

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ І
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 681.513

О.О. БРОВAREЦЬ

Київський кооперативний інститут бізнесу і права

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-
ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ
СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ**

Існуючі способи керування агробіологічним станом ґрунтового середовища та відбором проб ґрунту за наявними методиками не враховують варіабельності їх параметрів по площі сільськогосподарських угідь.

Диференційоване керування нормою внесення технологічного матеріалу, у межах даного квадрата, повинне буде здійснюватися саме на підставі середнього значення цього параметра. Тому такий спосіб реалізації диференційованого внесення технологічного матеріалу буде не ефективним.

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.

Ставиться завдання отримання оперативних достовірних даних про агробіологічний стан ґрунтового середовища шляхом зменшення похибки при визначенні величини електропровідних властивостей ґрунту. Для забезпечення означених задач використовують інформаційно-технічну систему локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь шляхом вимірювання електропровідності ґрунтів з різними типами підвіски її робочих електродів.

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.

Проведено математичне моделювання функціонування інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь.

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

Ключові слова: інформаційно-технічна система, оперативний моніторинг, ґрунт, проби, варіабельність, величина.

А.А. БРОВAREЦЬ

Київський кооперативний інститут бізнесу і права

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ**

Существующие способы управления агробиологическим состоянием почвенной среды и отбором проб ґрунта по имеющимся методикам не учитывают вариабельности их параметров по площади сельскохозяйственных угодий.

Дифференцированное управление нормой внесения технологического материала, в рамках данного квадрата, должно будет осуществляться именно на основании среднего значения этого параметра. Поэтому такой способ реализации дифференцированного внесения технологического материала будет не эффективным.

Наиболее эффективным способом оперативного мониторинга агробиологического состояния сельскохозяйственных угодий является измерение электропроводящих характеристик почвенной среды. Электропроводящие свойства почвенной среды является комплексным показателем его

агробиологического состояния, учитывающий твердость влажность, содержание питательных веществ в почве и тому подобное.

Ставится задача получения оперативных достоверных данных о агробиологический состоянии почвенной среды путем уменьшения погрешности при определении величины электропроводящих свойств почвы. Для обеспечения указанных задач используют информационно-техническую систему локального оперативного мониторинга агробиологического состояния сельскохозяйственных угодий путем измерения электропроводности почв с различными типами подвески ее рабочих электродов.

Информационно-техническую систему локального оперативного мониторинга агробиологического 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.

Проведено математическое моделирование функционирования информационно-технической системы локального мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий.

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

Ключевые слова: информационно-техническая система, оперативный мониторинг, почва, пробы, вариабельность, величина.

O. BROVARETS

Kyiv Cooperative Institute of Business and Law

MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF INFORMATION AND TECHNICAL SYSTEM OF LOCAL OPERATING MONITORING STATE OF AGRICULTURAL AGRICULTURE

Existing methods for controlling the agrobiological state of the soil and sampling soil according to available methods do not take into account the variability of their parameters in the area of agricultural land.

Differentiated control of the norm of making a technological material, within the limits of a given square, should be carried out precisely on the basis of the average value of this parameter. Therefore, such a method of implementing a differentiated introduction of technological material will be ineffective.

The most effective way of operational monitoring of the agrobiological state of agricultural lands is the measurement of the conductive characteristics of the soil environment. The conductive properties of the soil environment is a complex indicator of its agrobiological state, which takes into account the hardness of moisture, the content of nutrients in the soil, and so on.

The task is to obtain reliable reliable data on the agrobiological state of the soil environment by reducing the error in determining the magnitude of the conductive properties of the soil. To provide the indicated tasks, the information and technical system of local operational monitoring of the agrobiological state of agricultural lands is used by measuring the electrical conductivity of soils with different types of suspension of its working electrodes.

The information and technical system of local operational monitoring of the agrobiological state of agricultural lands is used: before the execution of the technological operation, simultaneously with the implementation of the technological operation (seed, application of mineral fertilizers, etc.); during the growing season and after harvesting.

The mathematical modeling of the functioning of the information and technical system of the local operational monitoring of the condition of agricultural lands is carried out.

This opens new prospects for organic farming using such "smart" agricultural machines.

Keywords: information and technical system, operational monitoring, soil, samples, variability, magnitude.

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

грунтового середовища на основі інформації з датчиків про агробіологічний стан ґрунтового середовища.

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.

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, 5].

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.

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

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].

Сучасні методики та засоби реєстрації властивостей ґрунту

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, 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) [16].

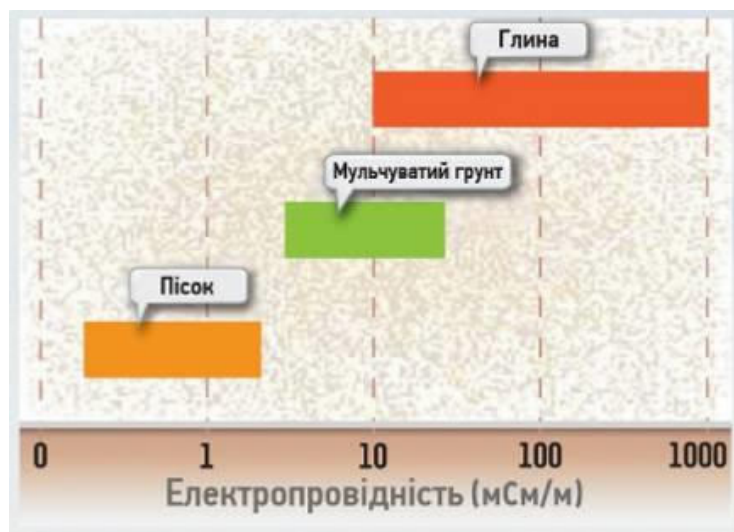


Рис. 1. Електропровідність різних типів ґрунтів

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.

Формулювання мети дослідження

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.

Викладення основного матеріалу 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.

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. 2).

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. 2).

На рис. 2 зображено загальний вигляд машини для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив з інформаційно-технічною системою локального оперативного моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля.

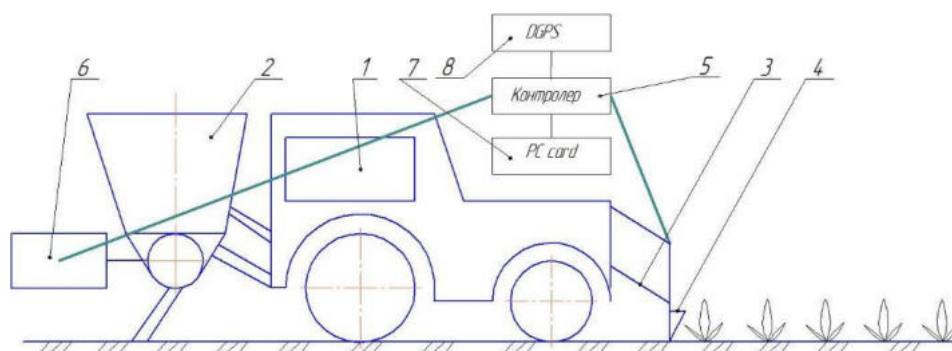


Рис. 2. Зображено загальний вигляд машини для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив з інформаційно-технічною системою локального оперативного моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля

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 підвісці 3, і розміщуються спереду на транспортному засобу 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 підвісці 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).

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.

Задані наступні параметри підвіски (рис. 3):

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ - конструктивні лінійних розмірів;

$\alpha, \beta, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma$ - кути розміщення відповідних робочих елементів;

$N_{\tau 1}, N_{n1}, N_{\tau 2}, N_{n2}, N_{\tau 3}, N_{n3}, N_{1R}$ і N_{2r} – сили реакції опор;

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

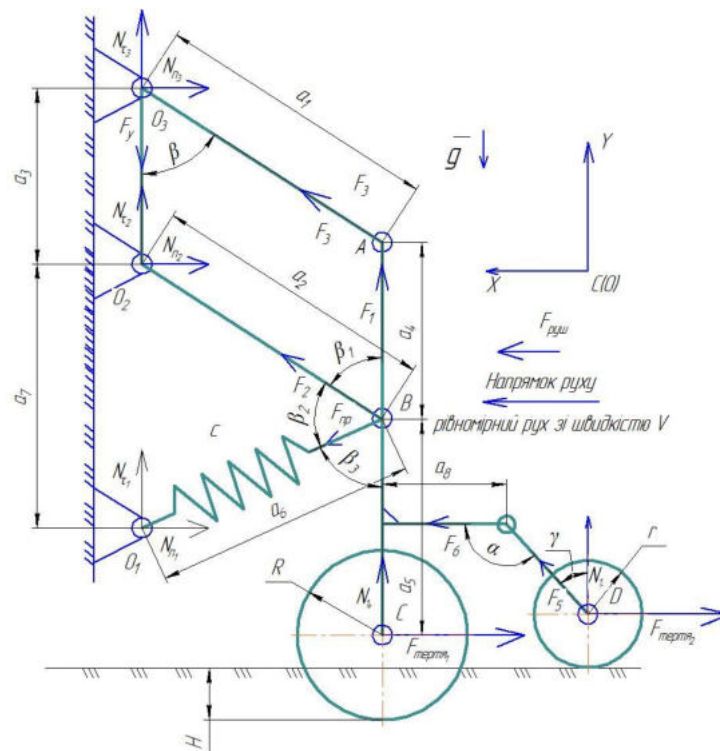


Рис. 3. Розрахункова схема підвіски та розміщення робочих електродів інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь

F_{np} - одна пружна сила.

$$F_{np} = c \cdot \Delta l; \tag{1}$$

Δl ; - деформація (розтяг/стиск) первісної довжини a_6 .

У кожній точці обертання: C й D коліс діють сили тертя кочення:

$$F_{\text{тертя}_1} = k_1^{(R)} \cdot N_{1R}, F_{\text{тертя}_2} = k_2^{(r)} \cdot N_{2r} \tag{2}$$

де $k_1^{(R)}$, $k_2^{(r)}$ – коефіцієнти тертя кочення, які є функціями (R й r), відповідно.

У точках O_1 , O_2 , O_3 – закріплення рам конструкції діють сили реакції опор: нормальна, й потенціальна.

$$O_1 : (N_{1n}, N_{1\tau}); O_2 : (N_{2n}, N_{2\tau}); O_3 : (N_{3n}, N_{3\tau});$$

.....ТИПОВИЙ МАЛЮНОК.;

$$\gamma = \alpha - 90^\circ \quad F_5 = N_{2r} \cdot \cos \gamma; \quad F_6 = F_5 \cdot \cos(180^\circ - \alpha) = -F_5 \cdot \cos \alpha. \tag{3}$$

Отже,

$$F_5 = N_{2r} \cdot \cos(\alpha - 90^\circ) = N_{2r} \cdot \cos(\alpha - 90^\circ) = N_{2r} \cdot \sin \alpha;$$

$$F_6 = F_5 \cdot (-1) \cdot \cos \alpha = -N_{2r} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = -\frac{N_{2r}}{2} \cdot \sin 2\alpha. \tag{4}$$

де

$$F_5 = N_{2r} \cdot \sin \alpha; \quad F_6 = -\frac{N_{2r}}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad F_{np} = c \cdot \Delta l; \tag{5}$$

Для введених кутів (див. рис. 1) β_1 й β_2 маємо:

$$a_3^2 + a_1^2 - 2 \cdot a_3 \cdot a_1 \cdot \cos \beta = a_4^2 + a_2^2 - 2 \cdot a_4 \cdot a_2 \cdot \cos \beta_1;$$

$$\frac{a_n^2 + a_2^2 - a_3^2 + 2 \cdot a_3 \cdot a_1 \cdot \cos \beta}{2 \cdot a_4 \cdot a_2} = \cos \beta_1; \Leftrightarrow \beta_1 = \arccos\left(\frac{a_4^2 + a_2^2 - a_3^2 - a_1^2 + 2a_3 \cdot a_1 \cdot \cos \beta}{2 \cdot a_4 \cdot a_2}\right), \tag{6}$$

$$a_2^2 + a_6^2 - 2 \cdot a_2 \cdot a_6 \cdot \cos \beta_2 = a_7^2; \Leftrightarrow 2 \cdot a_2 \cdot a_6 \cdot \cos \beta_2 = a_2^2 + a_6^2 - a_7^2;$$

$$\cos \beta_2 = \frac{a_2^2 + a_6^2 - a_7^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_6}; \Leftrightarrow \beta_2 = \arccos\left(\frac{a_2^2 + a_6^2 - a_7^2}{2 \cdot a_2 \cdot a_6}\right).$$

Кут β_3 (див. рис. 4) знаходимо зі співвідношення:

$$\beta_3 = 180^\circ - \beta_1 - \beta_2 \tag{7}$$

Рівновага системи сил вздовж вісі OX :

$$F_{руш} - F_{\text{тертя}_1} - F_{\text{тертя}_2} - N_{n1} - N_{n2} - N_{n3} + F_6 + F_5 \cdot \sin \gamma + F_3 \cdot \sin \beta + F_2 \cdot \sin \beta_1 + c \cdot \Delta l \cdot \sin \beta_3 = 0 \tag{8}$$

Рівновага системи сил вздовж вісі OY :

$$-M \cdot g + F_1 + N_{1R} + N_{2r} + F_5 \cdot \cos \gamma - F_4 + F_3 \cdot \cos \beta + F_2 \cdot \cos \beta_1 - c \cdot \Delta l \cdot \cos \beta_3 + N_{\tau 1} + N_{\tau 2} + N_{\tau 3} = 0; \tag{9}$$

де M - маса інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь.

Вважаємо сили N_n й N_τ заданими (нормованими). Тоді:

14. Бурачек В.Г., Железняк О.О., Зацерковний В.І. Геоінформаційний аналіз просторових даних: монографія. . – Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 440с.
15. Масло І.П., Мироненко В.Г. Автоматизована система локально-дозованого внесення добрив і хімічних засобів захисту рослин. УААН: Розробки-виробництву. К.: Аграрна наука, 1999. –С.348–349.
16. Броварець О.О. Математичні моделі для визначення площі контактів робочих електродів технічної системи оперативного моніторингу варіабельності агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь / Броварець О.О. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2017. – №19 (1241) 2017. – с. 94 – 102.