

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ
МОНІТОРИНГУ, ЗБИРАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ БІОМАСИ ДЛЯ
ОТРИМАННЯ БІОМЕТАНУ І ВИСОКОЯКІСНИХ ДОБРИВ**

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua

В. М. Поліщук, доктор технічних наук, доцент

E-mail: polischuk@gmail.com

Н. А. Пасічник, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

E-mail: N.Pasichnyk@nubip.edu.ua

І. Т. Цигульов, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: cygulev@ukr.net

Т. С. Давиденко, Є. А. Дворник, аспіранти

E-mail: davidenkotaras009@gmail.com

С. А. Волочай, студент магістратури

E-mail: apodokskee@gmail.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. Розглядаються методологічні питання та підхід щодо побудови й організації функціонування інтелектуальної системи керування процесами моніторингу, збирання та переробки біомаси в біогазових установках. За допомогою запропонованої системи вирішуються такі задачі: моніторинг біомаси на основі застосування космічних та безпілотних літальних апаратів, планування збиральних робіт та синтез маршрутів руху безпілотних комбайнів, управління режимами переробки біомаси в біогазових комплексах. За допомогою датчиків космічних апаратів та спеціального програмного забезпечення визначаються обсяги біомаси для прогнозування рівня завантаження рослинною сировиною біогазових установок. Крім того, на цьому етапі визначаються прогнозовані економічні показники збиральної кампанії та отриманий прибуток агрофірми від продажу біометану та високоякісних добрив. На другому етапі перед початком збирання біомаси за допомогою датчиків безпілотних літальних апаратів та спеціального програмного забезпечення здійснюється уточнення обсягів та щільності біомаси на кожній ділянці поля, а також координати пасивних (стаціонарних перешикод) з метою синтезу компромісно-оптимальних траєкторій руху та швидкості пересування безпілотних збиральних комбайнів. На третьому

етані забезпечується пелетування біомаси для її подальшого зберігання та перетворення в біометан.

Ключові слова: *біомаса, біогазові установки, органічна сировина, біометан, інтелектуальна система керування*

Актуальність. У зв'язку з постійним зростанням вартості природного газу, виснаженням його запасів та погіршенням екологічної ситуації у світі спостерігається підвищений інтерес до альтернативних джерел енергії. Одним із таких джерел є біогаз – паливний газ, отриманий в результаті анаеробної ферментації органічної сировини. Цей процес здійснюється у спеціальних резервуарах – метантенках біогазових установок (БГУ). Як сировину, як правило, використовують відходи тваринництва та птахівництва. Для підвищення виробництва біогазу на заході застосовують в БГУ біомасу. Повна автоматизація всіх процесів моніторингу та збирання біомаси для біогазових установок із застосуванням космічних апаратів (КА), безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних комбайнів (БК) входить до стратегії розвитку сучасних агропромислових і машинобудівних компаній світу. Це дає можливість на видаленому доступі моніторити стан та обсяги біомаси, керувати дронами, безпілотними комбайнами, що призначені для виконання широкого кола робіт, пов'язаних з пошуком (знаходженням), збором, завантаженням, перевезенням та переробкою біомаси для біогазових установок.

Біогаз в основному складається з метану і вуглекислого газу. Після відокремлення вуглекислого газу та інших домішок отриманий біометан може вводитися до газотранспортної системи. Таким чином, з метою заміщення природного газу виникає необхідність збільшення обсягів видобутку біометану за рахунок використання біомаси та заведення його до української газотранспортної системи.

Для ефективного управління процесом виробництва біометану з біомаси потрібно володіти великим обсягом різноманітної інформації про структуру посівних площ, стан сільськогосподарських угідь, рослинності та ґрунтів, а також очікувану біомасу, що залишається після збирання врожаю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основна увага в статті [1] приділяється порівнянню супутникових зображень з аерофотознімками сільськогосподарських земель. У роботі наведена оцінка ефективності застосування алгоритмів SIFT, SURF для формування зображень сільськогосподарських угідь.

У роботі [2] показано, що БПЛА, обладнаний комерційною камерою (видимий спектр), ефективно можна використовувати для отримання зображень з високою роздільною здатністю пшеничного поля на початку сезону. При цьому видимі спектральні індекси, отримані із зображень з використанням недорогих камер на борту БПЛА, які літають на малих висотах, є інструментом, що дозволяє розрізняти рослинність на полях на початку сезону.

Однак, в існуючих роботах не досить повно розглянуті питання розробки системи керування БК з урахуванням інформації, отриманої від КА та БПЛА про обсяги та щільність врожаю на кожній ділянці поля з метою розрахунку необхідної швидкості руху БК та з урахуванням основних факторів, що впливають на процес збирання врожаю. До відомих методів навігації БК можна віднести: методи сімейства BUG [3], що використовують для отримання навігаційної інформації тактильні датчики, а також методи сімейства VisBUG [4] з обробкою навігаційної інформації від ультразвукових датчиків. У роботі [5] представлено критичний аналіз методів сегментації рослин з 2008 до 2015 рік для визначення кольорового індексу зображень для оцінки об'єму врожаю.

При цьому для підвищення ефективності планування та збирання біомаси виникає проблема комплексного застосування навігаційної апаратури БК з інформаційними каналами КА та БПЛА. Крім того, нині не в повному обсязі вирішена проблема підготовки та зберігання біомаси для БГУ.

Мета дослідження – обґрунтування функціональної структури та критеріїв ефективності інтелектуальної системи керування процесами моніторингу, збирання та перетворення біомаси в біометан і добрива.

Матеріали і методи дослідження. Основою інтелектуальної системи керування є база знань, тому що всі алгоритми функціонування системи

ґрунтуються на її знаннях. Згідно з принципами побудови баз знань інтелектуальних систем обґрунтуємо її структуру.

За допомогою запропонованої системи вирішуються такі задачі: моніторинг біомаси на основі застосування КА (етап 1), планування збиральних робіт та синтез маршрутів руху безпілотних комбайнів (етап 2), управління режимами переробки біомаси в біогазових комплексах (етап 3).

Призначенням бази знань є зберігання сукупності одиниць знань, що представляють собою формалізоване відображення об'єктів (технічних засобів), їх взаємозв'язків і дій над ними, а також знань про процес вирішення задач за допомогою ІСК.

Для врахування характеру поставлених задач функціональна структура ІСК засновується на методах, алгоритмах та процедурах трьох рівнів (рисунок).

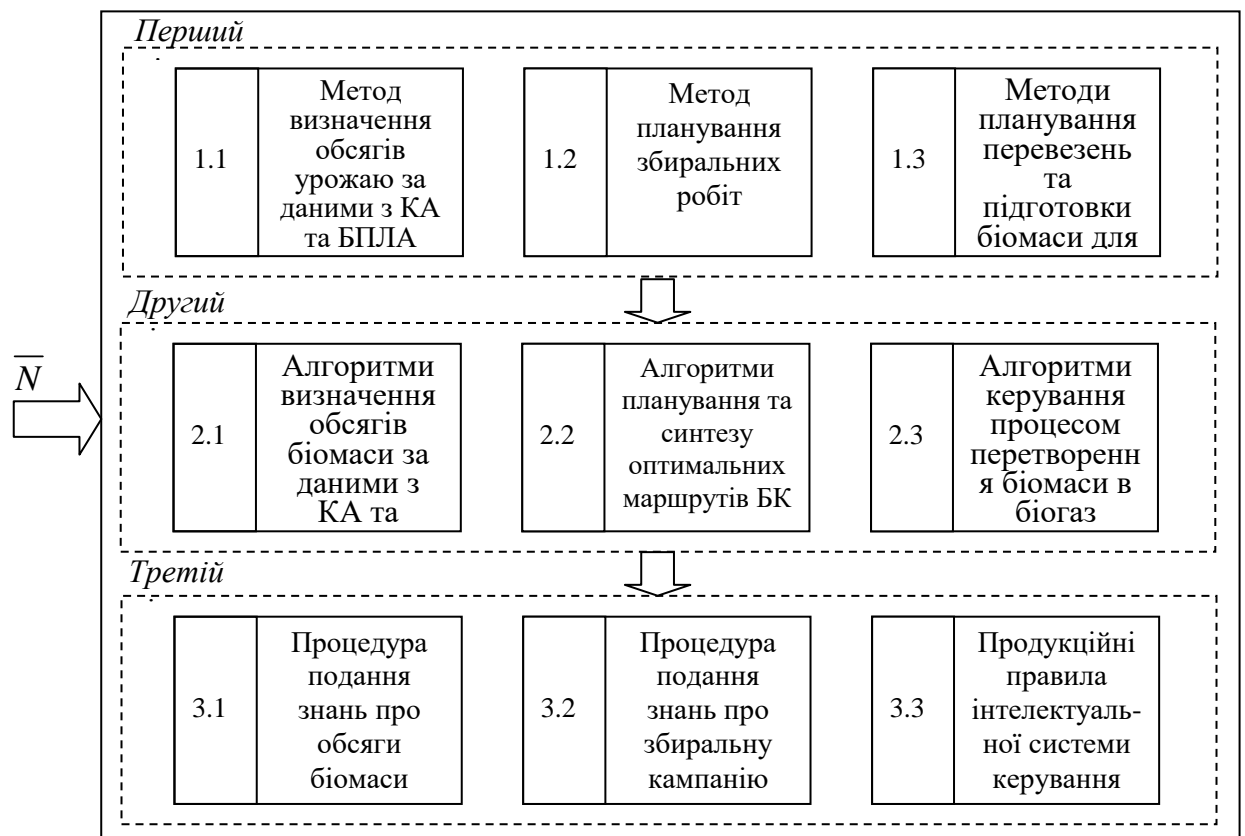


Рис. Методи, алгоритми та процедури ІСК

Перший рівень призначено для отримання даних у процесі моніторингу, збору, перевезення та пелетування біомаси для її зберігання та застосування в БГУ.

Другий рівень містить алгоритми визначення обсягів біомаси, планування та синтезу оптимальних маршрутів БК, а також алгоритмів керування процесом перетворення біомаси в біогаз.

Третій рівень містить дані про процедури вирішення завдань подання знань про обсяги врожаю, про збиральну кампанію та продукційні правила керування процесами моніторингу, збирання та переробки біомаси для отримання біометану і добрив у зимовий період у мезофільному режимі, а влітку – в термофільному режимі роботи БГУ.

Застосування методу та алгоритмів визначення обсягів біомаси з КА та БПЛА, що базуються на статистичній обробці спектральних характеристик цифрових знімків кожної ділянки місцевості та на використанні апарату нейронних мереж, забезпечує визначення обсягів та щільності біомаси на шляху руху безпілотних комбайнів. На основі реалізації процедури подання знань про обсяги біомаси (блок 3.1) забезпечується оперативне прийняття рішення для розподілу та керування збиральною та автотранспортною технікою.

Продукційні правила ІСК блоку 3.3 є основою для здійснення контролю і керування процесами моніторингу, збирально-транспортних робіт та режимами роботи БГУ. Ці правила дозволяють формувати управлінські рішення щодо перепланування робіт або здійснення донавчання системи при появі нештатних ситуацій та перешкод на траєкторії польоту БПЛА, шляху руху автотранспортної техніки та збиральних комбайнів, а також у роботі БГУ.

Процедури вирішення задач моніторингу та керування збиральною кампанією і режимами роботи БГУ з блоків 3.1, 3.2, 3.3 ґрунтуються на даних, що визначаються на першому та другому рівні, і призначені для формування управлінських рішень у режимі реального часу.

Для вирішення перерахованих задач ІСК повинна включати програмно-апаратні засоби моніторингу, планування та оперативного управління процесами, що дозволяє відпрацьовувати проекти збирання біомаси, обґрунтовувати рішення щодо розподілу технічних засобів (комбайнів та автомобілів) на полях. Залежно від даних КА та БПЛА, наявності технічних засобів і прогнозованих умов $u^p \in U$ збиральної

кампанії, генерується множина варіантів $\{V\}$ виконання збирально-транспортних робіт, підготовки біомаси для БГУ та отримання біогазу. Серед існуючої множини таких варіантів визначають раціональний $v^p \in V$, який забезпечує отримання агрофірмою максимального прибутку (P) від перетворення зібраної біомаси в біометан та добрива:

$$P(v^p) = W - \tilde{N} \rightarrow \max \quad (1)$$

при $u^p \in U$,

де W – відповідно прогнозований дохід від реалізації біометану та добрив, C – витрати на моніторинг, пелетування, перевезення біомаси та перетворення біомаси в біометан та добрива.

Іншими словами, для визначення очікуваного прибутку слід знати значення очікуваного доходу та затрат, які можна розрахувати лише за умови наявності початкових даних – обсягів зібраної біомаси на основі моніторингу її стану, витрат пального для БК й на перевезення і переробку біомаси та ринкової вартості біометану. Очікуваний обсяг біомаси визначається як сума прогнозованих обсягів зібраної біомаси на окремих ділянках поля.

Результати досліджень та їх обговорення. Запропонована функціональна структура ІСК дозволяє на основі моніторингу обсягів біомаси вирішувати основні задачі керування збиральною кампанією, підготовки та перетворення біомаси в біогаз в умовах складного динамічного середовища, що характеризується постійною невизначеністю та мінливістю багатьох факторів.

Основою успішного функціонування агрофірми з використанням запропонованої ІСК є ухвалення оптимальних управлінських рішень для отримання максимальних прибутків.

У загальному випадку мірою ефективності функціонування ІСК є величина (G), що характеризує ступінь реалізації управлінських рішень в автоматичному режимі з урахуванням їх важливості:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n v_i N_{\delta_i}}{\sum_{i=1}^n v_i N_{o_i}}, \quad (2)$$

де N_{o_i} – необхідна кількість управлінських операцій i -го типу, що повинна виконуватись за допомогою ІСК; N_{δ_i} – кількість управлінських операцій i -го типу, що виконує ІСК; n – кількість типів управлінських операцій; v_i – важливість управлінських операцій i -го типу.

У загальному випадку постановка проблеми побудови ІСК зводиться до такого: необхідно знайти з множини можливих варіантів (Z) такий варіант побудови ІСК (z), при якому забезпечується виконання максимально можливої кількості управлінських операцій з мінімальними фінансовими і часовими (C) витратами.

Формальна постановка наукової проблеми може бути представлена у вигляді рішення такої задачі:

$$G \rightarrow \max_{z \in Z}, C \rightarrow \min_{z \in Z}. \quad (3)$$

Як видно з (3), всі критерії мають суперечливий характер і знайти оптимальний варіант побудови ІСК, що задовольняє всім зазначеним вище умовам – складно. Без розробки теоретико-концептуальних основ побудови таких систем, що включають створення методів оптимізації структури і параметрів ІСК – вирішення зазначеної проблеми неможливе.

У загальному випадку [6] ІСК визначається як об'єднана єдиним інформаційним процесом система, що формує на основі відомостей і знань при наявності мотивації (цілі) рішення про дію і реалізує його раціональним способом. Формально ІКС описується наступною шістькою:

$$T \times X \times S \xrightarrow{a_1} M \times T \quad (4)$$

$$T \times M \times S \xrightarrow{a_2} F \times T \quad (5)$$

$$F \times T \times X \times S \xrightarrow{a_3} R \times T \quad (6)$$

$$T \times X = \{\bar{A} \times T\} X \times T + \{\bar{B} \times T\} U \times T \quad (7)$$

$$T \times Y = \{\bar{D} \times T\} X \times T \quad (8)$$

$$T \times R \times Y \xrightarrow{\alpha_4} F \times T, \quad (9)$$

де T та X – множина моментів часу та станів системи; S, M, F, R та Y – множина параметрів навколишнього середовища, мотивації, мети, прогнозованого і реального результату, відповідно; \bar{A}, \bar{B} та \bar{D} – матриці параметрів; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – інтелектуальні оператори перетворення, що використовують знання.

Виходячи із формул 4-6 ефективність функціонування ІСК на множині моментів часу та станів системи в значній мірі залежить від часових затримок, за яких сигнали моніторингу та керування доходять до одержувача. У мережах 5-го покоління вони складатимуть близько 1 мілісекунди, що менше, ніж у мережах 2-го покоління, в 500 разів та значно покращує використання додатків IoT (Internet of Things — Інтернет речей). Застосування IoT додатків з технологією 5G підвищує ефективність моніторингу біомаси, керування БПЛА, безпілотною збиральною і автомобільною технікою та режимами роботи БГУ. По-перше, безліч масових додатків IoT передбачають високу ємність мережі та оперативне підключення додатків для забезпечення можливості під'єднання необхідної кількості пристроїв – бездротових сенсорних мереж розумного сільського господарства. По-друге, програми додатків IoT матимуть високі вимоги до надійності, доступності та надзвичайно низької затримки з'єднання.

Як показує практика [6], неоптимальне планування польових робіт призводить до накладання маршрутів руху збиральної техніки, затримок в її роботі і, як наслідок, надмірних витрат пального. Практичне застосування елементів зазначеної ІСК в ТДВ «Терезине» та в ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» дозволило знизити довжину маршрутів руху збиральної техніки та загальні витрати на проведення збиральної кампанії на 12-15 % за рахунок оперативного визначення обсягів біомаси, планування збиральних робіт та реалізації компромісно-оптимальних маршрутів руху збиральної техніки. Виходячи з цього, прибуток підприємств при застосуванні елементів зазначеної ІСК збільшився більш ніж на 12 %. Крім того, як показують результати практичного застосування ІСК, значно

скорочуються часові витрати на прийняття обґрунтованих рішень за рахунок обробки системою великих об'ємів інформації.

Висновки і перспективи.

1. Обґрунтовано функціональну структуру інтелектуальної системи керування, до якої ввійшли три рівня функціональних задач. Для вирішення цих задач визначені алгоритми, які ґрунтуються на класичних методах оптимізації та моделювання систем і методах штучного інтелекту, що забезпечує ефективне вирішення задач планування, контролю й оперативного керування процесами моніторингу, збирання, підготовки та перетворення біомаси в біометан.

2. Запропоновано критерії ефективності інтелектуальної системи керування процесами. Практичне застосування елементів зазначеної ІСК в ТДВ «Терезине» та в ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція» дозволило збільшити прибуток підприємств більш ніж на 12 % та скоротити часові витрати на прийняття обґрунтованих рішень за рахунок обробки системою великих об'ємів інформації.

Список використаних джерел

1. Saleem, S., Bais, A., Sablatnig, R. Towards feature points based image matching between satellite imagery and aerial photographs of agriculture land. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. 126, pp.12–20.
2. Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., Pena, J.M.. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015. 114, pp. 43–52.
3. Lumelsky, V. *Sensing, intelligence motion*. Wiley-Interscience, 2006. 456 p.
4. Siegwart, R. *Introduction to Autonomous Mobile Robots* Press, 2004. 336 p.
5. Hamuda, E., Glavin, M., Jones, E. A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016. 125, pp. 184–199.
6. [Mezhuyev, V.](#), [Gunchenko, Y.](#), [Shvorov, S.](#), [Chyrchenko, D.](#) A method for planning the routes of harvesting equipment using unmanned aerial vehicles. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2020. 26(1), pp. 121-132.

References

1. Saleem, S., Bais, A., Sablatnig, R. (2016). Towards feature points based image matching between satellite imagery and aerial photographs of agriculture land. *Computers and Electronics in Agriculture*, 126, 12–20.

2. Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., Pena, J.M.. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 43–52.
3. Lumelsky, V. (2006). *Sensing, intelligence motion*. Wiley-Interscience, 456.
4. Siegwart, R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots* Press, 336.
5. Hamuda, E., Glavin, M., Jones, E. (2016). A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 184–199.
6. [Mezhuyev, V.](#), [Gunchenko, Y.](#), [Shvorov, S.](#), [Chyrchenko, D.](#) (2020). A method for planning the routes of harvesting equipment using unmanned aerial vehicles. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 26(1), 121-132.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ МОНИТОРИНГА, СБОРА И ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОМЕТАНА И ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ УДОБРЕНИЙ

***С. А. Шворов, В. Н. Полищук, Н. А. Пасичник, И. Т. Цигулев, Т. С.
Давиденко, Е. А. Дворник, С. А. Волочай***

Аннотация. *В статье рассматриваются методологические вопросы и подход к построению и организации функционирования интеллектуальной системы управления процессами мониторинга, сбора и переработки биомассы в биогазовых установках. С помощью предложенной системы решаются следующие задачи: мониторинг биомассы на основе применения космических и беспилотных летательных аппаратов, планирование уборочных работ и синтез маршрутов движения беспилотных комбайнов, управление режимами переработки биомассы в биогазовых комплексах. С помощью датчиков космических аппаратов и специального программного обеспечения определяются объемы биомассы для прогнозирования уровня загрузки растительным сырьем биогазовых установок. Кроме того, на этом этапе определяются прогнозируемые экономические показатели уборочной кампании и прибыль, которую получит агрофирма от продажи биометана и высококачественных удобрений. На втором этапе перед началом сбора биомассы с помощью датчиков беспилотных летательных аппаратов и специального программного обеспечения осуществляется уточнение объемов и плотности биомассы на каждом участке поля, а также координаты пассивных (стационарных помех) с целью синтеза компромиссно-оптимальных траекторий движения и скорости передвижения беспилотных уборочных комбайнов. На третьем этапе обеспечивается пеллетирование биомассы для дальнейшего хранения и преобразования в биометан.*

Ключевые слова: *биомасса, биогазовые установки, органическое сырье, биометан, интеллектуальная система управления*

**INTELLIGENT PROCESS CONTROL SYSTEM FOR MONITORING,
COLLECTION AND PROCESSING OF BIOMASS FOR PRODUCTION OF
BIOMETHANE AND HIGH-QUALITY FERTILIZERS**

*S. Shvorov, V. Polishchuk, N. Pasichnyk, I. Tsigulov, T. Davidenko, Ye. Dvornyk,
S. Volochay*

Abstract. *The article discusses methodological issues and an approach to the construction and organization of the functioning of an intelligent control system for monitoring processes, collection and processing of biomass in biogas plants. Using the proposed system, the following tasks are solved: monitoring of biomass based on the use of space and unmanned aerial vehicles, planning harvesting operations and synthesis of routes for unmanned harvesters, managing biomass processing modes in biogas complexes. With the help of spacecraft sensors and special software, biomass volumes are determined to predict the level of loading of biogas plants with plant raw materials. In addition, at this stage, the projected economic indicators of the harvesting campaign and the profit that the agricultural company will receive from the sale of biomethane and high-quality fertilizers are determined. At the second stage, before the start of the collection of biomass, using the sensors of unmanned aerial vehicles and special software, the volumes and density of biomass in each section of the field are specified, as well as the coordinates of passive (stationary interference) in order to synthesize compromise-optimal trajectories and the speed of movement of unmanned harvesters. At the third stage, biomass is pelleted for further storage and conversion into biomethane.*

Key words: *biomass, biogas plants, organic raw materials, biomethane, intelligent control system*