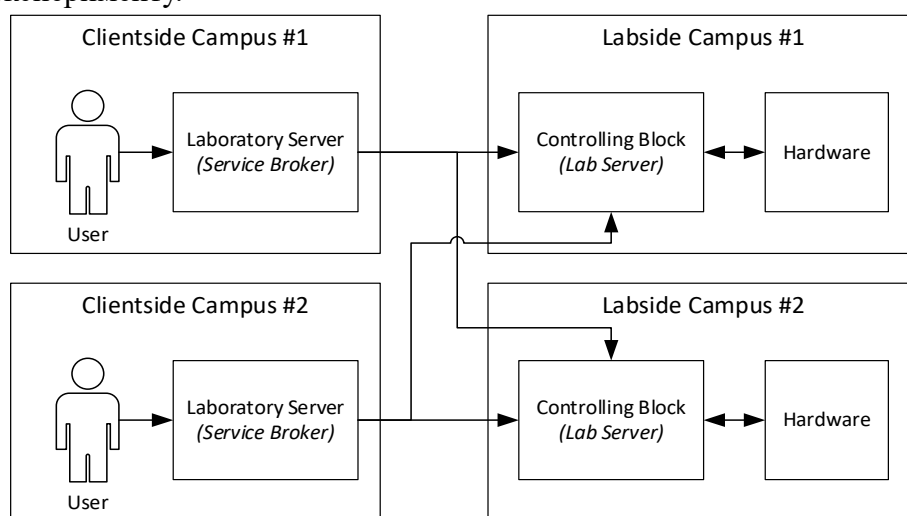


Рис. 3. Топологія архітектури *iLab* для серійних експериментів на основі [17]  
Джерело: розроблено авторами.

Для комунікації в системі використовується кодування XML, який у нас час поступається популярністю та розповсюдженістю формату JSON.

З метою проведення дистанційного експерименту за допомогою *iLab*, користувач спочатку авторизується на лабораторному сервері, обирає експеримент, після чого у нього відкривається відповідний клієнтський застосунок, в який він, в свою чергу, вводить необхідні для проведення експерименту дані. Лабораторний сервер отримує ці дані і згодом відправляє блоку керування на обробку (власне виконання експерименту).

Іншими словами, принцип дії помітно відрізняється від *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, де лабораторний сервер лише перенаправляє користувацький застосунок до блоку контролю. Вся інформація про виконання експерименту зберігається на лабораторному сервері, і весь хід виконання роботи керується лабораторним сервером.

На рис. 4 зображено топологію архітектури для інтерактивних експериментів, яка помітно відрізняється від зображеної на рис. 2.

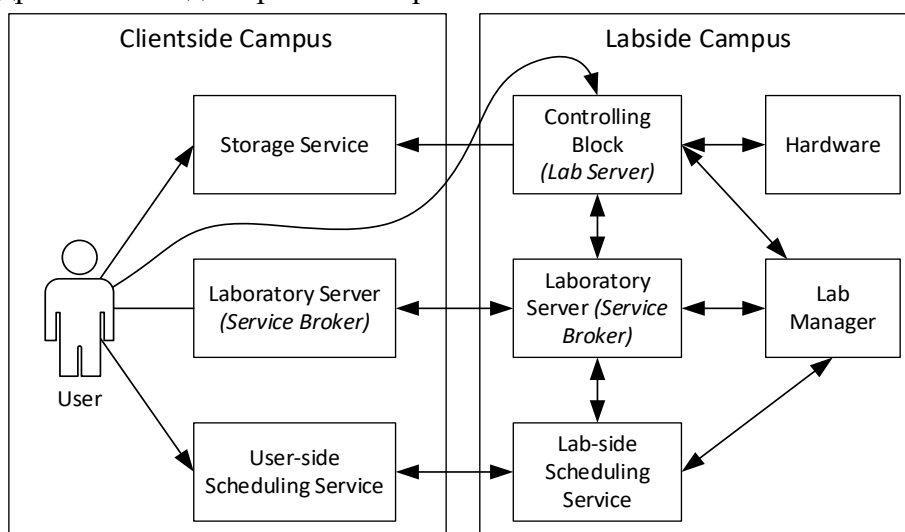


Рис. 4 - Топологія архітектури *iLab* для інтерактивних експериментів, основана на [17]  
Джерело: розроблено авторами.

У випадку з архітектурою *iLab* для інтерактивних експериментів, лабораторний сервер не використовується як єдиний вузол системи, через який відбувається комунікація між клієнтським застосунком та блоком контролю. Він же слугує для авторизації користувачів шляхом створення ключів доступу. В даній конфігурації підхід більш схожий на той, що використовується в *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, бо після початкового етапу користувацький застосунок та блок контролю починають взаємодіяти напряму, без використання зайвої ланки у вигляді лабораторного сервера.

Також, в даній архітектурі вводяться сервіс зберігання (Storage Service), необхідний для збереження даних щодо виконання експериментів та сервіси планування (Scheduling Services) задачі яких описані в [17] і [18]. Недоліком цього є складність системи, при чому система починає мати набагато більше складових, аніж у попередньо розглянутих архітектурах. Наприклад, в *iLab* використовуються сервіси планування (до того ж їх існує два типи [17]) для задач скидання стану лабораторії для початкового перед тим, як надати користувачу, який забронював певний час, доступ до лабораторії. І хоча ця функціональність справді є необхідною в деяких випадках, вона може бути реалізована простіше, без залучення додаткового сервісу, як це зроблено в *LabDiscoveryEngine*: в останньому блок керування має змогу самостійно сповістити лабораторний сервіс про готовність до завершення поточної сесії, або ж зробити необхідні речі перед початком нової сесії. Крім цього, недоліком також є відсутність підтримки інтеграції з LMS [19; 20], а також те, що з 2019 року проєкт є закритим.



### Дистанційні лабораторії VISIR.

Іншою системою дистанційних лабораторій є *VISIR*, що була розроблена в Технологічному інституті Блекінге, Швеція. Дана система близько 10 років використовувалася в університеті Деусто в Іспанії розробниками *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*. За результатами експлуатації ними було опубліковано дослідження [22], в якому наводяться переваги використання даної системи в університеті. Аналогічно, про позитивний вплив даної системи на навчання вказує дослідження [24].

Технологія *VISIR*, як зазначено у [25], складається з таких програмних компонентів (рис. 5): вебінтерфейс користувача, клієнт експерименту, сервер вимірювань та сервер експерименту. Вебінтерфейс користувача базується на мові PHP, у той час як клієнт експерименту – на Adobe Flash, він реалізує віртуальний інтерфейс для обладнання (осцилограф, мультиметр, генератор, макетна плата тощо). Сервер вимірювань реалізовано на мові Microsoft Visual C++, він здійснює авторизацію, автентифікацію, контроль часу експерименту та взаємодію користувача (клієнт експерименту) з обладнанням (сервер експерименту). Особливістю серверу експерименту є те, що він реалізований на LabView, що суттєво ускладнює розробку власних дистанційних лабораторій у випадку, якщо заклад не має відповідної ліцензії на програмне забезпечення. Крім цього, для роботи дистанційної лабораторії необхідне спеціалізоване апаратне забезпечення, яке складається з друкованих плат, розроблених винахідниками цієї технології, а також спеціалізованої комп'ютерної платформи PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) або LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) виробництва компанії National Instruments.

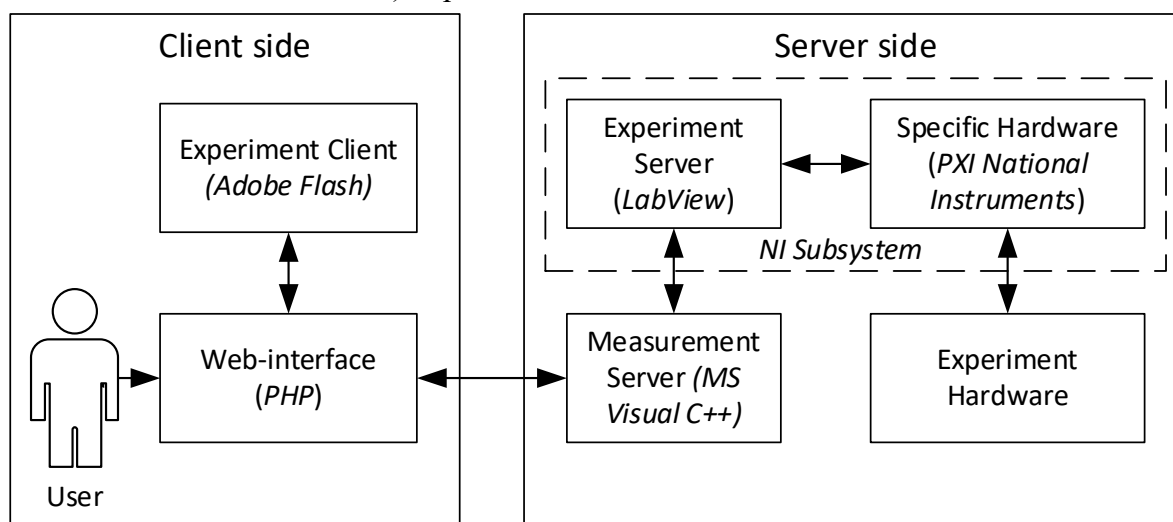


Рис. 5. Топологія архітектури *VISIR*

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 зображено зовнішній вигляд апаратного забезпечення системи *VISIR*, знизу – обладнання PXI від National Instruments, зверху – стек друкованих плат, на яких реалізовано комутацію електричних компонентів відповідно до схеми, яку користувач синтезує в клієнті експерименту. Така система використовує реле для перемикання компонентів електричної схеми, які спрацьовують досить швидко, після чого вона робить виміри. Оскільки час перемикання реле і вимірювання напруги досить невеликий для людини, то ця система має змогу обробляти багатьох користувачів псевдопаралельно, реалізуючи таким чином роботу майже в режимі реального часу [23].

У роботі [26], яка була опублікована у 2011 році, розкрито плани зі створення *VISIR Open Lab Platform 5.0*, яка має підтримувати федерацію і репозиторії для розповсюдження навчальних матеріалів. Запропонована архітектура платформи складається з двох

хмар: відкритого репозиторію навчальних матеріалів та мережі онлайн-лабораторій, що базуються на VISIR 5.0. Метою такої архітектури є створення можливості взаємодії університетів та інших навчальних закладів між собою шляхом спільного використання дистанційних лабораторій.

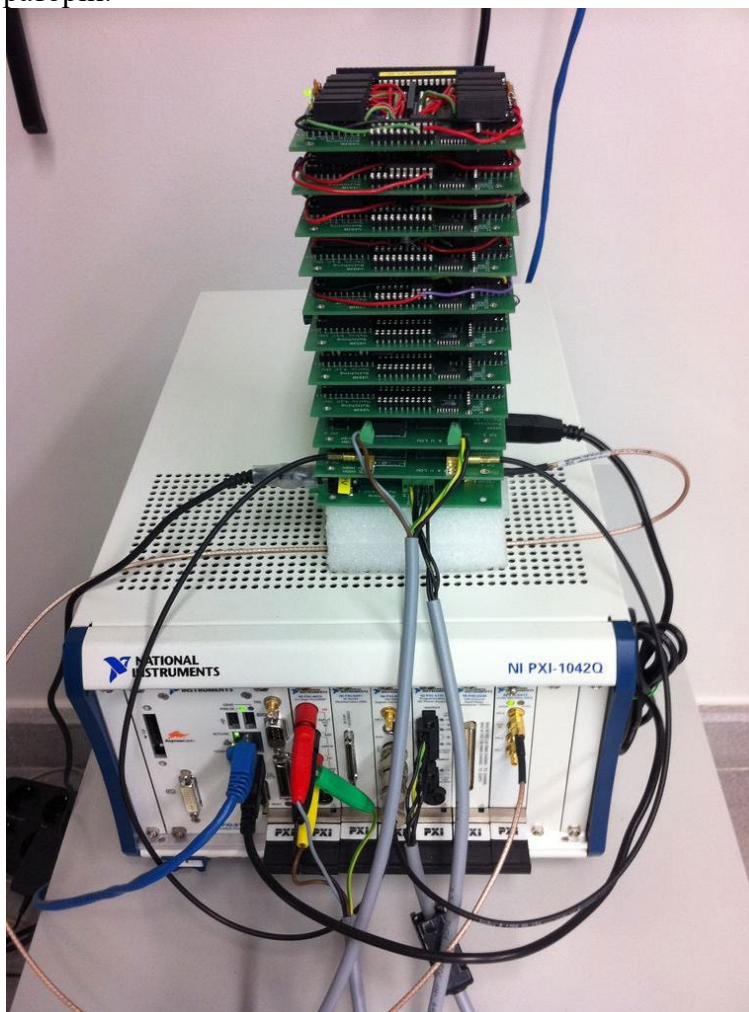


Рис. 6. Зовнішній вигляд системи VISIR [23]

**Дистанційні лабораторії у системі Framework for remote experiments in education.** Іншою системою є *FREE* (Framework for remote experiments in education) [27], побудована з використанням Python, Django.

Архітектура цієї системи збігається з тією, що зображена на рис. 1, включаючи підтримку відеозображення.

Аналогічно до *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, ця система вимагає від розробників нової лабораторії лише написання клієнтської частини по взаємодії з експериментом та серверу, який реалізує певний HTTP інтерфейс. Таким чином, система є досить гнучкою та легкою в розвитку і розробці.

Система підтримує можливість інтеграції з деякими системами авторизації, наприклад з Google та Microsoft шляхом використання протоколу OAuth, а також з LMS.

З точки зору конфігурації, *FREE* використовує принципово інший у порівнянні з іншими системами підхід, оскільки в ній блоки контролю самостійно «реєструються» на лабораторному сервері, а не лабораторний сервер конфігурують так, щоб він «знав» про існування блоків контролю по конкретних IP-адресах. Такий підхід дає додаткову зручність у конфігурації, але може нести за собою проблеми з безпекою.

Суттєвою відмінністю від *WebLabDeusto/LabDiscoveryEngine* є те, що в архітектурі *FREE* весь трафік від користувача до блоку контролю проходить через лабораторний сервер, при цьому останній ці дані ніяк не інтерпретує, а слугує лише як проксі-сервер. З одного боку це дає можливість зберігати всі дані про виконані студентами експерименти централізовано, а з іншого – збільшує навантаження на мережу та підвищує мережеву затримку між користувачем та експериментом. Також, судячи з опису в [26], для реалізації потоку даних від блока керування до користувача використовується підхід, у якому користувачський застосунок періодично опитує лабораторний сервер для отримання актуальних даних, що, своєю чергою, може мати негативний вплив на експерименти, для яких важливе виконання в реальному часі, тобто ті, де швидкість оновлення даних та їхня актуальність є важливими, як, наприклад, у системах з використанням осцилографа.

Система реалізує власний набір API для взаємодій «клієнт – лабораторний сервер» та «лабораторний сервер – блок контролю взаємодій», який містить мінімально достатню функціональність для роботи дистанційної лабораторії, але має обмеження щодо обміну даними між користувачьким застосунком та блоком контролю, описані вище.

Таким чином, розглянуті технології мають як переваги, так і недоліки, тому для вибору оптимальної технології необхідно розробити методіку порівняння та, відповідно до неї, провести порівняльний аналіз.

**Методика порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій.** Задля порівняння систем між собою, авторами запропоновано наступну методіку порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій.

1. *Вибір вагових коефіцієнтів та розрахунок інтегрального показника технології.* Пропонується для розрахунку інтегрального показника інформаційної технології дистанційних лабораторій, за яким буде здійснюватися порівняння, використовувати таку формулу, запропоновану авторами:

$$X = \sum_{i=1}^N k_i \cdot x_i, \quad (1)$$

де  $X$  – значення інтегрального показника інформаційної технології дистанційних лабораторій, чим більше значення, тим кращою є технологія;

$x_i$  – оцінка  $i$ -го критерію порівняння за п'ятибальною шкалою з  $N$  загальних, де 1 – найнижча оцінка, 5 – найвища;

$k_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го критерію порівняння в діапазоні від 0 до 1, з дотриманням умови, що сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнює 1, тобто максимальне значення інтегрального показника для будь-яких комбінацій вагових коефіцієнтів становитиме 5:

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1. \quad (2)$$

Очевидно, що вагові коефіцієнти, які мають значення більше ніж  $1/N$ , є більш важливими, ніж ті, які мають менше за середнє ( $1/N$ ) значення.

2. *Вибір найкращої технології дистанційних лабораторій.* На цьому етапі здійснюється порівняння отриманих значень інтегральних показників та вибір технології, для якої це значення буде максимальним.

**Порівняльний аналіз інформаційних технологій дистанційних лабораторій.** Для порівняння пропонується використати такі шість критеріїв  $[x_1 \dots x_6]$  з відповідними ваговими коефіцієнтами  $[k_1 \dots k_6]$ :

1. *Рівень технологій,  $x_1$ .* Цей критерій враховує те, наскільки використані мови програмування, системи керування базами даних тощо, є актуальними та підтримуються на час написання даної статті. Ваговий коефіцієнт  $k_1 = 0,15$ .

2. *Оновлення та підтримка,  $x_2$ .* Даний критерій характеризує рівень оновлюваності і підтримки технології її розробниками. Ваговий коефіцієнт для цього критерію обрано

вище середнього –  $k_2 = 0,2$ , оскільки відсутність оновлень або закінчення розвитку технології може призвести до проблем з працездатністю дистанційної лабораторії, у випадку оновлень інших компонентів системи.

3. *Можливість інтеграції з LMS*,  $x_3$ . Цей критерій відображає рівень підтримки інтеграції з LMS самою технологією, він є досить важливим ( $k_3 = 0,2$ ), оскільки доступ до дистанційної лабораторії із середовища LMS суттєво спрощує оцінювання виконаної роботи викладачем та загалом підвищує якість освітнього процесу.

4. *Простота*,  $x_4$ . Цей критерій враховує кількість «діючих осіб» в системі та рівень складності їх взаємодії один між одним. Ваговий коефіцієнт  $k_4 = 0,1$ , оскільки простота технології важлива лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий функціонал дистанційної лабораторії.

5. *Швидкодія в real-time режимі*,  $x_5$ . Цей критерій відображає те, наскільки архітектура системи добре підходить під real-time експерименти, і є найважливішим для нашого випадку ( $k_5 = 0,25$ ), оскільки ми аналізуємо технології з погляду їх використання для розробки дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, де спостереження за формою сигналів та взаємодія в режимі реального часу є критично важливою.

6. *Простота конфігурації*,  $x_6$ . Цей критерій характеризує рівень простоти налаштування системи дистанційної лабораторії з використанням обраної технології, ваговий коефіцієнт  $k_6 = 0,1$ , оскільки як і у випадку з 4 критерієм, він є важливим лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий результат та якість розробленої лабораторії.

Варто відзначити, що наведені вагові коефіцієнти та критерії обиралися авторами з погляду їх застосування для порівняння технологій дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, у випадку фокуса на інші спеціальності, як вагові коефіцієнти, так і перелік критеріїв може бути іншим, для чого потрібно робити додаткове дослідження.

Виходячи з інформації, наведеної вище, було проаналізовано інформаційні технології дистанційних лабораторій за запропонованою методикою порівняння: встановлено значення показників критеріїв  $x_i$  за методом експертної оцінки, та порівняно отримані значення розрахованого інтегрального показника. Найбільш важливі пояснення для кожної технології наведені нижче.

*WebLabDeusto* використовує застарілу версію Python, через що рівень технологій оцінений в 3 ( $x_1 = 3$ ). Також, дана система більше не підтримується, тому критерій «оновлення та підтримка» оцінено за мінімумом ( $x_2 = 1$ ). Через необхідність вказування IP адрес у файлі з форматом YAML, що дещо ускладнює конфігурацію системи, критерій «простота конфігурації» оцінений в 4 бали ( $x_6 = 4$ ). Всі інші критерії оцінені максимально.

На відміну від *WebLabDeusto*, технологія *LabDiscoveryEngine* використовує нову версію Python, підтримується і розвивається, але має такий самий підхід щодо конфігурації системи, тому вона має оцінку  $x_6 = 4$  також, водночас, як всі інші критерії оцінені максимально.

*VISIR Open Lab Platform 5.0* має складну систему інтеграцій, через що критерій «простота» оцінений як 2 ( $x_4 = 4$ ). Крім цього, технології, застосовані у ній, є застарілими (Adobe Flash, PHP тощо), тому критерій «рівень технологій»  $x_1 = 1$ , а оновлення технології відсутні ( $x_2 = 1$ ). Для конфігурації необхідне додаткове високовартісне обладнання виробництва компанії National Instruments, тому критерій «простота конфігурації» також оцінений мінімально ( $x_6 = 1$ ).

Система *iLab* використовує застарілі технології ( $x_1 = 1$ ), більше не підтримується ( $x_2 = 1$ ), не має інтеграції з LMS (окрім підходів інтеграції «ззовні» власноруч,  $x_3 = 1$ ), а також має забагато розподілених компонентів в системі, через що критерій «простота» був оцінений у 3 бали ( $x_4 = 3$ ).

У системи *FREE* лабораторний сервер слугує як проксі, через який проходять всі запити до блоку контролю, що створює додаткову складність ( $x_4=4$ ), а також негативно впливає на швидкодію в real-time режимі ( $x_5=3$ ).

Результати порівняння відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця інформаційних технологій дистанційних лабораторій за запропонованою методологією порівняння

Технологія	Рівень технологій $k_{x1}$	Оновлення та підтримка $k_{x2}$	Можливість інтеграції з LMS $k_{x3}$	Простота $k_{x4}$	Швидкодія в real-time режимі $k_{x5}$	Простота конфігурації $k_{x6}$	Інтегральний показник $X$
WebLabDeusto	$0,15*3=0,45$	$0,2*1=0,2$	$0,2*5=1,0$	$0,1*5=0,5$	$0,25*5=1,25$	$0,1*4=0,4$	3,8
LabDiscovery Engine	$0,15*5=0,75$	$0,2*5=1,0$	$0,2*5=1,0$	$0,1*5=0,5$	$0,25*5=1,25$	$0,1*4=0,4$	4,9
VISIR 5.0	$0,15*1=0,15$	$0,2*1=0,2$	$0,2*5=1,0$	$0,1*2=0,2$	$0,25*5=1,25$	$0,1*1=1,0$	2,9
iLab	$0,15*1=0,15$	$0,2*1=0,2$	$0,2*1=0,2$	$0,1*3=0,3$	$0,25*5=1,25$	$0,1*3=0,3$	2,4
FREE	$0,15*5=0,75$	$0,2*5=1,0$	$0,2*5=1,0$	$0,1*4=0,4$	$0,25*3=0,75$	$0,1*5=0,5$	4,4

Джерело: розроблено авторами.

**Результат аналізу.** Як видно з результатів, наведених у таблиці 1, технології *iLab* та *VISIR* отримали найнижчий інтегральний показник, і не рекомендуються, у випадку розробки нових дистанційних лабораторій. Технологія *WebLabDeusto* в цілому має досить високий інтегральний показник, однак, її використання вже не доцільне, оскільки всі її переваги повторюються у новій технології *LabDiscoveryEngine*, яка також має й додаткові переваги. Технологія *FREE* має високий інтегральний показник, і може бути рекомендована у тому випадку, якщо вимога реального часу не є пріоритетною. Найвищий інтегральний показник має технологія *LabDiscoveryEngine*, яка увібрала в себе всі напрацювання за останні роки, й саме вона рекомендується як найкраща для нових розробок дистанційних лабораторій.

**Висновки.** Дистанційні лабораторії є важливим інструментом для забезпечення високої якості освітнього процесу та отримання практично-орієнтованих навичок здобувачами освіти, що особливо важливо в умовах військових дій, пандемій, для учасників освітнього процесу, які паралельно з освітою працюють тощо. Результати, наведені у дослідженнях за даною тематикою демонструють позитивний вплив використання дистанційних лабораторій на результати навчання студентів, включаючи підвищення успішності студентів та розвиток їхніх практичних навичок навіть у зазначених вище умовах.

Аналіз існуючих розробок дистанційних лабораторій показав, що однією з тенденцій у їх розвитку є перехід від окремих спроб до створення універсальних архітектур та фреймворків, які значно спрощують процес розробки та управління такими системами. Прикладами таких фреймворків є *WebLabDeusto*, *LabDiscovery Engine*, *VISIR 5.0*, *iLab* та *FREE*. Це сприяє масштабуванню дистанційних лабораторій та поширенню їх у різних освітніх установах, що, в свою чергу, підвищує доступність якісної технічної освіти. Такі архітектури та фреймворки мають за мету надання розробникам вже готових реалізацій тих модулів дистанційних лабораторій, що є спільними для більшості систем, наприклад авторизація та автентифікація. Також вони слугують для інтеграції цих систем з системами управління навчанням (LMS) та реалізації федерації (обміну ресурсів) дистанційних лабораторій, що покращує рівень освіти в цілому в країні та/або світі.

Оскільки кожна з технологій має свої особливості реалізації, переваги й недоліки, важливим є їх детальний аналіз з метою виділення найбільш перспективних, які є найбільш доцільними для використання у нових розробках. Задля цього було запропоновано методику порівняння систем дистанційних лабораторій за набором критеріїв з ваговими

коефіцієнтами, що дозволило якісно та кількісно порівняти найбільш розповсюджені станом на сьогодні технології, і як результат застосування методики, визначити *LabDiscoveryEngine* як технологію, яка є найкращою на сьогодні для застосування у дистанційних лабораторіях електронного спрямування. Ця технологія побудована на актуальній версії Python, надає розробникам API для побудови власних дистанційних лабораторій, має широкий перелік функцій керування користувачами, придатна для використання у лабораторіях реального часу.

Запропонована методика порівняння може бути адаптована для дистанційних лабораторій, які мають інший фокус (наприклад, хімія, фізика, механічна інженерія), шляхом додавання нових критеріїв та вагових коефіцієнтів, або ж застосована до нових технологій дистанційних лабораторій у випадку їх появи, що може бути реалізоване у подальших дослідженнях. Крім цього, все ще залишаються відкритими питання щодо довгострокових ефектів використання дистанційних лабораторій, їх економічної ефективності та стандартизації. Перспективним напрямком розвитку систем дистанційних лабораторій також є впровадження технологій розширеної реальності (XR) для підвищення рівня заглибленості та зацікавленості студентів. Ці аспекти також потребують подальшого детального опрацювання для повного розуміння потенціалу та обмежень таких систем, і можуть бути вирішені в подальших дослідженнях.

Таким чином, системи дистанційних лабораторій апаратного забезпечення є важливим інструментом для забезпечення якісної технічної освіти в сучасних умовах. Їх подальший розвиток та вдосконалення мають критичне значення для підготовки кваліфікованих фахівців у галузі технічних наук. Продовження досліджень та інвестицій у цю галузь є необхідним для забезпечення стійкого розвитку технічної освіти та підтримки інноваційного потенціалу країни в довгостроковій перспективі.

#### Список використаних джерел

1. Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy / Van den Beemt, A., Groothuisen, S., Ozkan, L.[et al.] // *J Comput High Educ.* – 2023. – № 35. – Pp. 320-340. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>
2. Virtual Laboratories for Education in Science, Technology, and Engineering: A Review / V. Potkonjak, M. Gardner, V. Callaghan, P. Mattila, C. Guetl, V. M. Petrovic, K. Jovanovic // *Computers & Education.* – 2016. – № 95. – Pp. 309-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>.
3. Orduña, P. An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools / P. Orduña [et al.] // *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje.* – 2015. – Vol. 10, № 4. – Pp. 223-233. DOI: 10.1109/RITA.2015.
4. Zubía, J. G. Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation / J. G. Zubía, G. R. Alves. – Universidad de Deusto, 2012.
5. Balamuralithara, B. Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab / B. Balamuralithara, P. C. Woods // *Computer Applications in Engineering Education.* – 2009. – № 17(1). – Pp. 108-118. DOI: 10.1002/cae.20186.
6. Extended Remote Laboratories: A Systematic Review of the Literature From 2000 to 2022 / I. N. d. Silva, J. García-Zubía, U. Hernández-Jayo, J. B. D. M. Alves // *IEEE Access.* – 2023. – Vol. 11. – Pp. 94780-94804. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3271524.
7. Fearghal Morgan. Remote FPGA Lab for Enhancing Learning of Digital Systems / Fearghal Morgan, Seamus Cawley, David Newell // *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.* – 2012. – Vol. 5 (3). – Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1145/2362374.2362382>.
8. Impact of a remote lab on teaching practices and student learning / C. Viegas, A. Pavani, N. Lima, A. Marques, I. Pozzo, E. Dobboletta, V. Atencia, D. Barreto, F. Calliari, A. Fidalgo, D. Lima, G. Temporão, G. Alves // *Computers & Education.* – 2018. – № 126. – P. 201-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.07.012>.
9. Ma J. Hands-on, simulated, and remote laboratories / Jing Ma, Jeffrey V. Nickerson // *ACM Computing Surveys.* – 2006. – Vol. 38, № 3. – P. 7. DOI: <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>.

10. Orduña, P. An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools / P. Orduña [et al.] // IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 223-233. DOI: 10.1109/RITA.2015.
11. Orduña, P. Generic integration of remote laboratories in public learning tools: Organizational and technical challenges / P. Orduña [et al.] // 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings, Madrid, Spain, 2014. – Pp. 1-7. DOI: 10.1109/FIE.2014.7044025.
12. Lab Discovery Engine Website [Electronic resource] // Lab Discovery Engine Website. – Mode of access: <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
13. WebLab-Deusto - Front page [Electronic resource] // WebLab-Deusto - Front page. – Mode of access: <https://weblab.deusto.es/website/index.html>.
14. GitHub - weblabdeusto/weblabdeusto: Scalable, web-based and experiment-agnostic remote laboratory management system [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/weblabdeusto/weblabdeusto>.
15. Labsland [Electronic resource] // Labsland. – Mode of access: <https://labsland.com/en>.
16. Labdiscoverylib - 0.6 – labdiscoverylib 0.6 documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://developers.labsland.com/labdiscoverylib/en/stable>.
17. The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories [Electronic resource] / V. J. Harward [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96, no. 6. – Pp. 931–950. DOI: <https://doi.org/10.1109/jproc.2008.921607>.
18. Sharing online laboratories and their components VA new learning experience / Jeppson K., Lundgren P., del Alamo J. A., Hardison J. L., Zych D. // Proc. 5th Eur. Workshop Microelectron. Educ., Lausanne, Switzerland, Apr. 15–16, 2004.
19. Development and Interaction between LMS Services and Remote Labs [Electronic resource] / Elio Sancristobal [et al.] // International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE). – 2008. – Vol. 4, № 3. – Pp. 35-41. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v4i3.501>.
20. Sancristobal Ruiz, E. Integration view of Web Labs and Learning Management Systems / E. Sancristobal Ruiz, M. Castro, J. Harward, P. Baley, K. DeLong, J. Hardison // IEEE EDUCON 2010 Conference, IEEE, 2010. – Pp. 1409-1417. DOI: 10.1109/EDUCON.2010.5492363.
21. Developers - iLabs Dev - MIT Wiki Service [Electronic resource] // MIT Wiki Service. – Mode of access: <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/Developers>.
22. Using VISIR Remote Lab in the Classroom: Case of Study of the University of Deusto 2009 – 2019 [Electronic resource] / Javier Garcia-Zubia [et al.] // Cross Reality and Data Science in Engineering. – Cham, 2020. – Pp. 82–102. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_7).
23. Use this laboratory in class – VISIR 2.0 documentation [Electronic resource] // Labsland. – Mode of access: [https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use\\_this\\_laboratory.html#what-is-visir](https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use_this_laboratory.html#what-is-visir).
24. The remote laboratory VISIR - Introducing online laboratory equipment in electrical engineering classes [Electronic resource] / Dominik May [et al.] // 2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Uppsala, 21–24 October 2020. – [S. l.], 2020. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/fie44824.2020.9274121>.
25. The VISIR Open Lab Platform 5.0-An architecture for a federation of remote laboratories / I. Gustavsson, G. Alves, R. Costa, K. Nilsson, J. Zackrisson, U. Hernandez-Jayo, J. Garcia-Zubia // In Proceedings of the Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2011) Congress, Brasov, Romania, 29 June – 2 July 2011.
26. Design and implementation of a Framework for remote experiments in education / Pavel Kuriscak [et al.] // 2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Panama, Panama, 19 - 21 October 2022. – [S. l.], 2022. – Pp. 258-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/iestec54539.2022.00046>.
27. Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system / Razwan Mohmed Salah Najimaldeen, Gustavo Ribeiro Alves, Dezheen Abdulazeez, Pedro Guerreiro, Ingvar Gustavsson // 7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN2015). – Pp. 3824-3835.

### References

1. Van den Beemt, A., Groothuijsen, S., Ozkan, L. et al. (2023). Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy. *J Comput High Educ*, 35, 320–340. <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>.

2. Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrovic, V. M., & Jovanovic, K. (2016). Virtual Laboratories for Education in Science, Technology, and Engineering: A Review. *Computers & Education*, 95, 309-327. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>.
3. Orduña, P., et al. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 10, 4, 223-233. doi: 10.1109/RITA.2015.
4. Zubía, J. G., and Alves, G. R. (Eds). (2012). *Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation*, 8. Universidad de Deusto.
5. Balamuralithara, B., & Woods, P. C. (2009). Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), 108-118. doi: 10.1002/cae.20186.
6. Silva, I. N. d., García-Zubía, J., Hernández-Jayo, U. and Alves, J. B. D. M. (2023). Extended Remote Laboratories: A Systematic Review of the Literature From 2000 to 2022. *IEEE Access*, 11, 94780-94804. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3271524.
7. Morgan, F., Cawley, S., and Newell, D. (2012). Remote FPGA Lab for Enhancing Learning of Digital Systems. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.* 5, 3, Article 18 (October 2012). <https://doi.org/10.1145/2362374.2362382>.
8. Viegas, C., Pavani, A., Lima, N., Marques, A., Pozzo, I., Dobboletta, E., Atencia, V., Barreto, D., Calliari, F., Fidalgo, A., Lima, D., Temporão, G., & Alves, G. (2018). Impact of a remote lab on teaching practices and student learning. *Computers & Education*, 126, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.07.012>.
9. Ma, J., and Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Comput. Surv.*, 38(3), 7–es. <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>.
10. Orduña P., et al. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 10(4), 223-233. doi: 10.1109/RITA.2015.
11. Orduña, P. et al. (2014). Generic integration of remote laboratories in public learning tools: Organizational and technical challenges. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings. Madrid, Spain*. (pp. 1-7). doi: 10.1109/FIE.2014.7044025.
12. Lab Discovery Engine Website. (n.d.). <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
13. WebLabDeusto (n.d.). <https://weblab.deusto.es/website/index.html>.
14. GitHub (n.d.). <https://github.com/weblabdeusto/weblabdeusto>.
15. LabsLand (n.d.). <https://labsland.com>.
16. LabDiscoveryLib (n.d.). <https://developers.labsland.com/labdiscoverylib/en/stable>.
17. Harward, V. J., et al. (2008). The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. *Proceedings of the IEEE*, 96, 6, 931-950. doi: 10.1109/JPROC.2008.921607
18. Jeppson, K., Lundgren, P., del Alamo, J. A., Hardison, J. L., and Zych, D. (2004). Sharing online laboratories and their components VA new learning experience. Proc. 5th Eur. Workshop Microelectron. Educ., Lausanne, Switzerland, Apr. (pp. 15–16).
19. Sancristóbal, E., et al. (2008). Development and interaction between LMS services and remote labs. *Int. J. Online Eng.*, 4(3), 35–41.
20. Sancristobal Ruiz, E., Castro, M., Harward, J., Baley, P., DeLong, K., and Hardison, J. (2010). Integration view of Web Labs and Learning Management Systems. *IEEE EDUCON 2010 Conference, IEEE*. (pp. 1409–1417). doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492363.
21. The iLab Shared Architecture (n.d.). <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/Developers>.
22. Garcia-Zubia, J. et al. (2021). Using VISIR Remote Lab in the Classroom: Case of Study of the University of Deusto 2009–2019. Auer, M., May, D. (eds.). *Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1231. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_7).
23. What is VISIR? (n.d.). [https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use\\_this\\_laboratory.html#what-is-visir](https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use_this_laboratory.html#what-is-visir).



24. May, D., Reeves, B., Trudgen, M. and Alweshah, A. (2020). The remote laboratory VISIR - Introducing online laboratory equipment in electrical engineering classes". *2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. Uppsala, Sweden. (pp. 1-9). doi: 10.1109/FIE44824.2020.9274121.

25. Razwan Mohmed, Salah Najimaldeen, Gustavo Ribeiro Alves, Dezheen Abdulazeez, Pedro Guerreiro, Ingvar Gustavsson. (2015). Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system," 7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN2015) (pp. 3824 – 3835).

26. Gustavsson, I., Alves, G., Costa, R., Nilsson, K., Zackrisson, J., Hernandez-Jayo, U., Garcia-Zubia, J. (2011). The VISIR Open Lab Platform 5.0—An architecture for a federation of remote laboratories. In *Proceedings of the Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2011)*. Congress, Brasov, Romania, 29 June–2 July 2011.

27. Kuris`c`ak, P., et al. (2022). Design and implementation of a framework for remote experiments in education. *8th Intl. Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)* (pp. 258–265).

Отримано 02.12.2024

UDC 004.771

**Vladyslav Baida<sup>1</sup>, Oleksandr Velihorskyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Informational and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

<sup>2</sup>Head of the Department of Radio Engineering and Embedded Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

## METHODOLOGY FOR COMPARISON OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR DEVELOPMENT OF REMOTE HARDWARE LABORATORIES

*The rapid development of information technologies and global challenges of recent years have significantly altered approaches to organizing educational processes, especially in technical sciences. The need for remote hardware laboratories has become particularly acute in Ukraine due to the ongoing military conflict, where many students and teachers are forced to work and study remotely. This research addresses the critical need for effective remote laboratory systems that can provide quality technical education regardless of physical location.*

*The study focuses on analyzing and comparing modern remote hardware laboratory systems, proposing a methodology for their evaluation, and determining the most optimal solution for implementation. The problem lies in the traditional methods of hardware study requiring physical access to equipment, which becomes impossible in remote learning conditions. This creates a significant gap between the theoretical knowledge and practical skills of students.*

*The research proposed a new methodology that involves a systematic analysis of existing remote laboratory systems based on six key criteria: technology level, updates and support, Learning Management System (LMS) integration capabilities, simplicity, real-time performance, and ease of configuration. The study examines several major systems, including WebLab-Deusto, LabDiscoveryEngine, VISIR, iLab, and FREE, analyzing their architectures, advantages, and limitations.*

*Through comparative analysis, the research revealed that LabDiscoveryEngine demonstrates the highest overall effectiveness among the examined systems, scoring 29 out of 30 possible points across all evaluation criteria. The study identified key architectural approaches used in existing systems and analyzed their respective strengths and weaknesses. Special attention was paid to aspects such as the user interface, managing access to limited hardware resources, and security mechanisms.*

*The results of the study allow the use of the new proposed methodology for comparing remote laboratory systems and improve the overall understanding of the development and implementation of remote laboratory systems, providing valuable information for universities seeking to implement or improve their remote laboratory capabilities.*

*The article emphasizes the critical importance of remote laboratory systems for ensuring quality technical education in modern conditions and outlines future research directions, including the investigation of long-term effects, economic efficiency, and standardization of remote laboratory systems. The research results can be practically applied in selecting key technologies for creating new remote laboratories and improving existing ones.*

**Keywords:** remote laboratories; hardware; software architecture; distributed systems; distance learning.

*Fig.: 6. Table.: 1. References: 27.*