

УДК 681.513

© Броварець О.О., к.т.н.

Київський кооперативний інститут бізнесу і права

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛЕЖНО ВІД ПАРАМЕТРІВ ТА ТИПУ ПІДВІСКИ Ї РОБОЧИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Побудована математична модель для визначення оптимальних робочих параметрів та режимів функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від механіко-конструктивних параметрів та типу підвіски її робочих електродів. Дана модель дає можливість оптимізувати робочі параметри та режими функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від механіко-конструктивних параметрів та типу підвіски її робочих електродів, а відповідно і забезпечення максимальної продуктивності таких систем при отриманні достовірних даних із врахуванням агробіологічного стану ґрунтового середовища.

РОБОЧІ ЕЛЕКТРОДИ, ЯКІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ, ВАРІАБЕЛЬНІСТЬ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА, ТЕХНІЧНА СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ, АГРОБІОЛОГІЧНИЙ СТАН, МОНІТОРИНГ.

Постановка проблеми. Сучасні інформаційно-технічні системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь дають можливість забезпечити належну якість керування виконанням технологічних операцій з використанням сучасних мехатронних та робототехнічних систем керування, пов'язаних з датчиками контролю якості виконання технологічних операцій, які у сучасному контексті їх розвитку отримали назву «розумних» або «смарт» машин (Smart machinery) [1-3].

Такі «розумні» машини з датчиками оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь можуть широко використовуватися на всіх стадіях виробництва сільськогосподарської продукції рослинництва: основного

обробітку, сівби (садіння), на етапі догляду за посівами у період вегетації та при збиранні врожаю. Це дає можливість забезпечити належну якість виконання технологічних операцій при оптимізації витрат на їх виробництво. «Розумні» машини «адаптуються» до агробіологічного стану ґрунтового середовища на основі інформації з датчиків про агробіологічний стан ґрунтового середовища.

Огляд сучасних літературних джерел та наукових розробок [1] показує, що останніми роками відбувається процес інтеграції натурального (органічного, або біологічного), біодинамічного, екстенсивного, інтенсивного (промислового) та no-till землеробства з новітніми технологіями, зокрема з інформаційно-технічними системами локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь. При цьому останній напрям є найбільш актуальним та перспективним для умов України.

Важливою задачею оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь є так званий «management units» - територіальних одиниць з подібними параметрами просторової неоднорідності, де повинні використовуватися однотипні технології обробітку сільськогосподарських культур. Ці технології є основою роботи системи прийняття рішень «decision-making systems», яка дозволяє прийняти ефективні оперативні рішення на основі оперативних даних про агробіологічний стан ґрунтового середовища.

Неоднорідність ґрунту можна представити як ієрархічну підпорядкованість явищ. Питання про шкалу вимірювання неоднорідності. Звичайно, неоднорідність порівняно просто вираховується, коли порівнюються об'єкти вимірюються кількісно і при цьому використовуються кількісні критерії. Неоднорідність вважають фактором, відповідальним за біорізноманіття, тому що завдяки їй формується екологічна складова і забезпечується багатогранність організмів ґрунту [2]. У цьому аспекті важливу роль відіграє визначення ґрунтової електричної провідності для визначення величини прибутку на основі даних просторової мінливості та вмісту поживних речовин у ґрунті. Знання певної структура варіабельності ґрунтового покриття дозволяє прийняти ефективні рішення для управління агробіологічним потенціалом сільськогосподарських угідь [1].

Втілення сучасних технологій землеробства дозволяє планувати витрати насінневого матеріалу, добрив, пестицидів та інших технологічних матеріалів, у тому числі палива, визначати загальну стратегію управління агробіологічним потенціалом поля тощо. Проте, на сьогодні при реалізації даних технологій бракує

ефективних систем збору та реєстрації (моніторингу) місцевизначеної інформації (агробіологічної та фітосанітарної) про стан сільськогосподарських угідь у технологіях точного землеробства. Існуючі способи і засоби реалізації цього процесу недосконалі [2, 3, 4].

У цьому сенсі набуває актуальності розробка та використання принципово нового класу сільськогосподарських машин – інформаційно-технічних систем локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь.

Слід відмітити, що важливість та доцільність використання інформаційно-технічних систем локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежить від виду технологічної операції, площі обробітку. Так доцільність використання зазначених машинно-тракторних агрегатів особливо висока на етапі сівби (садіння), оскільки дана технологічна операція фактично є «фундаментом» майбутнього врожаю [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що традиційні фактори підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва за рахунок оптимізації механіко-конструктивних матеріалів, використання новітніх машинобудівних матеріалів (надміцного пластику, сплавів металу тощо) на сучасному етапі розвитку техніки, не дають суттєвого підвищення ефективності.

Крупні агрохолдинги зробили ставку на використання стандартних рішень задач планування на основі використання так званих «коробочних продуктів» (1С, Парус, Oracle EBS та ін.) [5]. Але, на жаль, типові рішення не забезпечують реалізації принципу взаємозв'язку перспективного, поточного і оперативного планування та ефективного керування агробіологічним потенціалом сільськогосподарських угідь.

За межами типової системи інформаційного забезпечення процесів планування залишаються задачі, пов'язані з вибором оптимальних рішень, оцінки альтернативних варіантів розвитку і т. д.

У більшості сільськогосподарських підприємств, що використовують для автоматизації функцій планування системи операційного управління (розроблених на основі як типових, так і індивідуальних проектів) не можуть уникнути головного недоліку даного типу інформаційних систем: зміщення акцентів у бік поточного планування [4].

Така ситуація виникає через об'єктивні причини, пов'язані з використанням обчислювальних процесів у контексті опису поточного розвитку системи в рамках одного виробничого циклу [1]. При такому підході практично відсутнє середовище автоматизації процесів довгострокового і середньострокового планування, а методика планування, що реалізовується, не дозволяє інтегрувати в інформаційну систему методи ефективного коректування відхилень з метою виходу на плановий рівень, що базуються на використанні оптимізаційних математичних моделей.

Одним з перспективних напрямів є забезпечення необхідної якості виконання технологічних процесів за рахунок одержання більш високого (у порівнянні з фізіологічними можливостями людини) рівня інформації та оперативного керування робочими процесами машин і на основі цього перехід до нових прогресивних технологій з використанням «розумних» сільськогосподарських машин. Тому виникає необхідність у розробці та використанні принципово нового класу сільськогосподарських машин підтримки виробництва продукції рослинництва - інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь.

Очевидно, що за таких умов виникає необхідність у принципово нових підходах до ведення агропромислового виробництва, що полягає у забезпеченні належної якості виконання технологічних операцій. Якість виконання технологічних операцій є інтегральним показником ефективності виробництва сільськогосподарської продукції в межах агробіологічного поля. Необхідна якість виконання основних технологічних процесів у рослинництві забезпечується за рахунок інтегрованих інформаційно-технічних систем оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь [13-15].

Структура ґрунту змінюється в значних межах на багатьох сільськогосподарських полях. Фізичні властивості ґрунту, як наприклад ґрунтова структура, мають прямий ефект на водомісткість, ємність катіонного обміну, урожайність тощо. Поживні речовини, що містяться у ґрунтах, використовуються рослиною і їх вміст у ґрунті зменшуються. Загальноприйнятою характеристикою вмісту поживних речовин у ґрунті є вміст азоту, наявність якого у ґрунті значною мірою визначає урожайність. Картографія ґрунтової електричної провідності, широко використовується як ефективний засіб відображення ґрунтової структури і інших ґрунтових властивостей [5].

Швидкий опис мінливості сільськогосподарських угідь – важливий компонент для зональних методів управління [6].

Існує проблема організації спеціальних систем спостережень, контролю і оцінки стану природного середовища (моніторингу) як в місцях інтенсивної антропогенної дії, так і в глобальному масштабі [3]. Важливе місце на сучасному етапі займає реєстрації електромагнітних характеристик ґрунту. Електромагнітні характеристики ґрунту об'єднують багато властивостей ґрунту, що впливають на врожайності сільськогосподарських культур. До них відносяться вміст ґрунтової вологи, гранулометричний склад ґрунту, СКО, засоленість, вміст обмінних катіонів кальцію (Ca) і магнію (Mg) та ін. Електромагнітні характеристики ґрунту не дозволяють безпосередньо виміряти вміст поживних речовин, але показують варіативність важливих характеристик, таких як структура ґрунту і вміст обмінних катіонів. Ця варіативність занадто важлива, щоб її ігнорувати, і повинна враховуватися при відборі проб (рис. 1).

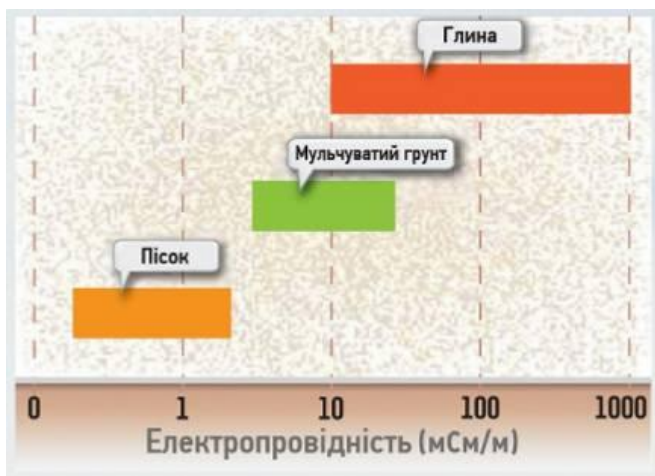


Рис. 1 – Електропровідність різних типів ґрунтів

Очевидно, що для правильної організації управління якістю навколишнього природного середовища абсолютно необхідною умовою є організація системи ефективного моніторингу. Для оцінки стану навколишнього середовища важлива об'єктивна оперативна інформація про критичні чинники антропогенної дії, про фактичний стан біосфери і прогнози її майбутнього стану.

Відомий аналог (<http://www.veristech.com>), основним робочим органом якого є система електродів, в якості яких використано плоскі диски з горизонтальною віссю обертання на стояку, який жорстко закріплений до рами вимірювального пристрою таким чином, що опорні колеса пристрою визначають глибину ходу дисків-електродів у ґрунті.

Недоліком аналога є значна похибка при визначенні, яка обумовлена тим, що під час виконання робочого процесу порушується стабільність контакту диска-електрода з ґрунтом, що викликано поперечними відхиленнями вимірювального пристрою відносно прямолінійного напрямку руху обумовлено конструкцією диска. При цьому змінюється площа контакту диска-електрода з ґрунтом, оскільки при поперечних коливаннях плоскі диски-електроди однією стороною можуть взагалі не контактувати із ґрунтом.

При використанні суцільних дисків у якості електродів без підвіски для визначення електропровідних характеристик тиск ґрунту виникає значна похибка, яка обумовлена конструкцією дисків та відсутністю підвіски для стабілізації при зануренні їх у ґрунт.

Метою дослідження є побудова математичної моделі для визначення робочих параметрів та режимів функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від механіко-конструктивних параметрів та типу підвіски її робочих електродів.

Результати дослідження. Пристрій для визначення електропровідних властивостей ґрунтового середовища конструкції використовують: перед виконанням технологічної операції, одночасно з виконанням технологічної операції (сівба, внесення мінеральних добрив тощо); протягом вегетації та після збирання врожаю.

Це відкриває нові перспективи до ведення органічного землеробства з використанням таких «розумних» сільськогосподарських машин.

На рис. 2 зображено принципову схему розміщення інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь.

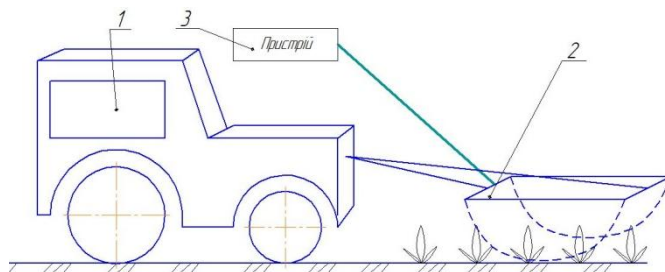


Рис. 2 – Принципова схема розміщення обладнання інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь

Завдання підвищення ефективності моніторингу стану сільськогосподарських угідь досягається шляхом розміщення робочих електродів виконаних попереду рухомого транспортного засобу при виконанні відповідної технологічної операції, що дозволяє проводити безперервний моніторинг на поверхні сільськогосподарських угідь (рис. 2).

Пристрій для моніторингу стану сільськогосподарських угідь складається з транспортного засобу 1, робочих електродів 2, які розміщуються по переду транспортного засобу 1, що виконує відповідну технологічну операцію, та пристрою 3, що здійснює реєстрацію зміни щільності струму на електродних парах.

Пристрій працює наступним чином: при переміщенні транспортного засобу 1 по поверхні поля за допомогою електродних пар виконаних 2, які розміщуються попереду рухомого транспортного засобу здійснюється визначення щільності струму.

Важливим елементом інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь є робочі електроди 2, вибір форми яких залежить від агробіологічного стану сільськогосподарських угідь.

Пристрій для визначення електропровідних властивостей ґрунтового середовища конструкції Олександра Броварця дає можливість оперативно визначити параметри агробіологічного стану ґрунтового середовища, забезпечити «індивідуальний» підхід до кожної елементарної ділянки поля (рис. 2), при цьому за рахунок використання пружної підвіски робочих електродів 2

забезпечується стабілізацію робочих електродів при русі по нерівностям поверхні поля та копіювання нерівностей поверхні поля. Таким чином можна отримати достовірні дані електропровідності ґрунті, які можна використовувати для забезпечення належної якості виконання технологічної операції.

Також, інформаційно-технічна система локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь при розміщенні на машинно-тракторному агрегаті дає можливість забезпечити локально-стрічкове диференційованого внесення технологічного матеріалу (насіння, добрив) за допомогою спеціального пристрою індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення технологічного матеріалу (насіння, добрива), на основі даних отриманих шляхом вимірюванням вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами), які розміщується попереду транспортного засобу на підвісці під час виконання технологічної операції, що дає можливість забезпечити оптимальну норму внесення поживних речовин у ґрунт з використанням даних від такої систем (рис. 3).

Дана задача вирішується шляхом використання машини для локально-стрічкового диференційованого внесення технологічного матеріалу з спеціальним пристроєм індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив та пристроями для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля, на основі даних отриманих шляхом вимірюванням вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами), який розміщуються спереду на транспортному засобі під час виконання технологічної операції. Сигнал від даних інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь потрапляє на контролер, що керує роботою спеціального пристрою індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив, при цьому можливий запис даних у вигляді електронної карти на PC card з магнітним носієм від пристрою для моніторингу стану ґрунту та рослинності (картограма завдання) та реалізація локально-стрічкового диференційованого внесення технологічного матеріалу (насіння, добрив) (картограма реалізація), що дає можливість забезпечити оптимальну норму внесення поживних речовин у ґрунт з використанням даних від двох систем моніторингу (рис. 3).

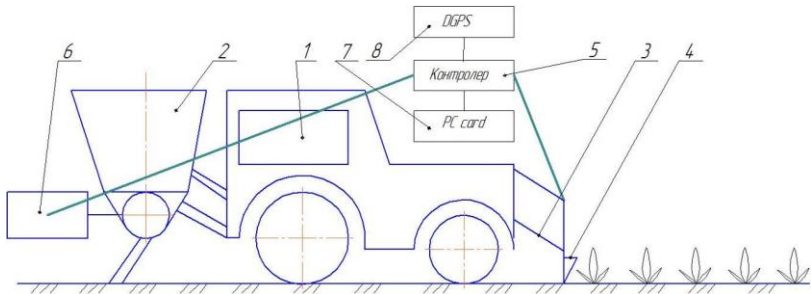


Рис. 3 – Зображено загальний вигляд машини для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив з інформаційно-технічною системою локального оперативного моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля

На рис. 3 зображено загальний вигляд машини для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив з інформаційно-технічною системою локального оперативного моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля.

Пристрій складається з транспортного засобу 1, машини для внесення технологічного матеріалу 2, що розміщується позаду транспортного засобу 1, пристрою для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля - інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь 4, яка розміщена на підвісі 3, і розміщуються спереду на транспортному засобі 1, контролера 5, спеціального пристрою індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення технологічного матеріалу 6, PC card з магнітним носієм 7, приймача сигналів супутникової навігаційної системи DGPS 8.

Пристрій працює наступним чином: при переміщенні транспортного засобу 1 з машиною для внесення технологічного матеріалу (насіння, добрива) 2, що розміщується позаду транспортного засобу 1, інформаційно-технічна система локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь проводить вимірювання вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами) робочими електродами 4, які розміщуються на підвісі 3, і

розміщуються спереду транспортного засобу, що забезпечує проведення оперативного локального моніторингу стану сільськогосподарських угідь. Контролер 5 отримує дані від пристроїв для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля та керує спеціальним пристроєм індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив 6. Дані отримані від пристроїв для моніторингу записуються у вигляді електронної карти на PC card з магнітним носієм 7 з прив'язкою до координат місцезнаходження за допомогою системи DGPS 8. На PC card з магнітним носієм електронної карти 7 можливий запис даних від пристроїв для моніторингу (картограма завдання) та реалізації змінних норм внесення мінеральних добрив (технологічного матеріалу) – електронна карта (картограма реалізація).

Важливим елементом запропонованої інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь є підвіска 3, яка забезпечує стабілізацію робочих електродів 4 та копіювання нерівностей поверхні поля (рис. 3).

Тому наступним важливим етапом є визначення робочих параметрів робочих параметрів та режимів функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від механіко-конструктивних параметрів та типу підвіски її робочих електродів (рис. 4).

Розглянемо зусилля, які діють у стержнях інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища та її динамічну модель для з'ясування оптимальних механіко-конструктивних параметрів системи та динамічних характеристик агробіологічного стану сільськогосподарських угідь.

Задано: точки A, B, C, D, E - точки розміщення елементів підвіски:

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ - конструктивні лінійних розмірів;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - кути розміщення відповідних робочих елементів підвіски;

F_{np1} , F_{np2} – пружні реакції сили пружних елементів підвіски;

F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 - реакції опор у вигляді статичних сил (у рамних елементах конструкції);

Геометричні співвідношення:

$$a_6 \cdot \cos \alpha_1 + a_3 = a_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2 + a_3. \quad (1)$$

Звідси маємо:

$$a_6 \cdot \cos \alpha_1 = a_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2. \quad (2)$$

Тому кут α_1 можна взяти як вільний параметр, а кут α_2 визначити з умови:

$$\cos \alpha_2 = \frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 - a_1}{a_4}; \Leftrightarrow \alpha_2 = \arccos \left(\frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 - a_1}{a_4} \right). \quad (3)$$

$$a_1 + a_2 + a_7 \cdot \cos \alpha_4 + a_3 = a_6 \cdot \cos \alpha_1 + a_3. \quad (4)$$

Звідси маємо:

$$a_1 + a_2 + a_7 \cdot \cos \alpha_4 + a_3 = a_6 \cdot \cos \alpha_1. \quad (5)$$

Тоді для α_4 маємо:

$$\cos \alpha_4 = \frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 - a_1 - a_2}{a_7}; \Leftrightarrow \alpha_4 = \arccos \left(\frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 - a_1 - a_2}{a_7} \right). \quad (6)$$

$$a_6 \cdot \cos \alpha_1 + a_3 = a_1 + a_2 + a_5 \cdot \cos \alpha_3. \quad (7)$$

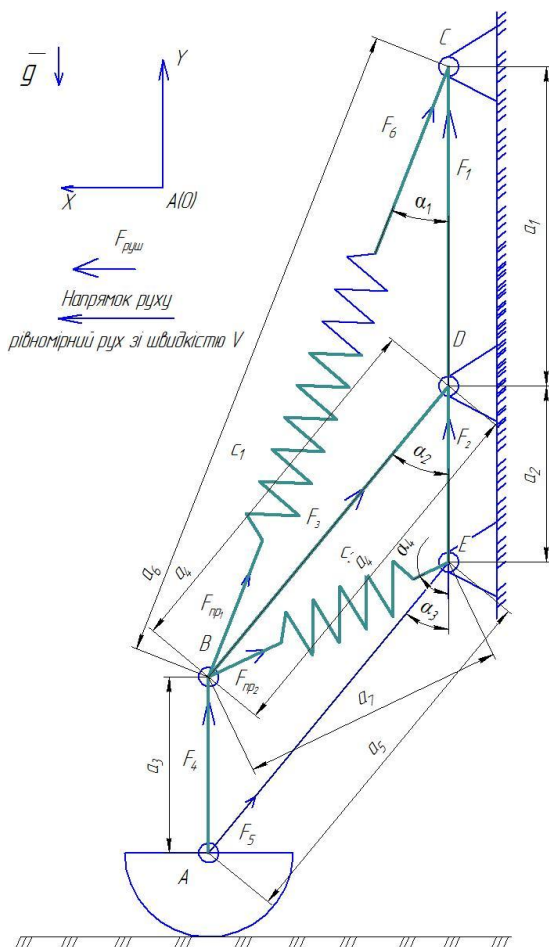


Рис.4 – Розрахункова схема підвіски та розміщення робочих електродів інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь

Звідси маємо:

$$\cos \alpha_3 = \frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 + a_3 - a_1 - a_2}{a_5}; \Leftrightarrow \alpha_3 = \arccos \left(\frac{a_6 \cdot \cos \alpha_1 + a_3 - a_1 - a_2}{a_5} \right). \quad (8)$$

Таким чином, всі кути $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, введені на рис. 1, можна звести до кута α_1 . У подальших розрахунках ми будемо користуватись цими кутами $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, як параметрами, що виражаються через α_1 .

Знайдемо дані проекції всіх сил на вісь OX (точка А ототожнюється з точкою О).

Проекція на вісь OX :

$$\begin{aligned} F_{np1x} &= -F_{np1} \cdot \sin \alpha_1 = -c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \sin \alpha_1. \\ F_{np2x} &= -F_{np2} \cdot \sin \alpha_4 = -c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \sin \alpha_4. \\ F_{1x} &\equiv 0; F_{2x} \equiv 0; F_{3x} = -F_3 \cdot \sin \alpha_2; F_{4x} \equiv 0; F_{5x} = -F_5 \cdot \sin \alpha_3. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum P_{руч} - сила_{на\ вісь\ OX} = F_{руч-сила_сум} + F_{np1x} + F_{np2x} + F_{3x} + F_{5x} \quad (10)$$

$$\sum результируючa_сила_{на\ вісь\ OX} = F_{руч} + F_{np1x} + F_{np2x} + F_{3x} + F_{5x}.$$

де Δx_1 - деформація пружини c_1 (розтяг./стиск.).

$$\Delta \ell_1 \equiv [\Delta x_1] = M; [c_1] = H/M;$$

Δx_2 - деформація (розтяг чи стиснення первісної довжини)

пругини c_2 ;

$$\Delta \ell_2 \equiv [\Delta x_2] = M; [c_2] = H/M;$$

отже, для вісі OX маємо:

$$F_{руч} - c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \sin \alpha_4 - F_3 \cdot \sin \alpha_2 - F_5 \cdot \sin \alpha_3 = M \cdot a_x. \quad (11)$$

$a_x \equiv 0$, якщо рух рівномірний системи зі швидкістю V . Тоді маємо остаточно при рівномірному руху технічної системи вздовж вісі OX :

$$F_{pyu} - c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \sin \alpha_4 - F_3 \cdot \sin \alpha_2 - F_5 \cdot \sin \alpha_3 = 0. \quad (12)$$

Знайдемо тепер проекції всіх сил на вісь OY :

$$\begin{aligned} F_{np_{1y}} &= F_{np_1} \cdot \cos \alpha_1; F_{np_{2y}} = F_{np_2} \cdot \cos \alpha_4; \text{або } F_{np_{1y}} = c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \cos \alpha_1; \\ F_{np_{2y}} &= c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \cos \alpha_4; \\ F_{1y} &= F_1; F_{2y} = F_2; F_{3y} = F_3 \cdot \cos \alpha_2; F_{4y} = F_4; F_{5y} = F_5 \cdot \cos \alpha_3. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum \text{результующая сила на ось } OY &= F_{np_{1y}} + F_{np_{2y}} + F_1 + F_2 + \\ &+ F_3 \cdot \cos \alpha_2 + F_4 + F_5 \cdot \cos \alpha_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Отже, для вісі OY маємо:

$$\begin{aligned} c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \cos \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \cos \alpha_4 + F_1 + F_2 + \\ + F_3 \cdot \cos \alpha_2 + F_4 + F_5 \cdot \cos \alpha_3 = M \cdot a_y. \end{aligned} \quad (15)$$

Якщо вважати, що прискоренням машини вздовж вертикальної вісі можна знехтувати, тобто: $a_y \rightarrow 0$, (залишається лише вага $-M \cdot g$), тоді остаточно маємо вздовж вісі OY :

$$\begin{aligned} c_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \cos \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta x_2 \cdot \cos \alpha_4 + F_1 + F_2 + \\ + F_3 \cdot \cos \alpha_2 + F_4 + F_5 \cdot \cos \alpha_3 = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

У подальшому $\Delta x_1 \equiv \Delta l_1$; $\Delta x_2 \equiv \Delta l_2$.

Тому для умов рівномірного руху інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища вздовж вісі OX маємо:

$$\begin{cases} F_{pyu} - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4 - F_3 \cdot \sin \alpha_2 - F_5 \cdot \sin \alpha_3 = 0; \\ c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \cos \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \cos \alpha_4 + F_1 + F_2 + F_3 \cdot \cos \alpha_2 + F_4 + F_5 \cdot \cos \alpha_3 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Систему (17), для того, щоб інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища була у рівновазі при русі вздовж OX зі швидкістю $V = const$, треба доповнити рівнянням для моментів обертання всіх задіяних в цій системі сил (навколо точки A).

Спочатку розглянемо сумарний момент обертання за годинниковою стрілкою (M_{\downarrow}).

Маємо:

$$M_{\downarrow} = M_{F_{nn1}} + M_{F_{nn2}} + M_{F_1} + M_{F_2} + M_{F_3} + M_{F_4} + M_{F_5}. \quad (18)$$

$M_{F_4} = M_{F_5} \equiv 0$, оскільки плече для кожної з сил F_4 й F_5 дорівнює нулю (вони – ці сили виходять з точки А).

$$M_{F_{nn1}} = a_3 \cdot F_{np1} \cdot \sin \alpha_1; \quad M_{F_{nn2}} = a_3 \cdot F_{np2} \cdot \sin \alpha_4, \quad (19)$$

де M_{F_1} за годинниковою стрілкою = 0, бо F_1 обертає систему у зворотному напрямку.

M_{F_2} - так само, як і M_{F_1} .

$$M_{F_3} = a_3 \cdot F_3 \cdot \sin \alpha_2. \quad (20)$$

Отже, для M_{\downarrow} сумарного маємо:

$$M_{\downarrow} = a_3 \cdot F_{np1} \cdot \sin \alpha_1 + a_3 \cdot F_{np2} \cdot \sin \alpha_4 + 0 + 0 + a_3 \cdot F_3 \cdot \sin \alpha_2 + 0 + 0. \quad (21)$$

Сумарний момент обертання проти годинникової стрілки (M_{\uparrow}) знайдемо зі співвідношення:

$$M_{\uparrow} = M_{F_1} + M_{F_1} = F_1 \cdot a_6 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot a_6 \cdot \sin \alpha_1. \quad (22)$$

Умова рівноваги при обертанні системи навколо точки А має вид:

$$M_{\downarrow} = M_{\uparrow}. \quad (23)$$

Тоді маємо:

$$a_3 \cdot (F_{np1} \cdot \sin \alpha_1 + F_{np2} \cdot \sin \alpha_4 + F_3 \cdot \sin \alpha_2) = a_6 \cdot (F_1 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot \sin \alpha_1). \quad (24)$$

Остаточно, для рівномірного руху інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного

стану ґрунтового середовища вповодж вісі OX зі швидкістю V маємо таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} F_{\text{пш}} - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4 - F_3 \cdot \sin \alpha_2 - F_5 \cdot \sin \alpha_3 = 0; \\ c_1 \cdot \Delta l_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \cos \alpha_4 + F_1 + F_2 + F_3 \cdot \cos \alpha_2 + \\ + F_4 + F_5 \cdot \cos \alpha_3 = -M \cdot g; \\ a_3 \cdot (c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4 + F_3 \cdot \sin \alpha_2) = a_6 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (F_1 + F_2). \end{cases} \quad (25)$$

Якщо з системи (5) виключити (F_1+F_2) суму, тоді остаточно маємо таку систему рівнянь для рівноваги інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища у цілому:

$$\begin{cases} F_{\text{пш}} - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4 - F_3 \cdot \sin \alpha_2 - F_5 \cdot \sin \alpha_3 = 0; \\ c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \cos \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \cos \alpha_4 + F_3 \cdot \cos \alpha_2 + F_5 \cdot \cos \alpha_3 + a_3 \cdot (c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 + c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4 + F_3 \cdot \sin \alpha_2) = \\ = -M \cdot g - F_4. \end{cases} \quad (26)$$

Запишемо систему (26) у наступному вигляді:

$$\begin{cases} F_3 \cdot \sin \alpha_2 + F_5 \cdot \sin \alpha_3 = F_{\text{пш}} - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4; \\ F_3 \cdot \left(\cos \alpha_2 + \frac{a_3}{a_6} \cdot \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} \right) + F_5 \cdot \cos \alpha_3 = -M \cdot g - F_4 - \\ - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \left(\cos \alpha_1 + \frac{a_3}{a_6} \right) - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \left(\cos \alpha_4 + \frac{a_3 \cdot \sin \alpha_4}{a_6 \cdot \sin \alpha_1} \right). \end{cases} \quad (27)$$

Цю систему запишемо у вигляді у вигляді:

$$\begin{cases} F_3 \cdot A_{11} + F_5 \cdot A_{12} = B_1 \\ F_3 \cdot A_{21} + F_5 \cdot A_{22} = B_2 \end{cases}, \quad (28)$$

де $A_{11} = \sin \alpha_2$; $A_{12} = \sin \alpha_3$;

$$B_1 = F_{pyu} - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha_1 - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \sin \alpha_4; \quad A_{21} = \left\{ \cos \alpha_2 + \frac{a_3}{a_6} \cdot \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} \right\};$$

$$A_{22} = \cos \alpha_3; \quad B_2 = -M \cdot g - F_4 - c_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \left(\cos \alpha_1 + \frac{a_3}{a_6} \right) - c_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \left(\cos \alpha_4 + \frac{a_3 \cdot \sin \alpha_4}{a_6 \cdot \sin \alpha_1} \right).$$

Система (28) має розв'язок (за правилом Крамера):

$$F_3 = \frac{\Delta F_3}{\Delta}; \quad F_5 = \frac{\Delta F_5}{\Delta}. \quad (29)$$

У рівняння (29) введені позначення:

$$\Delta = A_{11} \cdot A_{22} - A_{21} \cdot A_{12}; \quad \Delta F_3 = B_1 \cdot A_{22} - B_2 \cdot A_{12}; \\ \Delta F_5 = A_{11} \cdot B_2 - A_{21} \cdot B_1. \quad (30)$$

У якості критерій оптимального вибору жорсткостей C_1 й C_2 інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища можна визначити, наприклад, такий:

$$(F_3^2 + F_5^2) \rightarrow \min, \quad (31)$$

тобто \min навантаження стійок BD та AE .

Висновки. Запропонована математична модель для визначення робочих параметрів та режимів функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від механіко-конструктивних параметрів та типу підвіски її робочих електродів дозволить підвищити продуктивність та ефективність моніторингу стану сільськогосподарських угідь шляхом безперервної реєстрації щільності струму на робочих електродах пристрою, які розміщуються попереду рухомого транспортного засобу та дозволяють проводити безперервний моніторинг на поверхні сільськогосподарських угідь та дозволяє зекономити 10-25% посівного матеріалу і сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур в середньому на 10-20 ц/га.

Література

1. Hertz A. Chad and John D. Hibbard. "A Preliminary Assessment of the Economics of Variable Rate Technology for Applying Phosphorus and Potassium in Corn Production," Farm Economics iss. 14, Department of Agricultural Economics, University of Illinois, Champaign-Urbana. - 1993. - P. 218-231.
2. В.В. Медведев. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть I. Введение в проблему. Харьков Изд. «Изд 13 типография», 2007, 296 с.
3. Иванов Ю.П., Синяков А.Н., Филатов И.В. Комплексование информационно-измерительных устройств ЛА. 1984.-207 с.
4. Броварець О. Від безплужного до глобального розумного землеробства / Броварець О.// Техніка і технології АПК. – 2016. – № 10 (85). – С. 28 - 30.
5. Адамчук В.В., Мойсеєнко В.К., Кравчук В.І., Войтюк Д.Г. Техніка для землеробства майбутнього. / В зб.: Механізація та електрифікація сільського господарства. – Глеваха: ННЦ „ІМЕСГ”. – 2002. – Вип.86. – С. 20-32.
6. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / За ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Коваля. – К.: Аграрна наука, 2004. – 398 с.
7. Ормаджи К.С. Контроль качества полевых работ. М.: Росагропромиздат. - 1991. - 191с.
8. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: «Наука», 1983, - 392 с.
9. Бурачек В.Г. Геоінформаційний аналіз просторових даних/ Бурачек В.Г., Железняк О.О., Зацерковний В.І. // Монографія. – Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 440с.
10. Масло І.П. Автоматизована система локально-дозованого внесення добрив і хімічних засобів захисту рослин. / Масло І.П., Мироненко В.Г. // УААН: Розробки-виробництво. К.: Аграрна наука, 1999. –С.348–349.