

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВАЖЛИВОЇ ПІДВІСКИ РОБОЧИХ ЕЛЕКТРОДІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ АГРОБІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА

*Київський кооперативний інститут бізнесу і права, м. Київ, Україна

Анотація. Існуючі способи керування агробіологічним станом ґрунтового середовища за наявними методиками не враховують варіабельності їх параметрів щодо площі сільськогосподарських угідь. Найбільш ефективним способом оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь є вимірювання електропровідних характеристик ґрунтового середовища. Електропровідні властивості ґрунтового середовища є комплексним показником його агробіологічного стану, який враховує твердість, вологість, вміст поживних речовин у ґрунті, тощо. Інформаційно-технічну систему локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь використовують перед виконанням технологічної операції, одночасно з виконанням технологічної операції (сівба, внесення мінеральних добрив тощо), протягом вегетації та після збирання врожаю. 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 забезпечити максимальну продуктивність таких систем при отриманні достовірних даних із врахуванням агробіологічного стану ґрунтового середовища. Дана модель дає можливість забезпечити ефективне керування якістю виконання технологічними операціями. Це відкриває нові перспективи до ведення органічного землеробства з використанням таких «розумних» сільськогосподарських машин.
Ключові слова: математична модель, технічна система оперативного моніторингу.

Аннотация. Существующие способы управления агrobiологическим состоянием почвенной среды по имеющимся методикам не учитывают вариабельности их параметров по площади сельскохозяйственных угодий. Наиболее эффективным способом оперативного мониторинга агrobiологического состояния сельскохозяйственных угодий является измерение электропроводящих характеристик почвенной среды. Электропроводящие свойства почвенной среды являются комплексным показателем его агrobiологического состояния, учитывающие твердость, влажность, содержание питательных веществ в почве и т.д. Информационно-техническую систему локального оперативного мониторинга агrobiологического состояния сельскохозяйственных угодий используют перед выполнением технологической операции, одновременно с выполнением технологической операции (сев, внесение минеральных удобрений и т.п.), в течение вегетации и после уборки урожая. Построена математическая модель для определения оптимальных рабочих параметров и режимов функционирования информационно-технической системы локального оперативного мониторинга вариабельности агrobiологического состояния почвенной среды сельскохозяйственных угодий в зависимости от механико-конструктивных параметров и типа подвески ее рабочих электродов. Данная модель дает возможность оптимизировать рабочие параметры и режимы функционирования информационно-технической системы локального оперативного мониторинга вариабельности агrobiологического состояния почвенной среды сельскохозяйственных угодий в зависимости от механико-конструктивных параметров и типа подвески ее рабочих электродов, а соответственно и обеспечить максимальную производительность таких систем при получении достоверных данных с учетом агrobiологического состояния почвенной среды. Данная модель дает возможность обеспечить эффективное управление качеством исполнения технологически-

ми операціями. Это открывает новые перспективы для ведения органического земледелия с использованием таких «умных» сельскохозяйственных машин.

Ключевые слова: математическая модель, техническая система оперативного мониторинга.

Abstract. The existing methods of managing the agrobiological state of the soil environment according to the existing methods do not take into account the variability of their parameters over the area of agricultural land. The most effective way of on-line monitoring of the agrobiological state of agricultural land is to measure the conductive characteristics of the soil environment. Electroconductive properties of the soil environment are a complex indicator of its agrobiological state, taking into account the hardness, humidity, nutrient content in the soil, etc. The information and technical system of local operational monitoring of the agrobiological state of agricultural land is used: before performing a technological operation, simultaneously with performing a technological operation (sowing, mineral fertilization, etc.), during the vegetation development and after harvesting. A mathematical model was built to determine the optimal operating parameters and modes of operation of the information and technical system of local operational monitoring the variability of the agrobiological state of the soil environment of agricultural land depending on the mechanical and structural parameters and the type of suspension of its working electrodes. This model makes it possible to optimize the operating parameters and modes of operation of the information and technical system of local operational monitoring of the variability of the agrobiological state of the soil environment of agricultural land depending on the mechanic and structural parameters and the type of suspension of its working electrodes, and accordingly to ensure maximum performance of such systems when obtaining reliable data taking into account the agrobiological state of the soil environment. This model makes it possible to provide effective management of the quality of execution of technological operations. This opens up new perspectives for organic farming using such “smart” agricultural machines.

Keywords: mathematical model, technical system of operational monitoring.

1. Вступ. Постановка проблеми

Сучасні інформаційно-технічні системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь дають можливість забезпечити належну якість керування виконанням технологічних операцій із 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 «сма́рт» 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 [2].

Важливою задачею оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь є так звані «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, які 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 структури варіабельності ґрунтового покриву 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 [3]. 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 [2–4].

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 [4]. Так доцільність використання зазначених машинно-тракторних агрегатів особливо висока на етапі сівби (садіння), оскільки дана технологічна операція фактично є «фундаментом» майбутнього врожаю [5].

Аналіз 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 [6].

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 опти-

мізаційних математичних моделей.

Одним із 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 із використанням «розумних» сільськогосподарських машин [5]. Тому виникає необхідність у розробці та використанні принципово нового класу сільськогосподарських машин підтримки виробництва продукції рослинництва – інформаційно-технічних систем 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 [6].

Структура ґрунту змінюється у значних межах на багатьох сільськогосподарських полях. Фізичні властивості ґрунту, як, наприклад, ґрунтова структура, мають прямий ефект на водомісткість, ємність катіонного обміну, урожайність тощо [6]. Поживні речовини, що містяться у ґрунтах, використовуються рослиною і їх вміст у ґрунті зменшується. 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 [7, 8].

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

Сучасні методики та засоби реєстрації властивостей ґрунту

Існує проблема організації спеціальних систем спостережень, контролю і оцінки стану природного середовища (моніторингу) як у місцях інтенсивної антропогенної дії, так і у глобальному масштабі [3]. Важливе місце на сучасному етапі займає реєстрація електромагнітних характеристик ґрунту. Електромагнітні характеристики ґрунту об'єднують багато

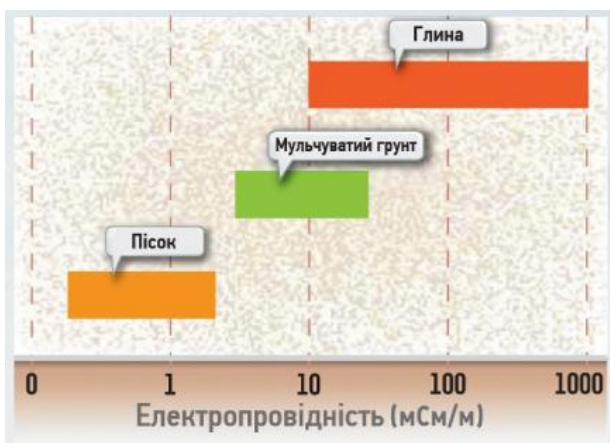


Рисунок 1 – Електропровідність різних типів ґрунтів

властивостей ґрунту, що впливають на врожайність сільськогосподарських культур. До них відносяться вміст ґрунтової вологи, гранулометричний склад ґрунту, ЄКО, 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).

Очевидно, що для правильної організації управління якістю навколишнього природного середовища абсолютно необхідною умовою є організація системи ефективного моніторингу. Для оцінки стану навколиш-

нього середовища важлива об'єктивна оперативна інформація про критичні чинники антропогенної дії, фактичний стан біосфери і прогнози її майбутнього стану.

Метою статті 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.

2. Виклад основного змісту дослідження

Відомий аналог (<http://www.veristech.com>), основним робочим органом якого є система електродів, які використано як плоскі диски з горизонтальною віссю обертання на стояку і жорстко закріпленій до рами вимірювального пристрою таким чином, що опорні колеса пристрою визначають глибину ходу дисків-електродів у ґрунті [7].

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 і 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 як електродів для визначення електропровідних характеристик тиску ґрунту виникає значна похибка, яка обумовлена конструкцією дисків при зануренні їх у ґрунт [8].

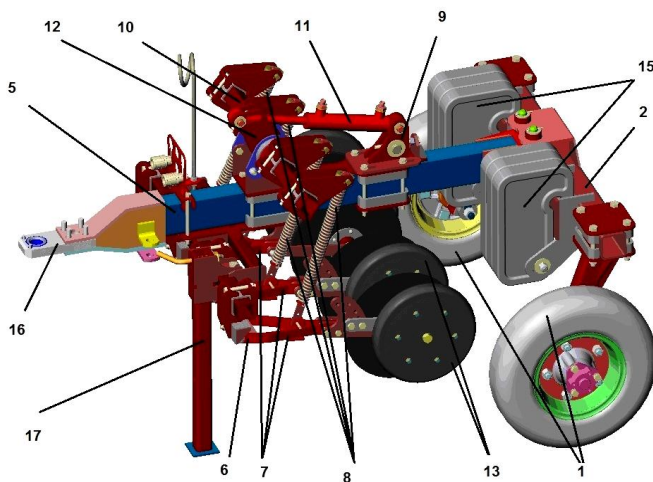


Рисунок 2 – Загальний вигляд технічної системи оперативного моніторингу стану ґрунтового середовища конструкції Олександра Броварця

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 з використанням даних електропровідних властивостей ґрунтового середовища (рис. 2). При цьому за рахунок використання пружної підвіски робочих електродів забезпечуються стабілізація робочих електродів у ґрунті та копіювання нерівностей поверхні поля. Таким чином можна отримати дос-

товірні дані електропровідності ґрунту, які можна використовувати для забезпечення належної якості виконання технологічної операції.

Технічна система оперативного моніторингу стану ґрунтового середовища конструкції Олександра Броварця складається (рис. 2) з опорних коліс 1, П-подібної рами 2, кріплення 3, повздовжньої рами 4, поперечної рами 5, шарнірів 6, важелів 7, стояків-пружин 8, кронштейна 9, обертового валу 10, гідроциліндра 11, кронштейна кріплення 12, копіювальних коліс 13, робочих електродів 14, баласту 15, фаркопа 16 та підставка 17.

Важливим елементом даної системи є робочі електроди 14, вибір форми яких залежить від агробіологічного стану сільськогосподарських угідь. При визначенні електропро-

відних властивостей ґрунтового середовища виникає необхідність визначення площі контакту робочих електродів з ґрунтом залежно від глибини їх занурення у ґрунт. Розглянемо математичні моделі для визначення площі контактів робочих електродів технічної системи оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь залежно від їх форми.

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

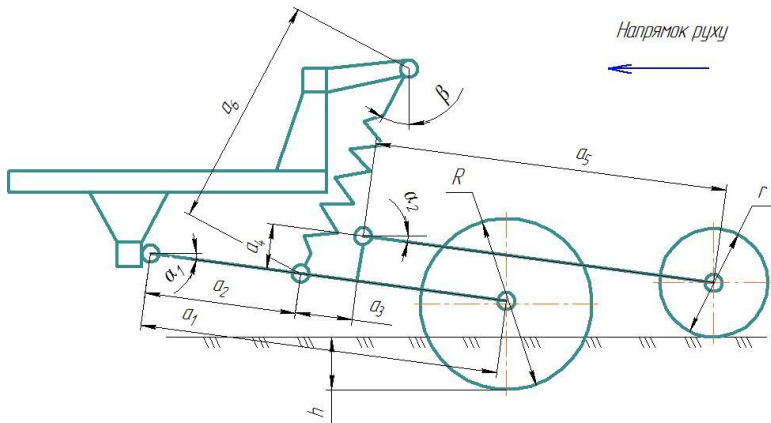


Рисунок 3 – Розрахункова схема підвіски та розміщення робочих електродів інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь

Це відкриває нові перспективи для ведення органічного землеробства з використанням таких «розумних» сільськогосподарських машин. Дослідимо математичну модель функціонування важільної підвіски робочих електродів інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану

ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь, розміщених позаду транспортного агрегату (рис. 3).

Встановимо спочатку геометричні співвідношення.

$$\begin{cases} \frac{a_4}{\cos \alpha_2} = r - (R - h), \\ a_1 \cdot \cos \alpha_1 - (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 - a_n \cdot \sin \alpha_2 + \frac{a_4}{\sin \alpha_2} = a_5 \cdot \cos \alpha_2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \arccos \left\{ \frac{a_4}{r - R + h} \right\}, \quad (2)$$

$$r + h > R.$$

Кути α_1 й α_2 зв'язані між собою такою залежністю:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 \cdot (a_1 - a_2 - a_3) &= a_4 \cdot \sin \alpha_2 - \frac{a_4}{\sin \alpha_2} + a_5 \cdot \cos \alpha_2, \\ \cos \alpha_1 &= \frac{\left[a_4 \cdot \sin \alpha_2 - \frac{a_4}{\sin \alpha_2} + a_5 \cdot \cos \alpha_2 \right]}{(a_1 - a_2 - a_3)}, \\ \alpha_1 &= \arccos \left\{ \frac{a_4 \cdot \sin \alpha_2 - \frac{a_4}{\sin \alpha_2} + a_5 \cdot \cos \alpha_2}{(a_1 - a_2 - a_3)} \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Моменти сил, які діють на систему, визначаються за такою залежністю:

$$\begin{aligned} M \uparrow &= c \cdot \Delta \ell \cdot a_2 \cdot \cos(\beta - \alpha_1), \\ M \uparrow &= N_1 \cdot a_1 \cdot \cos \alpha_1; M \downarrow = m_1 \cdot g \cdot \cos \alpha_1, \\ M \uparrow &= N_2 \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\}, \\ M \downarrow &= m_2 \cdot g \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\}, \\ \Sigma M \uparrow &= \Sigma M \downarrow. \end{aligned} \quad (4)$$

Запишемо рівняння рівноваги для системи:

$$\begin{aligned} c \cdot \Delta \ell \cdot a_2 \cdot \cos(\beta - \alpha_1) + N_1 \cdot a_1 \cdot \cos \alpha_1 + N_2 \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\} = \\ = m_1 \cdot g \cdot a_1 \cdot \cos \alpha_1 + m_2 \cdot g \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Звідси

$$c \cdot \Delta \ell \cdot a_2 \cdot \cos(\beta - \alpha_1) + (N_1 - m_1 \cdot g) \cdot a_1 \cdot \cos \alpha_1 + (N_2 - m_2 \cdot g) \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\} = 0. \quad (6)$$

Друге рівняння – це рівність сукупної рівнодіючої усіх сил, що діють у вертикальному напрямку:

$$c \cdot \Delta \ell \cdot \cos \beta + N_1 + N_2 = m_1 \cdot g + m_2 \cdot g, \quad (7)$$

де $\Delta \ell = \ell - a_6$, ℓ – поточне значення довжини пружини.

Третє рівняння для горизонтальних сил і рівнодіючої (при рівномірному русі вона дорівнює 0).

При рівномірному русі: $V = const$;

$$F_{руййна} - c \cdot \Delta \ell \cdot \sin \beta - F_{тертя} - F_{тертя} = 0; \quad (8)$$

$F_{тертя}$ – сила тертя кочення/ковзання під першим колесом (R);

$F_{тертя}$ – сила тертя кочення/ковзання під другим колесом (r);

$$F_{тертя_1} = k \cdot N_1; \quad (9)$$

$$F_{тертя_2} = k \cdot N_2;$$

k – або коефіцієнт тертя ковзання (або тертя кочення).

Значимо, що k тертя кочення залежить від радіусу колеса й типів контактуючих поверхонь (матеріал колеса і ґрунт).

З рівнянь (4)–(6) знаходимо всі невідомі сили $N_1, N_2, c \cdot \Delta \ell$.

Знаючи силу пружності $F_{пружн.} = c \cdot \Delta \ell$, знайдемо жорсткість пружини c :

$$c = \frac{F_{пружн.}}{(\ell - a_6)}. \quad (10)$$

Система рівнянь (4)–(6) для визначення N_1, N_2 й $F_{пружн.}$ може бути подана таким чином:

$$\begin{cases} F_{пружн.} \cdot A_{11} + N_1 \cdot A_{12} + N_2 \cdot A_{13} = B_1, \\ F_{пружн.} \cdot A_{21} + N_1 \cdot A_{22} + N_2 \cdot A_{23} = B_2, \\ F_{пружн.} \cdot A_{31} + N_1 \cdot A_{32} + N_2 \cdot A_{33} = B_3, \end{cases} \quad (11)$$

де ведені такі позначення:

$$A_{11} = a_2 \cdot \cos(\beta - \alpha_1), \quad A_{12} = a_1 \cdot \cos \alpha_1, \quad A_{13} = a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2.$$

$$B_1 = m_1 \cdot g \cdot a_1 \cdot \cos \alpha_1 + m_2 \cdot g \cdot \{a_5 \cdot \cos \alpha_2 + (a_2 + a_3) \cdot \cos \alpha_1 + a_4 \cdot \cos \alpha_2\}.$$

$$A_{21} = \cos \beta, \quad A_{22} = 1, \quad A_{23} = 1, \quad B_2 = (m_1 + m_2) \cdot g.$$

$$A_{31} = \sin \beta, \quad A_{32} = k, \quad A_{33} = k.$$

$$B_3 = F_{пружинна} = \frac{N}{V},$$

де N – потужність тягового агрегату інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь;

V – швидкість руху інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь. $V = const$ (при рівномірному русі).

N, V, k , всі маси й геометричні параметри вважаємо заданими. Ці геометричні параметри між собою зв'язані геометричними співвідношеннями (1)–(3).

Вважаємо, що $\ell = a_6 + \Delta\ell$. Причому $\frac{\Delta\ell}{a_6} \ll 1$, щоб пружина працювала у межах лінійного закону Гука.

Тобто, скажімо $\frac{\Delta\ell}{a_6} = 0,1$ (чи 0,01 або якесь інше число) – все залежить від типу матеріалу пружини.

З системи (4) легко знаходимо всі невідомі $F_{пружн.}, N_1, N_2$ за правилом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta F_{пружн.} = \begin{vmatrix} B_1 & A_{12} & A_{13} \\ B_2 & A_{22} & A_{23} \\ B_3 & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

$$\Delta N_1 = \begin{vmatrix} A_{11} & B_1 & A_{13} \\ A_{21} & B_2 & A_{23} \\ A_{31} & B_3 & A_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta N_2 = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & B_1 \\ A_{21} & A_{22} & B_2 \\ A_{31} & A_{32} & B_3 \end{vmatrix},$$

$$\text{де } F_{пружн.} = \frac{\Delta F_{пружн.}}{\Delta}, \quad N_1 = \frac{\Delta N_1}{\Delta}, \quad N_2 = \frac{\Delta N_2}{\Delta}.$$

Визначники $\Delta, \Delta F_{пружн.}, \Delta N_1, \Delta N_2$ легко розкрити за правилом трикутників Саррюса.

Знаючи $F_{пружн.}$, знаходимо c – жорсткість пружини інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь:

$$c = \frac{F_{пружн}}{\ell - a_6} = \frac{F_{пружн}}{\Delta\ell} = \frac{F_{пружн}}{\frac{\Delta\ell}{a_6} \cdot a_6}.$$

Вважаємо, що $\frac{\Delta\ell}{a_6}$ – задане число n , наприклад, $n = 0,01; 0,1$ і т.д.

$$[c] = H/m, [N] = H, [N_2] = H.$$

3. Висновок

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, дозволяє проводити безперервний моніторинг на поверхні сільськогосподарських угідь і зекономити 10–25% посівного матеріалу, сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур в середньому на 10–20 ц/га.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Hertz A.C., Hibbard J.D. A Preliminary Assessment of the Economics of Variable Rate Technology for Applying Phosphorus and Potassium in Corn Production. Farm Economics. Department of Agricultural Economics, University of Illinois, Champaign-Urbana. 1993. Iss. 14. P. 218–231.
2. Медведев В.В. 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. Комплексирование информационно-измерительных устройств ЛА. Киев, 1984. 207 с.
4. Точное земледелие. URL: <http://druzhba-nova.com/ru/index.html>.
5. Техника. URL: <http://kbo-agro.com.ua>.
6. Electromagneti Geophysical Instrumentation. URL: www.geonics.com.
7. Veris technologies. URL: <http://www.veristech.com>.
8. Пристрій для моніторингу стану сільськогосподарських угідь: пат. № 66982; МПК В62D 01/00; заявл. 25.01.2012; Бюл. № 2. С. 2.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2018