

В. І. Манжула, канд. тех. наук, доц.; В. В. Забчук

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

У зв'язку з масовими ракетними атаками по об'єктах критичної інфраструктури України в регіонах регулярно відбуваються аварійні та стабілізаційні відключення електроенергії, і тому поточним завданням для України є нарощення потужностей наявних генеруючих об'єктів, або посилений розвиток відновлювальних джерел енергії.

Виробництво біогазу способом переробки органічних відходів життєдіяльності людини та відходів тваринництва і агропромислового комплексу є одним із пріоритетних напрямків розвитку альтернативної (зеленої) енергетики. Разом з тим, підвищення ефективності функціонування цього виробництва вимагає розробки нових підходів управління процесами в біогазових установках на основі застосування інформаційних технологій та методів математичного моделювання.

В роботі обґрунтовано використання сучасних інформаційних технологій та математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних, як ефективних інструментів управління процесами у біогазових установках. Використання інтервального моделювання дозволяє побудувати моделі із гарантованими прогностичними властивостями.

У статті також представлено особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання процесів у біогазових установках. Описано основні аспекти реалізації програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках, особливістю якого є програмна інтерпретація інтервальних дискретних моделей та відкрита сервісо-орієнтована архітектура, що забезпечує їх інтеграцію в наявні системи управління біогазовими установками та дозволяє в реальному часі управляти біохімічними процесами і тим самим підвищити ефективність функціонування біогазових установок. Приведено ряд діаграм, які ілюструють особливості програмної реалізації середовища для моделювання процесів у біогазових установках та описано специфіку його імплементації в універсальну систему імітації та моделювання роботи біогазових установок SIMBA#biogas.

Ключові слова: *архітектура програмного забезпечення, біогазова установка, математичне моделювання, інтервальний аналіз, програмне середовище.*

Вступ

Зростання усвідомлення наслідків забруднення довкілля та потреба в альтернативних джерелах енергії призвело до підвищення інтересу до використання біогазу як екологічно чистого палива. У зв'язку з постійним зменшенням запасів традиційних джерел енергії, таких як нафта та вугілля, біогаз стає привабливим джерелом альтернативної енергії [1 – 3].

Ефективне моделювання процесів у біогазових установках (БГУ) допомагає розробити ефективні стратегії виробництва, що забезпечують стабільну поставку енергії, а також дозволяє оптимізувати процеси виробництва біогазу з метою мінімізації викидів шкідливих речовин та збільшення виходу енергії. Математичне моделювання забезпечує ефективну альтернативу для звичайних методів моніторингу процесів анаеробного бродіння у БГУ. Оскільки інструменти математичного моделювання широко використовуються в інших галузях промисловості, їх можна використовувати для проектування та оптимізації комплексних процесів у біогазових установках. Крім того, майбутні біогазові установки в Україні будуть працювати більш гнучко, ніж сьогодні, щодо обслуговування та виробництва біогазу, що потребуватиме покращеного моніторингу [1 – 5]. Інтеграція програмних систем із підсистемами математичного моделювання в моніторинг процесів в БГУ може забезпечити ефективне прогнозне обслуговування, яке забезпечить гнучкість процесу виробництва біогазу.

Розробка математичного та програмного забезпечення прототипу БГУ для моделювання

процесів виробництва біогазу та управління ними дозволить знизити негативний вплив процесів утилізації біосировини на довкілля за рахунок зменшення не менш як на 30 % обсягів твердих побутових органічних відходів на сміттєзвалищах. А також забезпечить можливість отримання біометану, який за своїми характеристиками буде відповідати стандартам визначеним у директиві Європейського Союзу про якість палива (2009/28/ЕС), та таким чином залучити різні механізми підтримки Європейського Союзу, щодо використання відновлюваних джерел енергії.

Згідно з результатами попередніх досліджень [5 – 12], процес анаеробного мікробіологічного бродіння у БГУ суттєвим чином залежить від структури біосировини, кислотності середовища та температури. Тому використання стандартних технологій налаштування параметрів процесів у БГУ, наприклад компанії ZORG, може суттєвим чином знизити ефективність процесу виробництва біогазу та не забезпечить можливість неперервної подачі різних типів сировини у біореактор. На противагу цьому, можна було б щоразу при проектуванні чи інсталяції нової установки або ж зміні типу чи структури субстрату залучати експертів з енергетики до процесу налаштування параметрів БГУ, але це, в свою чергу, потребує додаткового фінансування. Водночас, запропонований, в межах цього проекту прототип біогазової установки підвищить ефективність функціонування БГУ, що сприятиме підвищенню кількості виробленого біогазу та покращення якості отриманого на його основі біометану. Крім того, у відбродженому субстраті суттєво зменшиться концентрація метану і таким чином цей субстрат перетвориться у високоякісне органічне добриво. Водночас, дуже важливо правильно налаштувати процес очищення біогазу від сірки, вуглекислого газу, конденсату та ін., у такий спосіб, щоб отримати чистий біометан, який відповідатиме європейським стандартам якості. Адже це забезпечить можливість залучення додаткових механізмів підтримки та стимулювання відповідно до директиви Європейського Союзу про якість палива (2009/28/ЕС), яка, власне, і регламентує ці стандарти (кількість енергії на одиницю об'єму, максимально допустимий вміст різних типів забруднень та ін.) та визначає ці механізми для виробників такого біометану. Таким чином, отримуємо наступні результати: зменшення вартості 1 кВт-год. (на основі спалювання виробленого біометану) та зменшення витрат на виробництво сільськогосподарської продукції через використання отриманих органічних добрив, а також залучення механізмів підтримки Європейського Союзу, щодо використання відновлюваних джерел енергії. Також запропонований прототип біогазової установки адаптивного налаштування параметрів БГУ під конкретну структуру біосировини матиме високу цінність також і для агропідприємств, які впроваджують замкнений цикл безвідходного виробництва, тобто виробництво сільськогосподарської продукції та переробка відходів цього виробництва шляхом їх перетворення у біометан, електроенергію та органічні добрива.

Мета роботи та постановка задачі дослідження

Процеси виробництва біогазу є досить технологічно складними та вимагають додаткового вивчення структури сировини та залучення експертного середовища для їх налаштування в залежності від типу та структури сировини. Загальна схема функціонування біогазової установки наведена на рис. 1. Для ефективного функціонування біогазових установок та підвищення обсягів виробленого біогазу необхідно вирішити дві задачі: забезпечення неперервного та максимального завантаження біосировини у біореактор та налаштування параметрів функціонування БГУ залежно від типу сировини. Обидві ці задачі можна вирішити за допомогою експертного середовища та неперервного контролю стану субстрату у БГУ, зокрема його температури та рівня рН. Якщо усунути зазначені контрольні заходи, то це призведе до швидкого закисання субстрату і відповідно до зниження темпів виробництва біогазу або ж навіть до повної зупинки цього процесу. Іншою проблемою під час виробництва біогазу є наявність у його складі сполук сірки та вуглекислого газу, що суттєво

знижує його якість. Зазначені проблеми суттєво знижують ефективність функціонування БГУ, збільшують термін їх окупності тим самим перешкоджають формуванню альтернативної енергетичної системи України із відновлювальних джерел енергії.

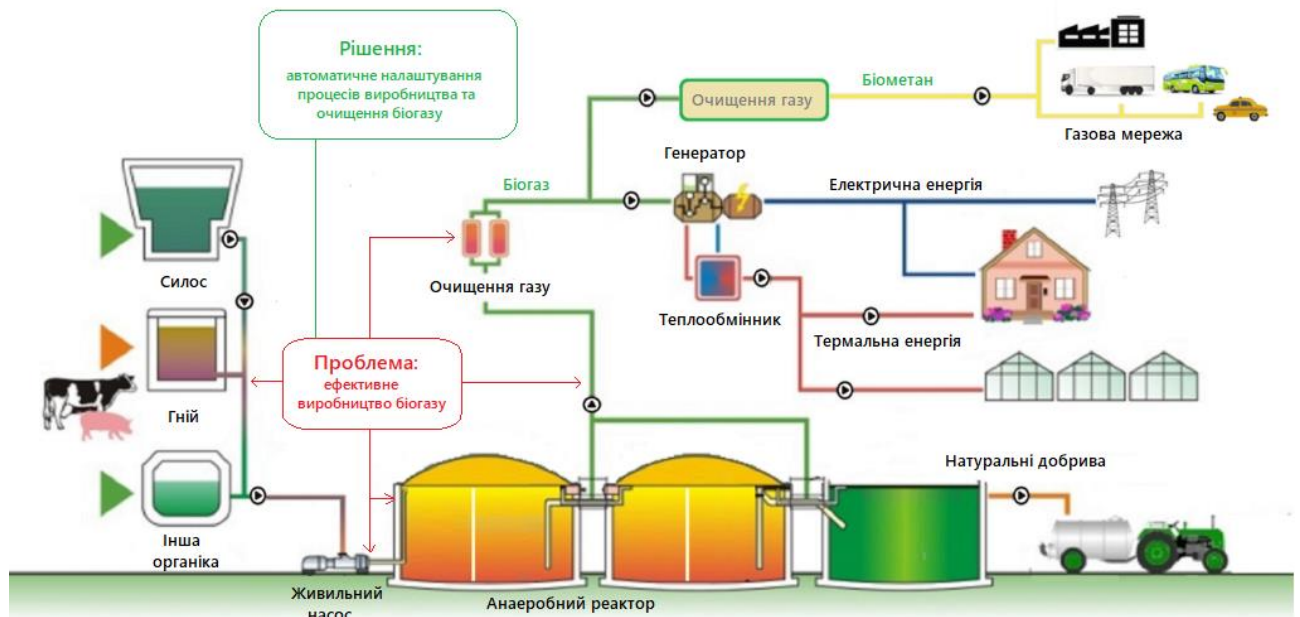


Рис. 1. Схема функціонування біогазової установки

Вказані проблеми пропонується вирішити способом розробки математичного та програмного забезпечення, як для моделювання процесів у БГУ, так і для управління ними, що у сукупності дає можливість створити прототип БГУ з підвищеною ефективністю функціонування.

Також необхідно відзначити основні проблеми, які виникають в процесі інтеграції програмних систем в процесі управління біогазовими установками, та виробити основні варіанти їх вирішення. Загальна схема із описом таких проблем та варіантів їх вирішення наведена на рис. 2, яку розглянемо більш детально.

Однією з ключових проблем є сумісність датчиків із програмним забезпеченням, яка вимагає щоб використані датчики були сумісними з програмним забезпеченням для управління біогазовою установкою. Це може вимагати розробки або внесення змін у програмне забезпечення для забезпечення коректної роботи з відповідними датчиками. Правильне калібрування і налаштування датчиків є важливим етапом для забезпечення точності та надійності даних, які вони надають. Це може стати проблемою, особливо якщо датчики потребують індивідуального налаштування або вимагають спеціалізованої експертизи та залучення висококваліфікованих експертів. Дані, що надходять від датчиків, потрібно ефективно обробляти та інтегрувати у програмні системи для подальшого аналізу та управління процесами в біогазовій установці. Це може включати розробку алгоритмів обробки даних та їх інтеграцію у вже наявне програмне забезпечення. Деякі датчики можуть виявити низьку надійність або вийти з ладу через різноманітні причини, такі як відмова обладнання або невірне використання. Це може призвести до зниження ефективності управління та потреби у заміні датчиків, що може бути доволі затратним процесом.

Також окремим блоком необхідно виділити проблеми, які пов'язані із комунікацією та підключенням. Дуже часто виникають проблеми через несумісність протоколів зв'язку між програмними системами та обладнанням біогазових установок. Це може потребувати розробки проміжного програмного забезпечення або перетворення даних для забезпечення взаємодії між системами. Непередбачувані відмови мережі або втрати пакетних даних можуть вплинути на доступність та надійність комунікації між програмними системами та біогазовими установками. Це може стати перешкодою для ефективного управління та

моніторингу процесів.

З огляду на збільшення кількості кібератак на промислові системи, забезпечення захисту від несанкціонованого доступу до програмних систем управління біогазовими установками є критичним завданням. Необхідно вживати заходів для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних. Інтеграція наявних систем може бути складною через різноманітність технологій, що використовуються в різних частинах біогазових установок. Це може вимагати розробки та впровадження стандартизованих протоколів комунікації та інтерфейсів.

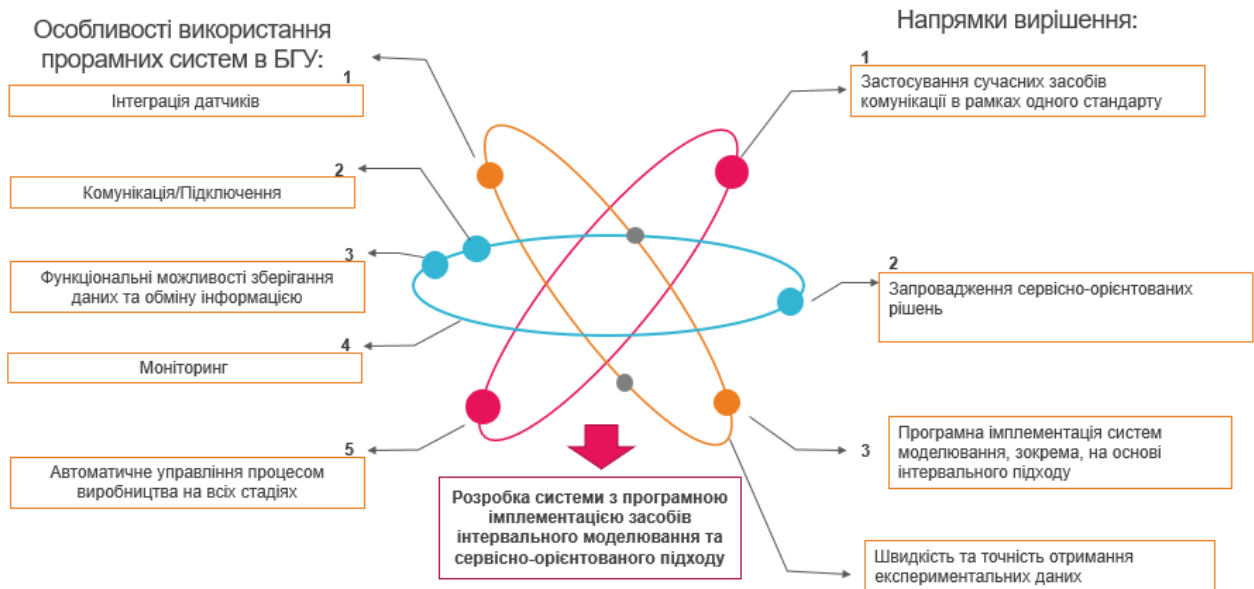


Рис. 2. Проблеми інтеграції програмних систем в процесі управління біогазовими установками та напрямки їх вирішення

Особливо необхідно відзначити основні аспекти, які пов'язані з автоматичним управлінням процесами виробництва біогазу на всіх стадіях. Програмні системи можуть використовуватися для автоматичного моніторингу різних параметрів виробництва біогазу, такі як: температура, тиск, кислотність та інші важливі показники. Це дозволяє операторам отримувати в реальному часі інформацію про стан процесу та вчасно приймати необхідні рішення під час виникнення непротокольних ситуацій. На основі отриманих даних програмні системи можуть автоматично регулювати параметри процесу виробництва біогазу, які включають зміну режимів роботи обладнання, налаштування обсягу залученої сировини чи додавання реагентів для оптимізації виробничих процесів. Застосування методів математичного моделювання у програмних системах дозволяє проводити прогнозування та оптимізацію процесу виробництва біогазу. Це допомагає зменшити витрати енергії, збільшити обсяги виробництва та покращити якість кінцевого продукту. Програмні системи можуть автоматично збирати та зберігати дані про всі етапи виробництва біогазу з метою здійснення детального аналізу ефективності процесу, виявляти потенційні проблеми та розробляти стратегії для їх вирішення.

Метою статті є проектування та реалізація програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках на основі методів аналізу інтервальних даних.

Використання математичного моделювання на основі інтервального аналізу даних для управління процесами у біогазових установках

Як відомо, оптимальне функціонування біогазових установок є ключовим фактором для ефективного виробництва біогазу. Проте важливо враховувати, що технологічні процеси виробництва біогазу можуть відрізнятися в залежності від типу біосировини, методу ферментації, очищення та інших факторів. Це означає, що при проектуванні та впровадженні біогазових установок необхідно залучати фахівців з енергетики або біогазового виробництва.

На жаль, на сьогоднішній день відсутні прототипи біогазових установок, які б могли автоматично налаштовувати процеси виробництва та очищення біогазу. Очевидно, що для розробки таких прототипів потрібно буде створити математичні моделі процесів мікробіологічного бродіння субстрату та очищення біогазу.

Це пов'язано з тим, що зараз не існує прототипів біогазових установок для автоматичного налаштування процесів виробництва та очищення біогазу в БГУ. Зрозуміло, що в основу такого прототипу біогазової установки повинні бути закладені математичні моделі процесів мікробіологічного бродіння субстрату та очищення біогазу. Наприклад, такі математичні моделі описані у працях [1 – 9]. Вони ґрунтуються на властивостях біохімічних перетворень і мають детерміністичний характер, що унеможливорює їх застосування при розробці прототипу біогазової установки для автоматичного налаштування процесу виробництва та очищення біогазу в БГУ. Адже ці моделі не можуть враховувати можливі відхилення на будь-якій стадії виробництва та очищення біогазу в технологічних параметрах цих процесів і не враховують тип та структуру біосировини.

На противагу до зазначених математичних моделей могли б бути використаними макромоделі процесів у біогазових установках у вигляді інтервальних різницевих рівнянь. Наприклад, моделі, які відображають динаміку обсягу виробленого біогазу в залежності від умов середовища у біореакторі та способу подачі сировини, чи такі моделі, які відображають динаміку обсягів шкідливих речовин у біогазі під час його очищення.

Звісно такий підхід вимагає розв'язування ряду нових наукових задач, включаючи створення нових методів ідентифікації таких моделей на основі аналізу інтервальних даних і побудову нових математичних моделей процесів у біогазових установках у вигляді інтервальних різницевих рівнянь та їх адаптації до використання в складі прототипу біогазової установки автоматичного налаштування параметрів БГУ. Але, водночас, застосування такого підходу та розробки нового математичного та програмного забезпечення прототипу біогазової установки для моделювання процесів у БГУ дозволить в реальному часі управляти цими процесами і тим самим підвищити ефективність функціонування БГУ.

Проектування архітектури програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках

Розглянемо основні аспекти реалізації системи для моделювання процесів у біогазових установках. В основу такої системи закладено програмну інтерпретацію інтервальних дискретних моделей та відкриту сервісно-орієнтовану архітектуру.

Математичне моделювання на основі інтервального аналізу дозволяє враховувати не тільки точкові значення параметрів, а й їх діапазони змін, що дозволяє більш точно прогнозувати та керувати процесами в біогазових установках для оптимізації виробничих процесів та підвищення їх ефективності. Такий підхід дозволяє враховувати невизначеність та варіабельність параметрів процесу, що може допомогти в управлінні ризиками та забезпеченні надійності роботи біогазових установок. Розробка системи з використанням сервісно-орієнтованого підходу дозволяє створювати масштабовані та гнучкі модулі, які можуть легко інтегруватися з наявними технологіями та розширювати їх згідно з виникаючими потребами.

На рис. 3 наведено узагальнену архітектуру програмного середовища для математичного моделювання процесів у біогазових установках, яка включає наступні підсистеми:

- підсистема моделювання процесів у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних, яка включає підсистему інтервального моделювання (модуль обробки даних, модуль процесів моделювання, модуль аналізу результатів) та користувацьку підсистему (модуль інтерфейсу користувача, модуль управління сервісами);

– підсистема управління процесом виробництва біогазу (модулі управління конфігурацією, модулі регулювання та контролю, модулі моніторингу та діагностики, модулі оптимізації та планування).

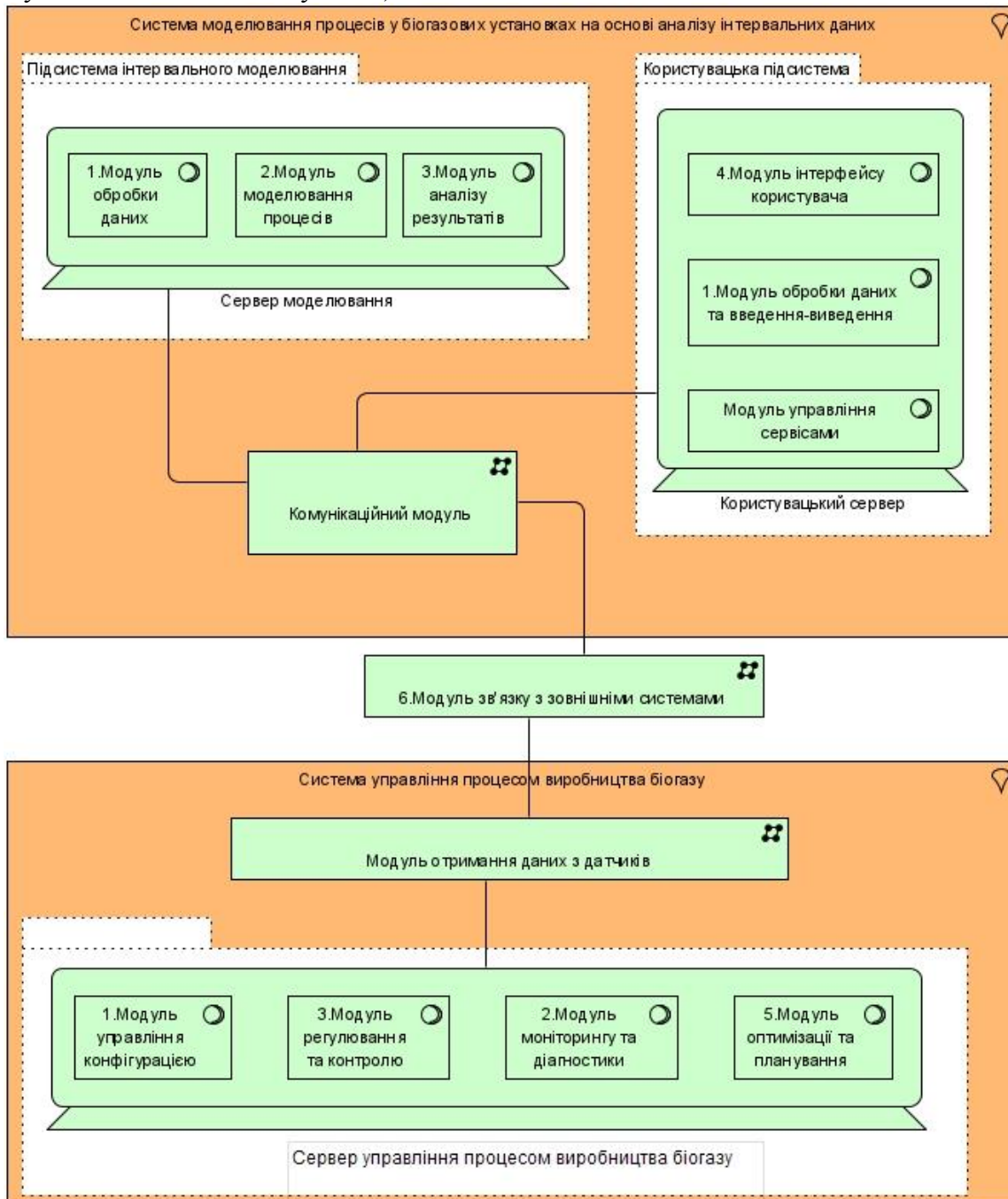


Рис. 3. Узагальнена архітектура програмного середовища для математичного моделювання процесів у біогазових установках

Основними користувачами системи є (діаграма варіантів використання, яка наведена на рис. 4):

- системний аналітик, який аналізує вимоги щодо моделювання процесів у біогазових установках, визначає потреби в нових функціях та можливостях системи моделювання, створює або оновлює моделі процесів на основі вимог користувачів та внутрішніх стандартів виробництва біогазу;
- диспетчер, який здійснює моніторинг роботи системи, контролює поточний стан процесів та їх ефективність, відстежує відхилення від стандартів та інструкцій та відповідно вживає заходів для їх виправлення, а також реалізовує взаємодію з іншими

користувачами щодо надання рекомендацій для внесення змін у моделі та параметри системи;

– системний адміністратор, який відповідає за конфігурацію та налаштування системи моделювання процесів у біогазових установках, забезпечує безперебійну роботу серверів та інфраструктури системи, відстежує зміни в додатках та відповідає за оновлення програмного забезпечення, надає підтримку користувачам у вирішенні технічних проблем та супроводі нових функцій системи.

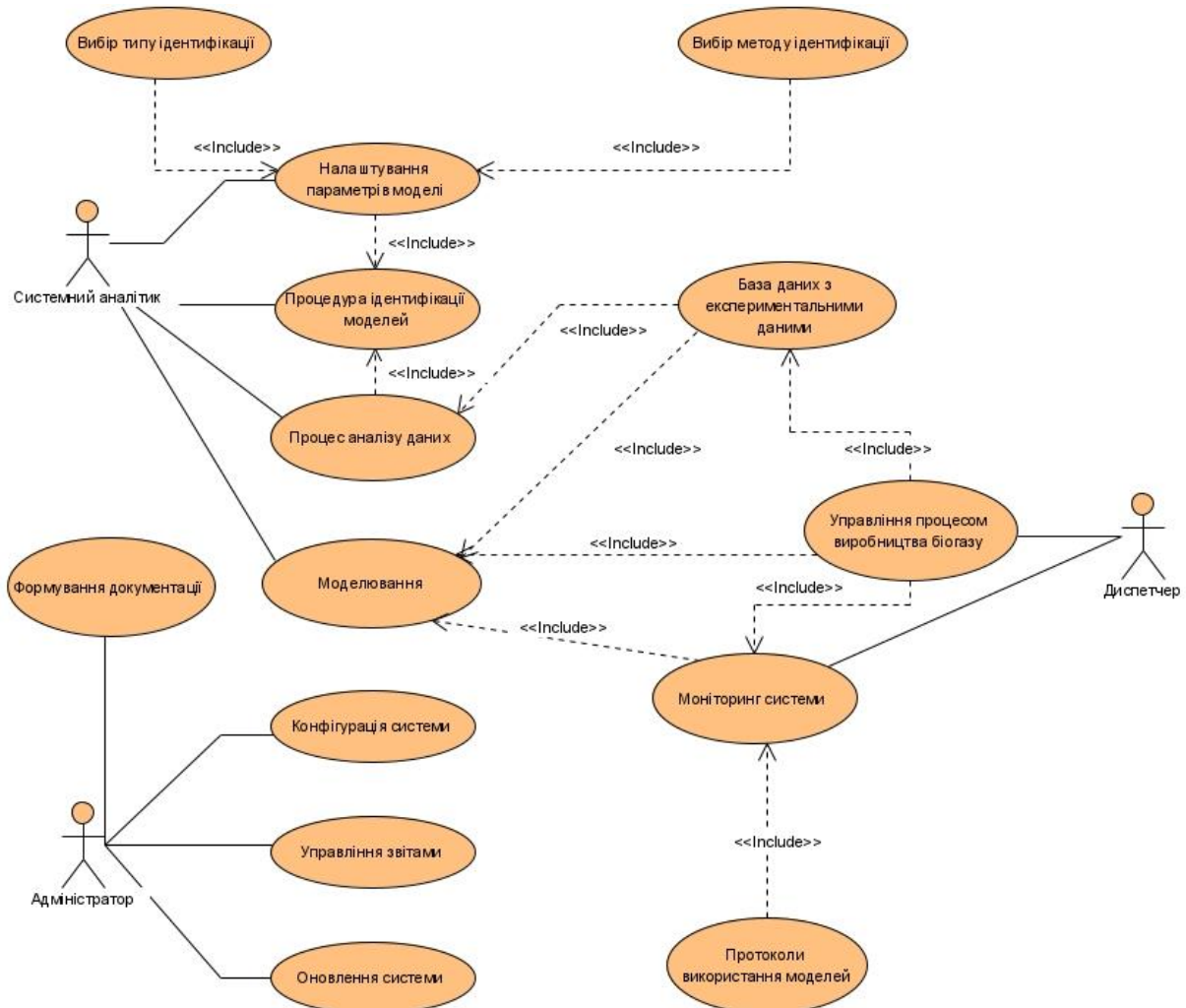


Рис. 4. Діаграма варіантів використання системи для математичного моделювання процесів у біогазових установках

Діаграма варіантів використання показує взаємодію користувачів з системою та функціональні можливості, які вони можуть використовувати для досягнення своїх цілей у контексті моделювання процесів у біогазових установках.

Програмний комплекс для моделювання процесів у біогазових установках розроблений з використанням технології Spring framework на мові програмування Java, а також інтерпретатором Python. В якості Python інтерпретатора було обрано Jython. В якості СУБД використовується MySQL версії 5.7. На рис. 5 наведено діаграму послідовності побудови інтервальної моделі опису процесів у біогазових установках.

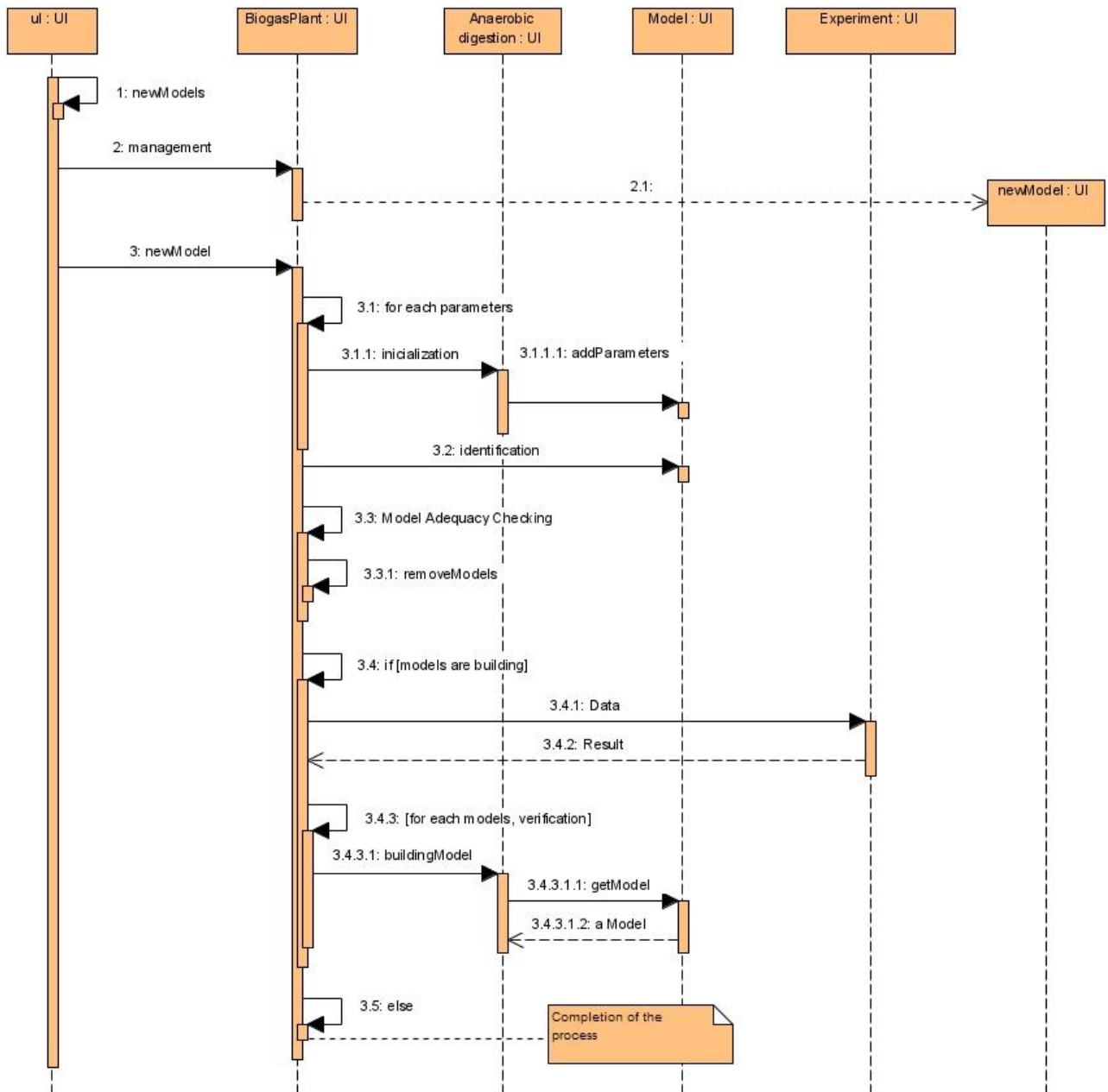


Рис. 5. Діаграма послідовності побудови інтервальної моделі

Програмну інтерпретацію отриманої інтервальної моделі можна використовувати для прогнозування та аналізу різних сценаріїв розвитку подій у біогазовій установці.

Експериментальні дослідження

Здійснено апробацію розроблених методів, моделей та програмного комплексу на наявних біогазових установках, зокрема, на базі ТОВ «Геофіпольська енергетична компанія».

Програмне забезпечення для реалізації математичних моделей динаміки процесів у БГУ використано, зокрема «динаміки концентрацій ацетату на стадії ацидогенезу», «динаміки відсотку малої субодиниці рНК кислотоутворюючих бактерій на стадії ацетогенезу», «динаміки відсотку малої субодиниці рНК метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу». Ефективність запропонованих алгоритмів підтверджено результатами обчислювальних експериментів.

На рис. 6 та 7 наведені головні форми роботи системи при симуляції функціонування біогазової установки. Для цього використано інтеграцію з SIMBA#biogas - Version 5.0 - Biogas Plant Simulation Software [13 – 15].

Рис. 6. Реалізація підсистеми управління процесом виробництва біогазу з можливістю імплементації в систему симуляції роботи біогазових установок SIMBA#biogas

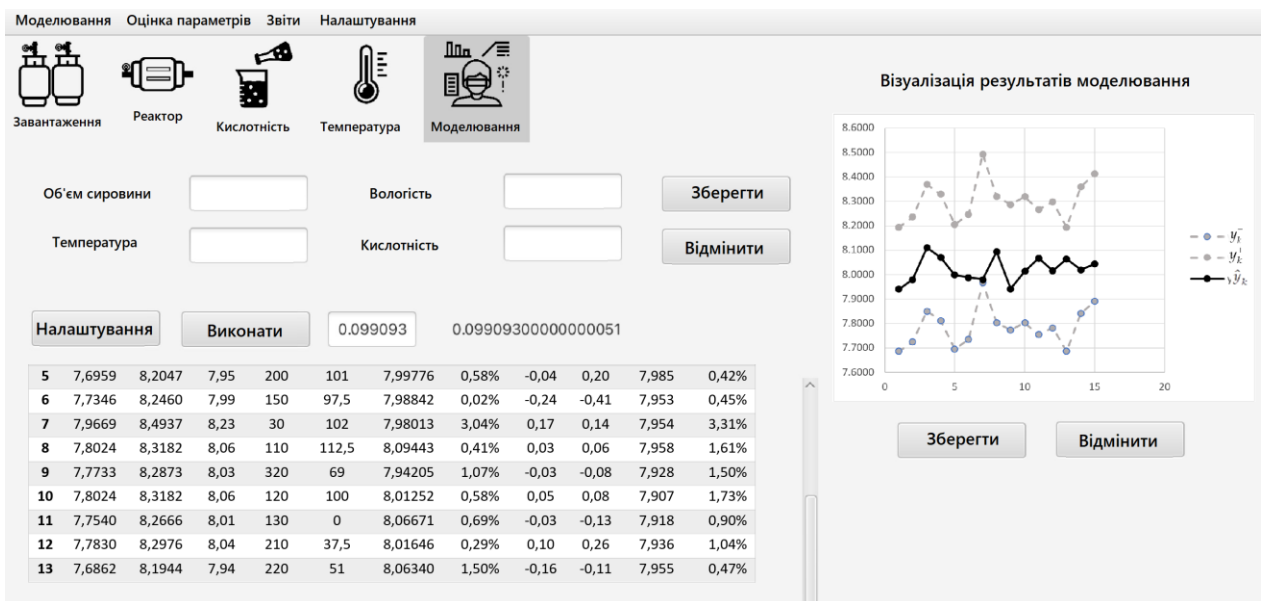


Рис. 7. Реалізація системи моделювання процесів у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних

Аналіз результатів модельних розрахунків показує особливості врахування динаміки показника кислотності субстрату у біореакторі та дозволяє підтвердити ефективність використання методів аналізу інтервальних даних та відповідного розробленого програмного забезпечення.

Висновки

Виробництво біогазу способом переробки органічних відходів життєдіяльності людини та відходів тваринництва і агропромислового комплексу є одним із пріоритетних напрямків розвитку альтернативної (зеленої) енергетики. Разом з тим, підвищення ефективності функціонування цього виробництва вимагає розробки нових підходів управління процесами в біогазових установках на основі застосування інформаційних технологій та методів математичного моделювання.

В рамках цієї роботи запропоновано архітектуру програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках. Створено програмне середовище для математичного моделювання процесів у біогазових установках, яке, на відміну від наявних, ґрунтується на програмній інтерпретації інтервальних дискретних моделей та відкритій сервісно-орієнтованій архітектурі, що забезпечує його інтеграцію в наявні системи управління біогазовими установками та дозволяє в реальному часі управляти біохімічними процесами і тим самим підвищити ефективність функціонування БГУ. Середовище розроблено з використанням об'єктно-орієнтованого підходу на базі Spring Framework, мови програмування Java, інтерпретатора Python.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Біогазова установка для утилізації гною на свинокомплексі / В. Іванов, А. Онищенко, Л. Засуха [та ін.] // Наука і техніка сьогодні. – 2022. – № 11 (11). – С. 298 – 306.
2. Мельник А. М. Архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу / А. М. Мельник // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 265 – 273.
3. Integration of Artificial Intelligence into Biogas Plant Operation / S. Cinar, S. O. Cinar, N. Wiczorek [et al.] // Processes. – 2021. – № 9 (85). – P. 1 – 18.
4. Deng L. Biogas Technology / L. Deng, Y. Liu, W. Wang. – Springer : Singapore, 2020. – P. 109 – 156.
5. Гаценко К. В. Технологія отримання біогазу на основі харчових відходів / К. В. Гаценко, М. Д. Волошин // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2019. – Вип. 1. – С. 131 – 136.
6. Exploring Anaerobic Digestion from Mesophilic to Thermophilic Temperatures—Operational and Microbial Aspects / B. Steiniger, S. Hupfaut, H. Insam [et al.] // Fermentation. – 2023. – № 9 (798). – P. 1 – 19.
7. Biogas plant modelling for flexibility provision in the power system of Bornholm island / J. M. Zepter, T. Gabderakhmanova, K. M. Andreasen [et al.] // In Proceedings of the 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1 – 4 September 2020. – Turin, Italy. – P. 1 – 6.
8. Empirical Validation of a Biogas Plant Simulation Model and Analysis of Biogas Upgrading Potentials / J. M. Zepter, J. Engelhardt, T. Gabderakhmanova [et al.] // Energies. – 2021. – № 14 (2424). – P. 1 – 19.
9. Biogas Plants in Renewable Energy Systems – A Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production / M. Heiker, M. Kraume, A. Mertins [et al.] // Appl. Sci. – 2021. – № 11 (3361). – P. 1 – 27.
10. Дивак М. П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу / М. П. Дивак, І. В. Гураль // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 2. – С. 152 – 158.
11. Дивак М. П. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках / М. П. Дивак, І. В. Гураль // Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. пр. – К. : МННЦ ІТС НАН та МОН України. – 2014. – Вип. 6. – С. 55 – 68.
12. Hemlata K. Mathematical modelling of a pilot scale biogas plant / K. Hemlata, B. Aayush, S. Amartya // Materials Today : Proceedings. – 2023. – P. 1 – 3.
13. Karlsson J. Modeling and simulation of existing biogas plants with SIMBA#Biogas: Dissertation degree of Master in Bioenergy / Karlsson Jonas. – Linköping University, 2017. – P. 45.
14. Biogas Produced by Anaerobic Digestion Process and Biodiesel from Date Seeds / A. M. Alrefai, R. Alrefai, K. Y. Benyounis [et al.] // Energies. – 2021. – № 14. – P. 1 – 41.
15. Coupled Biogas and Fiber Production from Agricultural Residues and Energy Crops with Steam Explosion Treatment / B. Hülsemann, M. Baumgart, L. Lenz [et al.] // Appl. Biosci. – 2023. – № 2. – P. 278 – 291.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2024.

Стаття пройшла рецензування 24.02.2024.

Манжула Володимир Іванович – канд. тех. наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук, e-mail: volodymyr.manzhula@gmail.com.

Забчук Вадим Володимирович – аспірант кафедри комп'ютерних наук, e-mail: vadzab5@gmail.com.

Західноукраїнський національний університет.