

УДК 631.3:528.8:681.518

Броварець О., канд. техн. наук, доцент (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

## Математичний апарат технічних системи локального моніторингу електропровідних властивостей ґрунтового середовища

У статті наведена структурно-функціональна схема технічної системи локального моніторингу електропровідних властивостей ґрунтового середовища з класифікацією аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів та математичним апаратом, які використовуються для їх реалізації.

**Ключові слова:** ґрунтове сховище, електропровідні властивості, технічні системи, локальний моніторинг, математичний апарат.

**Вступ.** Одним з перспективних напрямків використання опосередкованої інформації про стан ґрунту з надійним алгоритмом перерахунку такої інформації в об'єктивно необхідні дані є показники електричної провідності ґрунту та магнітні властивості. Сучасна альтернатива традиційному агрохімічному обстеженню - контактні та безконтактні методи на основі електромагнітних явищ. Найчастіше це вимірювання, реєстрація, обробка, аналіз та інтерпретація електропровідних та електромагнітних властивостей ґрунту, що дає можливість визначити гранулометричний (механічний) склад ґрунту, вміст органічної речовини, солей, вологість, виділити ґрунтові контури і оцінити неоднорідність ґрунтових властивостей в цілому.

Недоліком існуючих способів моніторингу електропровідних властивостей ґрунтового середовища є значна похибка під час визначення, яка обумовлена складом робочого обладнання.

**Мета досліджень.** Тому ставиться завдання забезпечення локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив за допомогою спеціального пристрою індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив шляхом використання пристроїв для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля на основі даних, отриманих вимірюванням вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами), які розміщуються спереду на транспортному засобі під час виконання технологічної операції, що дає можли-

вість забезпечити оптимальну норму внесення поживних речовин у ґрунт з використанням даних від двох систем моніторингу.

Це можливо шляхом отримання достовірних даних про стан ґрунтового середовища шляхом зменшення похибки під час визначення величини електропровідних властивостей ґрунту та зменшення інтенсивності руйнування структури ґрунту і забезпечення стабільності електричного контакту електрода з ґрунтом, використання інтегровальних аналого-цифрових перетворювачів технічних системи локального моніторингу електропровідних властивостей ґрунтового середовища

**Результати досліджень.** Поставлене завдання вирішується шляхом використання електродної пари, яка розміщується на рухомому транспортному засобі та постійно занурена у ґрунт (рис. 1).

Пристрій для моніторингу стану сільськогосподарських угідь складається з транспортного засобу 1, електродних пар циліндричної форми 2, які прикріплені до рухомого транспортного засобу 1, та пристрою 3, який здійснює реєстрацію зміни щільності струму на електродних парах.

Пристрій працює таким чином: під час переміщення транспортного засобу 1 по поверхні поля за допомогою електродних пар циліндричної форми 2, занурених у ґрунт, здійснюється визначення щільності струму. Електродні пари 2 під'єднані до пристрою 3, який здійснює реєстрацію зміни щільності струму на електродних парах 2.

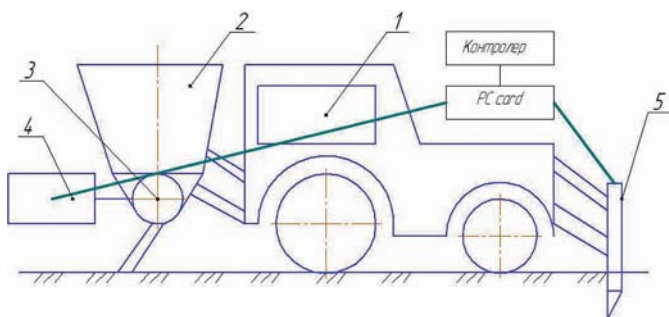


Рис. 1 – Загальний вигляд машини для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив з пристроєм для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля: 1 – транспортний засіб; 2 – електродна пара циліндричної форми; 3 – пристрій, який здійснює реєстрацію зміни щільності струму на електродних парах; 4 – пристрій; 5 – контролер

Машина для внесення мінеральних добрив використовується для локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив зі спеціальним пристроєм індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив та пристроями для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля на основі даних, отриманих вимірюванням вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами) та вимірювання вмісту поживних речовин у рослині (реєстрація оптичної спектрометрії рослинності - спектрів відбиття рослинності в натуральних умовах за змінних рівнів освітленості з різноколірною температурою), які розміщуються спереду на транспортному засобі під час виконання технологічної операції. Сигнал від даних пристроїв моніторингу потрапляє на контролер, який 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 пристроїв для моніторингу стану ґрунту та рослинності (картограма завдання) та реалізації локально-стрічкового диференційованого внесення мінеральних добрив (картограма реалізації), що дає можливість забезпечити оптимальну норму внесення. Запропонована модель дозволить підвищити продуктивність та ефективність моніторингу стану сільськогосподарських угідь шляхом безперервної реєстрації щільності струму на електродних парах пристрою, які постійно занурені у ґрунт і розміщуються на рухомому транспортному засобі.

Пристрій складається з транспортного засобу 1, машини для внесення мінеральних добрив 2, яка розміщується позаду транспортного засобу 1, пристроїв для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля шляхом вимірювання вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами) 3 та пристрою для вимірювання вмісту поживних речовин у рослині (реєстрація оптичної спектрометрії рослинності - спектрів відбиття рослинності в натуральних умовах зі змінними рівнями освітленості з різноколірною температурою) 4, які розміщуються спереду на транспортному засобі 1, контролера 5, спеціального

пристрою індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив, PC card з магнітним носієм, приймача сигналів супутникової навігаційної системи DGPS 8.

Пристрій працює таким чином: під час переміщення транспортного засобу з машиною для внесення мінеральних добрив, яка розміщується позаду транспортного засобу, пристрої для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля на основі даних від пристрою для вимірювання вмісту поживних речовин у ґрунті (реєстрація електропровідних властивостей ґрунту сенсор-електродами) та пристрою для вимірювання вмісту поживних речовин у рослині (реєстрація оптичної спектрометрії рослинності - спектрів відбиття рослинності в натуральних умовах зі змінними рівнями освітленості з різноколірною температурою), які розміщуються спереду транспортного засобу, забезпечують проведення моніторингу стану сільськогосподарських угідь. Контролер отримує дані від пристроїв для моніторингу варіабельності параметрів сільськогосподарського поля та керує спеціальним пристроєм індивідуального приводу робочих елементів машини для внесення мінеральних добрив. Дані отримані від пристроїв для моніторингу записуються у вигляді електронної карти на PC card з магнітним носієм з прив'язкою до координат місцезнаходження за допомогою системи DGPS 8. На PC card з магнітним носієм електронної карти можливий запис даних від пристроїв для моніторингу (картограма завдання) та реалізації змінних норм внесення мінеральних добрив (технологічного матеріалу) – електронна карта (картограма реалізація).

Важливою складовою є контролер, основою якого є аналого-цифрові підсилювачі перетворювачі. Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) це пристрої, які приймають вхідні аналогові сигнали та генерують відповідні до них цифрові сигнали, які придатні для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями.

Принципово не виключена можливість безпосереднього перетворення різних фізичних величин у цифрову форму, однак це завдання вдається розв'язати тільки досить рідко через складність таких перетворювачів. Тому зараз найраціональнішим вважається спосіб перетворення різних за фізичною природою величин спочатку у функціонально пов'язані з ними електричні, а потім уже за допомогою перетворювачів напруга-код – у цифрові. Саме ці перетворювачі і мають на увазі, коли говорять про АЦП.

Процедура аналого-цифрового перетворення неперервних сигналів, яку реалізують за допомогою АЦП, це перетворення неперервної функції часу  $U(t)$ , яка описує вхідний сигнал, у послідовність чисел  $\{U(t_j)\}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots$ , що віднесені до деяких фіксованих моментів часу. Цю процедуру можна розділити на дві самостійні операції: дискретизацію і квантування.

Найпоширенішою формою дискретизації, як зазначалось, є рівномірна дискретизація, в основі якої лежить теорема відліків. Згідно з цією теоремою, як коефіцієнти  $a_j$  потрібно використовувати миттєві зна-

чення сигналу  $U(t)$  в дискретні моменти часу  $t_j = j\omega t$ , а період дискретизації вибирати з умови:

$$t = 1/2F_m \quad (1)$$

де  $F_m$  – максимална частота спектра сигналу, який перетворюється.

Тоді отримуємо відомий вираз теореми відліків:

$$U(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} U(j\omega\Delta t) \frac{\sin[2\pi F_m(t - j\Delta t)]}{2\pi F_m(t - j\Delta t)} \quad (2)$$

Для сигналів зі строго обмеженим спектром цей вираз є тотожністю. Однак спектри реальних сигналів прямують до нуля тільки асимптотично. Застосування рівномірної дискретизації до таких сигналів викликає виникнення в системах обробки інформації специфічних високочастотних спотворень, які зумовлені вибіркою. Для зменшення цих спотворень необхідно або збільшувати частоту дискретизації, або використовувати перед АЦП додатковий фільтр нижніх частот, який обмежуватиме спектр вхідного сигналу перед його аналого-цифровим перетворенням.

У загальному випадку вибір частоти дискретизації буде залежати також від вигляду функції  $f_j(t)$ , яка використовується в першій формулі розділу, та допустимого рівня похибок, які виникають під час відновлення початкового сигналу за його відліками. Усе це необхідно враховувати, вибираючи частоти дискретизації, яка визначає необхідну швидкодію АЦП. Часто цей параметр задають розробнику АЦП.

Розглянемо докладніше місце АЦП під час виконання операції дискретизації.

Для достатньо вузькосмугових сигналів операцію дискретизації можна виконувати за допомогою самих АЦП і суміщати таким чином з операцією квантування. Основною закономірністю такої дискретизації є те, що за рахунок скінченного часу одного перетворення та невизначеності моменту його закінчення, який, у загальному випадку, залежить від параметрів вхідного сигналу, не вдається отримати однозначної відповідності між значеннями відліків та моментами часу, до яких їх потрібно віднести. У результаті в роботі із сигналами, які змінюються в часі, виникають специфічні похибки, динамічні за своєю природою, для оцінки яких вводять поняття апертурної невизначеності, яка переважно характеризується апертурним часом.

Апертурним часом  $t_a$  називають час, протягом якого зберігається невизначеність між значенням вибірки та часом, до якого вона відноситься. Ефект апертурної невизначеності проявляється або як похибка миттєвого значення сигналу із заданими моментами вимірювання, або як похибка моменту часу, в який проводиться вимірювання із заданим миттєвим значенням сигналу. За рівномірної дискретизації наслідком апертурної невизначеності є виникнення амплітудних похибок, які називаються апертурними, та чисельно рівні приростові сигналу протягом апертурного часу.

Якщо використовувати іншу інтерпретацію ефекту апертурної невизначеності, то її наявність викликає "тремтіння" істинних моментів часу, в які беруться відліки сигналу, відносно моментів, які рівновіддалені на осі часу. У результаті замість рівномірної дискретиза-

ції зі строго постійним періодом проводиться дискретизація с флюктувальним періодом повторення. Це викликає порушення умов теореми відліків та появи уже розглянутих апертурних похибок в системах цифрової обробки інформації.

Таке значення апертурної похибки можна визначити, розклавши вираз для вхідного сигналу в ряд Тейлора в колі точок відліку, який для  $-i$  точки має вигляд:

$$U(t) = U(t_j) + t_a U'(t_j) + \frac{t_a^2}{2} U''(t_a) + \dots \quad (3)$$

та в першому наближенні дає апертурну похибку:

$$\Delta U_a(t_j) \approx t_a U'(t_j) \quad (4)$$

де  $t_a$  – апертурний час, який для розглянутого випадку в першому наближенні є часом перетворення АЦП.

Зазвичай для оцінки апертурних похибок використовують синусоїдальний випробувальний сигнал  $U(t) = U_m \sin \omega t$ .

Якщо прийняти, що для N-розрядного АЦП з роздільною здатністю  $2^{-N}$  апертурна похибка не повинна перевищувати кроку квантування, то залежність між частотою сигналу  $\omega$ , апертурним часом  $t_a$  та відносною

апертурною похибкою буде такою:  $\left(\frac{1}{2}\right)^N = \omega t_a$ .

Для забезпечення дискретизації синусоїдального сигналу, частота якого 100 кГц з похибкою 1% час перетворення АЦП повинен бути рівним 25 нс. У той же час за допомогою такого швидкодійного АЦП принципово можна дискретизувати сигнали, які мають ширину спектра біля 20 МГц. Таким чином, дискретизація за допомогою самого АЦП викликає суттєве розходження вимог між швидкодією АЦП та періодом дискретизації. Це розходження досягає 2...3 порядків та дуже ускладнює і здорожує процес дискретизації, оскільки навіть для порівняно вузькосмугових сигналів потребує досить швидкодійних АЦП. Для достатньо широкого класу сигналів, які швидко змінюються, цю проблему вирішують за допомогою пристроїв вибірки-зберігання, які мають малий апертурний час.

Рис. 2 – Утворення апертурної похибки для випадку, коли вона дорівнює кроку квантування

Для забезпечення дискретизації синусоїдального сигналу, частота якого 100 кГц з похибкою 1% час перетворення АЦП повинен бути рівним 25 нс. У той же час за допомогою такого швидкодійного АЦП принципово можна дискретизувати сигнали, які мають ширину спектра біля 20 МГц. Таким чином, дискретизація за допомогою самого АЦП викликає суттєве розходження вимог між швидкодією АЦП та періодом дискретизації. Це розходження досягає 2...3 порядків та дуже ускладнює і здорожує процес дискретизації, оскільки навіть для порівняно вузькосмугових сигналів потребує досить швидкодійних АЦП. Для достатньо широкого класу сигналів, які швидко змінюються, цю проблему вирішують за допомогою пристроїв вибірки-зберігання, які мають малий апертурний час.

**Висновки.** Запропонована модель дозволяє забезпечити диференційне внесення мінеральних добрив на основі даних моніторингу фізико-механічного та агробіологічного стану ґрунтового та рослинного середовища шляхом вимірювання електропровідних властивостей ґрунту та вимірювання спектрів відбиття рослинного покриву для забезпечення підбору оптимальної площі живлення рослин з урахування просторової неоднорідності ґрунтового покриву та дозволяє зекономити 10-25% посівного матеріалу і

сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур у середньому на 10-20 ц/га.

### Список літератури

1. Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. Lund ED ; Wolcott MC ; Hanson GP, TheScientificWorldJournal [ScientificWorldJournal] 2001 Oct 16; Vol. 1 Suppl 2, pp. 767-76. Date of Electronic Publication: 2001 Oct 16.

2. Масло І.П., Мироненко В.Г. Автоматизована система моніторингу родючості ґрунту та локально-дозоване використання хімпрепаратів // Вісник сільськогосподарської науки. -1998.-№5, с.56-58.

3. Пастушенко С.И. Оптимизация сельскохозяйственных технических систем // Техніка АПК. – 1999. - №8. – С. 12-15.

4. 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.

5. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / За ред. В.І. Кравчука, М.І.Грицишина, С.М.Коваля. – К.: Аграрна наука, 2004. – 398 с.

6. Мироненко В.Г. Технічні засоби забезпечення якості виконання технологічних процесів у рослинництві. Монографія, НАУ – К.,2005. – 271с.

7. Броварець О.О. Модель реалізації прогностично – компенсаційної технології змінних норм внесення технологічного матеріалу з використанням інформаційно-технічних систем моніторингу стану сільськогосподарських угідь // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2014. – Ч.2, Вип. 196. – С. 111–122.

**Анотація.** В статті приведено структурно-функціональну схему технічної системи локального моніторингу електропровідних властивостей ґрунтової середовища з класифікацією аналого-цифрових і цифро-аналогових преобразовувачів і математичним апаратом, що використовуються для їх реалізації.

**Summary.** In the article it is resulted structural-functional diagram of the technical system of the local monitoring of electroprovidnih properties of the ground environment with classification of analog-digital and tsifro-analogovih transformers and mathematical vehicle, that are used for their realization.

Стаття надійшла до редакції 20 вересня 2015 р.