

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-38>

УДК 004.94

КРЕМНЬОВ Володимир

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0005-1149-2017>

kremnov.vo.v@nmu.one

ДЯЧЕНКО Григорій

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9105-1951>

diachenko.g@nmu.one

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ЗРОШЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Аграрна галузь на сьогоднішній день стикається з низкою екологічних, технологічних і економічних викликів як на глобальному рівні, так і в межах окремих держав. Попри вагомі досягнення в галузі селекції сільськогосподарських культур, загальні обсяги врожайності залишаються нестабільними та не демонструють сталої позитивної динаміки. Це зумовлено, зокрема, значною ерозією й виснаженням ґрунтів, зниженням рівня ґрунтових вод, а також нерациональним водокористуванням. Одним із найбільш потенційно ефективних та доцільних напрямків вирішення зазначеної проблеми є проведення науково-прикладних досліджень щодо формулювання і реалізації ефективних заходів до модернізації агротехнічної практики під час вирощування сільськогосподарських культур у польових умовах шляхом створення й використання комп'ютеризованих засобів предикативного контролю вологості ґрунту з автоматизованою підтримкою прийняття рішень. Основна мета статті полягає в обґрунтуванні напрямків техніко-технологічної модернізації аграрних підприємств із вирощування сільськогосподарських культур завдяки розробці та дослідженню комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту з урахуванням комплексного впливу інформативних і дестабілізуючих фізико-хімічних і біологічних параметрів. Об'єкт дослідження – процеси комп'ютеризованої предикативної обробки й аналізу вимірюваних даних щодо вологості ґрунту сільськогосподарських територій. Предмет дослідження – методи інтелектуалізованої програмної обробки даних щодо вологості ґрунту з урахуванням дестабілізуючих впливів. Основними результатами статті є: обґрунтоване математичне і алгоритмічне забезпечення досліджуваного методу; програмна реалізація комплексної предикативної обробки даних щодо динаміки вологи в ґрунті; обґрунтовані вимоги до оптимізації процесу зрошення ґрунту в польових умовах, що одержані шляхом комп'ютерного експерименту в середовищі Matlab & Simulink. Також у статті сформульовано перспективні напрямки розробок і досліджень із подальшого розвитку запропонованого методу комп'ютеризованого контролю вологості ґрунту під час вирощування сільськогосподарських культур.

Ключові слова: комп'ютеризований контроль, прогнозування, вологість, оптимізація, ґрунт, метод.

KREMNOV Volodymyr, DIACHENKO Grygorii

Dnipro University of Technology

A COMPUTERISED METHOD FOR OPTIMISING CROP IRRIGATION BASED ON PREDICTIVE SOIL MOISTURE CONTROL

The agricultural sector is currently facing many ecological, technological and economic challenges both globally and within individual countries. Despite significant achievements in crop breeding, overall yields remain unstable and do not show a sustainable positive trend. This is due, among other things, to significant soil erosion and depletion, a declining groundwater table, and unsustainable water use. One of the most potentially effective and appropriate ways to solve this problem is to conduct scientific and applied research to formulate and implement effective measures to modernise agrotechnical crop cultivation practices by creating and using computerised means for predictive soil moisture control with automated decision support. This article aims to substantiate the directions of technical and technological modernisation of agricultural enterprises engaged in growing crops through the development and research of a computerised method for predictive control of soil moisture, taking into account the comprehensive impact of informative and destabilising physical, chemical and biological parameters. The object of research is the processes of computerised predictive processing and analysis of measured data on soil moisture in agricultural areas. The subject of the study is methods of software-based intelligent processing of soil moisture data with consideration of destabilising effects. The main results of the article are as follows: substantiated mathematical and algorithmic provision of the studied method; software implementation of comprehensive predictive data processing on the dynamics of soil's moisture; substantiated requirements for optimisation of the soil irrigation process in the field conditions, obtained through a computer experiment in the Matlab & Simulink. The article also formulates promising areas of development and research for the further development of the proposed method of computerised soil moisture control during crop cultivation.

Keywords: computerised control, prediction, moisture, optimisation, soil, method.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ \ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У сьогоденних умовах прогресуючого дефіциту земельних ресурсів, що придатні для вирощування сільськогосподарських (с/г) культур, значної актуальності набуває питання практичної реалізації стратегії раціонального використання доступних с/г угідь. Така стратегія передбачає оптимізацію продуктивності без

необхідності подальшого масштабування оброблюваних площ, що стає критично важливим фактором під час забезпечення продовольчої безпеки. Графічну інтерпретацію статистичних даних [1], які характеризують динаміку оброблюваних с/г площ як у глобальному, так і в національному вимірі, представлено на рис. 1, що дозволяє проілюструвати загальну тенденцію низької стабілізації обсягів оброблюваних територій.

На підставі аналізу й систематизації даних, які наведено на рис. 1, можна зробити висновок, що глобальна інтенсифікація використання земельних ресурсів для аграрних цілей та одночасне скорочення с/г територій в національному масштабі обумовлюють нагальну необхідність розробки й упровадження ефективних технологій із оптимізації використання ресурсів під час вирощування с/г культур. Своєю чергою, світова практика, зокрема багаторічний досвід країн із високим рівнем розвитку технологій аграрного призначення, доводить, що запровадження науково обґрунтованих систем контролю та діагностування стану ґрунтів є одним із ключових чинників із забезпечення стійкого функціонування та розвитку агропромислового сектору. Ефективне управління земельними ресурсами, зокрема із застосуванням цифрових технологій і комп'ютерних аналітичних систем, здатне забезпечити як поточну ефективність виробництва, так і довготривалу стабільність агроecosystem.

З метою забезпечення ефективного та збалансованого використання ресурсів, зокрема водних, під час повного циклу агровиробництва с/г культур, критично необхідним є безперервний контроль сукупності агрофізичних і біологічних параметрів, що безпосередньо впливають на врожайність с/г культур. Вимірювані дані щодо цих параметрів є основою для релевантної підтримки прийняття рішень щодо оптимізації режимів поливу та інших агротехнічних процедур [2], як візуалізовано на рис. 2.

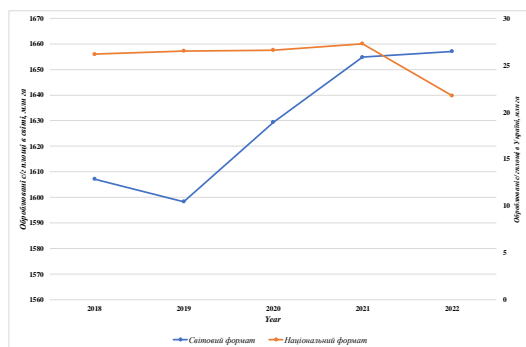


Рис. 1. Графічна інтерпретація динаміки оброблюваних площ у світі та Україні

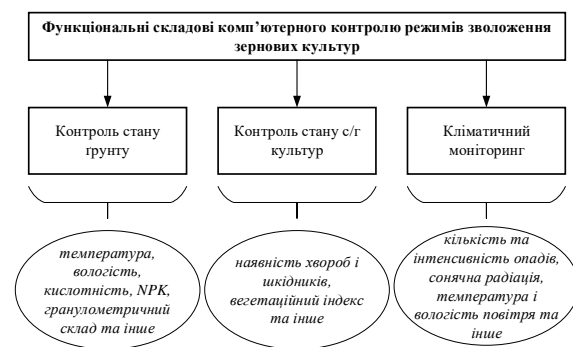


Рис. 2. Функціональні компоненти комп'ютерного предикативного контролю стану с/г об'єктів

Ключовим аспектом під час проектування та впровадження технологій і засобів автоматизованого зрошення ґрунту, керованих на основі інтеграції алгоритмів предикативного комп'ютерного контролю, є забезпечення раціоналізації агротехнічних операцій шляхом досягнення балансу між мінімізацією витрат трудових і природних ресурсів та максимізацією кількісних і якісних показників вирощеної с/г продукції [3].

Сучасні техніко-технологічні рішення в розрізі концепції комп'ютеризованого контролю динамічних процесів, зокрема зрошення ґрунту, передбачають багаторівневу інтеграцію сенсорних мереж, бездротових телекомунікаційних технологій та програмних інструментів інтелектуального аналізу даних. Такі системи дозволяють здійснювати цілодобовий збір, накопичення й обробку емпіричних показників стану ґрунту, водного балансу, фаз розвитку рослин і кліматичних умов у реальному часі. Зазначений комплексний підхід до синтезу методів і створення відповідних комп'ютерних систем дозволяє не лише оперативно реагувати на зміну зовнішніх умов, а й прогнозувати оптимальні сценарії поливу для досягнення сталого агровиробництва [4, 5].

Отже, основна мета статті полягає в обґрунтуванні напрямків техніко-технологічної модернізації аграрних підприємств із вирощування сільськогосподарських культур завдяки розробці та дослідженню комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту з урахуванням комплексного впливу інформативних і дестабілізуючих фізико-хімічних і біологічних параметрів. В якості об'єкту дослідження виступають процеси комп'ютеризованої предикативної обробки й аналізу вимірюваних даних щодо вологості ґрунту сільськогосподарських територій, а предметом дослідження є методи інтелектуалізованої програмної обробки даних щодо вологості ґрунту з урахуванням дестабілізуючих впливів.

ПІДХОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Функціональна основа методу комп'ютерного предикативного контролю вологості ґрунту під час вирощування с/г культур, що досліджується в цій статті, з математичної точки зору розглядається як розв'язання задачі оптимального керування [6], що забезпечує ефективне використання водних ресурсів під час поливу та підтримання цільової вологості ґрунту на заданій глибині. Технологічна суть такої задачі полягає у визначенні оптимальної інтенсивності поливу (л/год на 1 м²), що мінімізує відхилення фактичної

вологості конкретного шару ґрунту від бажаного рівня. Предиктивна модель прогнозує зміну стану ґрунту з урахуванням динаміки вологи, а цільовий функціонал визначає ефективність зрошення за критерієм відхилення від норми за формулою:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (W_{soil}(t) - W_{soil,ref}(t))^2 dt, \quad (1)$$

де $W_{soil}(t)$ – відносна вологість шару ґрунту, що аналізується, в момент часу t ; $W_{soil,ref}(t)$ – бажана відносна вологість шару ґрунту, що аналізується, в момент часу t ; t_0 – початковий момент часу детектування вологості; t_f – кінцевий момент часу детектування вологості.

Оптимізація режимів зрошення враховує динаміку вологорозподілу, змодельовану чисельним розв'язком нелінійного рівняння Річардса, а також обмеження на допустимий рівень вологості ґрунту та межі інтенсивності подачі води, що було детально досліджено і описано в науковій статті [7].

Динамічна оптимізація інтенсивності зрошення ґрунту здійснюється з урахуванням еволюції стану системи та граничних умов, із використанням методу *fmincon*, вбудованого до пакету MATLAB Optimization Toolbox [8], як описано нижче:

$$S = \text{fmincon}(J_d, s_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b, c_{eq}, options), \quad (2)$$

де J_d – цільова функція; s_0 – початкове припущення; A – матриця розмірністю $m \times n$ (m – кількість нерівностей, n – кількість змінних); b – лінійні нерівності, які задано у вигляді вектора дійсних чисел; A_{eq} – лінійні обмеження, що задані у вигляді матриці дійсних чисел; b_{eq} – лінійні нерівності, які задано у вигляді вектора дійсних чисел; l_b – нижня межа, яка задана у вигляді вектора або масиву дійсних чисел; u_b – верхня межа, яка задана у вигляді вектора або масиву дійсних чисел; c_{eq} – початкова розрахункова точка; *options* – оптимізаційні параметри.

Узагальнену графічну інтерпретацію методу комп'ютеризованого предикативного контролю вологості ґрунту, яку запропоновано на підставі вищенаведеного математичного опису, наведено на рис. 3. Розробку комп'ютеризованого методу виконано з урахуванням умов і обмежень, які зазначено в табл. 1.

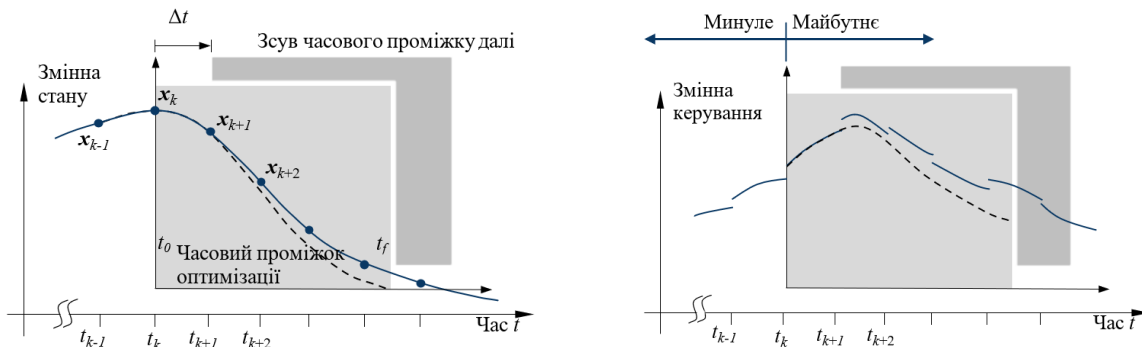


Рис. 3. Графічна інтерпретація запропонованого принципу предикативного контролю вологості ґрунту з адаптивним часовим інтервалом оптимізації

Таблиця 1.

Умови та обмеження, що застосовані під час розробки методу предикативного контролю

Обмеження й умови	Прийняті значення
С/г культури	ячмінь і пшениця
Фази вегетації с/г культур	перехід до зернового розвитку, колосіння та цвітіння
Аналізовані шари ґрунту	0,2 і 0,6 м
Джерела надходження вологи	опади, примусовий полив, капілярний підйом вологи з нижніх шарів ґрунту
Джерела втрат вологи	показник евапотранспірації для різних агроліматичних зон України: 0,08 мм/год; 0,16 мм/год та 0,32 мм/год [9]
Фільтраційні властивості ґрунту	різні типи чорнозему із коефіцієнтом фільтрації: 8,1 мм/год, 10,8 мм/год та 12,6 мм/год [10, 11]
Час моделювання	6 год
Гранична інтенсивність засобів поливу	5 л/год·м ² (початкове значення – 0,2 л/год)
Бажаний рівень вологості	70 % і 75 %

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Узагальнено алгоритмічне забезпечення розробленого методу оптимізації процесу предикативного контролю вологості ґрунту полягає в наступному:

1. Етап ініціалізації: визначення початкових умов вологості у різних шарах ґрунту $W_{soil}(z,0)$.
 2. Розв'язання рівняння Річардса щодо динаміки вологи методом чисельної апроксимації.
 3. Визначення оптимальних значень показника подачі поливної води за допомогою функції *fmincon* на аналізованому часовому проміжку. Під час цього етапу реалізується уточнення траєкторій вектору змінних, що керують процесом: інтенсивність поливу $S(t)$ на часовому інтервалі $t \in [t_k, t_k + (t_f - t_0)]$ з урахуванням обмежень на стан системи.
 4. Завершальний етап: за умови досягнення необхідної точності або ліміту ітерацій, перше отримане значення вектору траєкторії S^* використовується в якості сигналу керування.
 5. Ітераційне відпрацювання вищезазначеного алгоритму на наступному часовому кроці t_{k+1} задля виконання умови послідовної оптимізації.
- Розроблений та досліджений на підставі вищезазначеного алгоритму метод оптимізації зрошення с/г культур на основі предикативного контролю вологості ґрунту представлений у вигляді комп'ютерного застосунку, що був реалізований у середовищі Matlab & Simulink, як показано на рис. 4 і 5.

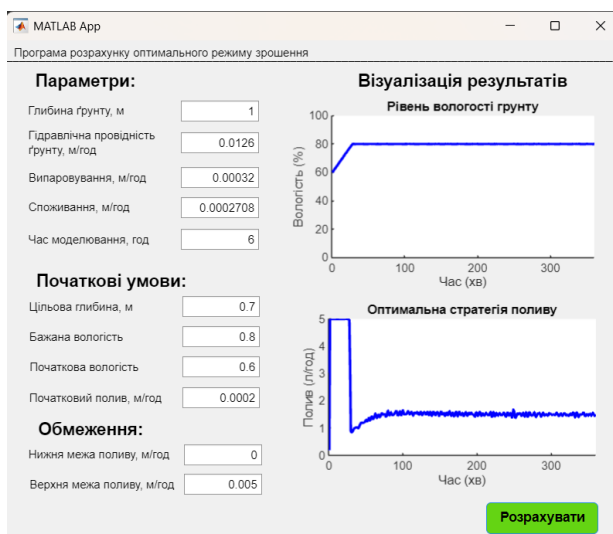


Рис. 4. Графічний інтерфейс комп'ютерного застосунку для оцінки оптимального режиму зрошення с/г культур

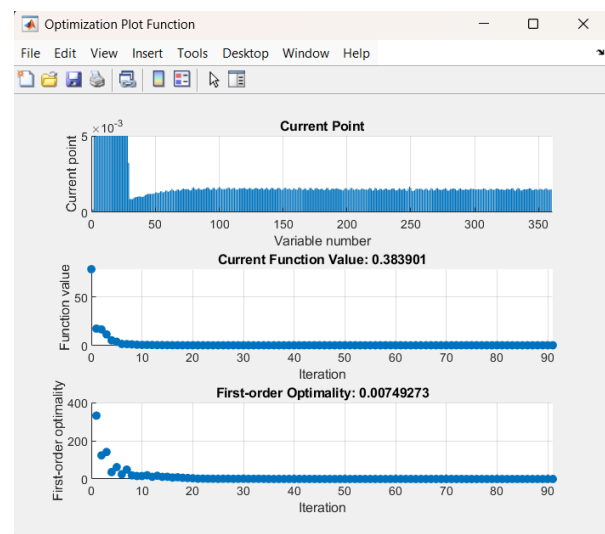


Рис. 5. Графічна інтерпретація процесу оптимізації під час пошуку параметрів агротехнічних процедур зрошення с/г культур

Основним прикладним призначення реалізації запропонованого методу предикативного контролю вологості ґрунту у формі Matlab-застосунку є досягнення й підтримання бажаного рівня вологості у конкретному шарі ґрунту (відповідає за локацію кореневої системи рослин на визначених фазах вегетації) в межах цільового значення. Цей комп'ютерний застосунок із відповідним графічним інтерфейсом (див. рис. 4) складається з наступних функціональних модулів:

- модуль завдання вхідних даних: дозволяє користувачам вносити дані щодо агрофізичних і біологічних показників, які характеризують умови вирощування;
- модуль обчислень: дозволяє на основі внесених вхідних даних визначити оптимальні показники керування процесом зрошення;
- модуль побудови графіків: візуалізує результати оптимізації процесу зрошення у форматі 2D-графіків із можливістю їх збереження.

Реалізацію програмного застосунку (рис. 4) виконано у відповідності до запропонованої Use-case діаграми, яка дозволяє ефективно адаптувати комп'ютерну реалізацію методу до практичного застосування, як показано на рис. 6. На цій діаграмі позначено:

1. Use case «1. Введення початкових даних»: Актори: користувач. Передумови: користувач ініціалізує роботу комп'ютерного застосунку. Основний сценарій: користувач вносить чисельні дані у відповідні поля застосунку. Пост-умови: кнопка «Розрахувати» стає активною за умови заповнення всіх необхідних полів. Альтернативні потоки: неповне заповнення полів або невірний формат даних – користувачу необхідно перевірити внесені дані.
2. Use case «2. Розрахунок оптимального зрошення»: Актори: користувач. Передумови: користувач коректно вніс числові дані у відповідні поля застосунку. Основний сценарій: користувач має натиснути кнопку «Розрахувати», після цього застосунок зчитує відповідні значення в полях та викликає функцію обчислення показників оптимального режиму зрошення для досягнення й підтримання вологи ґрунту на бажаному рівні. Протікання цього процесу відображається у реальному часі з графічною візуалізацією. Пост-

умови: будуються два 2D-графіки, що характеризують динаміку вологості ґрунту та оптимальної стратегії автоматизованого поливу. Альтернативні потоки: рішення не знайдено – користувач має виконати перевірку щодо коректності внесених даних та запустити повторно зазначену вище процедуру.

3. Use case «3. Збереження результатів»: Актори: користувач. Передумови: рішення задачі предикативної оптимізації було знайдено та побудовано відповідні графіки. Основний сценарій: користувач має можливість реалізації наступного функціоналу: «Зберегти як...» / «Копіювати як зображення...» / «Копіювати як векторну графіку...».

Відповідна UML-діаграма класів, що відображає функціональну будову MATLAB-застосунку, наведена на рис. 7. Ця діаграма включає: клас `app1` з наслідуванням від `matlab.apps.AppBase`; приватні властивості UI-компонентів (`Label`, `EditField` та `UIAxes`); властивості для зберігання користувацьких налаштувань; властивості для зберігання отриманих результатів; публічні й приватні методи.

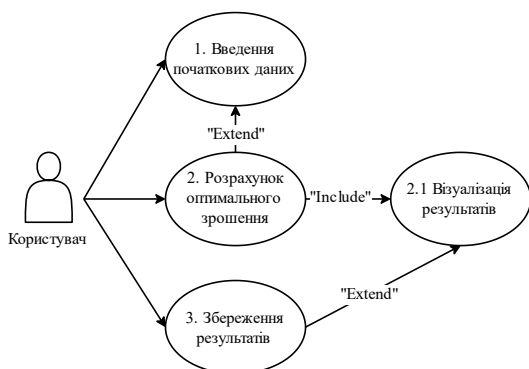


Рис. 6. Use-case діаграма комп'ютерної реалізації досліджуваного методу предикативного контролю вологості

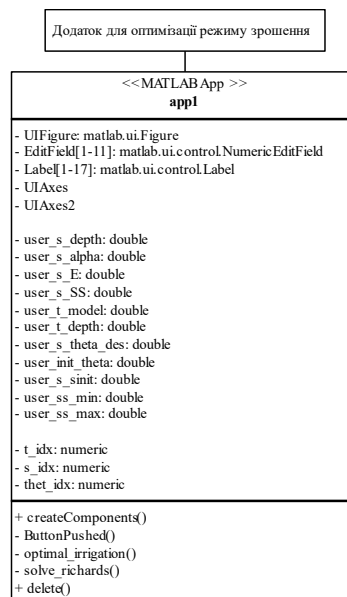


Рис. 7. UML-діаграма класів Matlab-застосунку щодо комп'ютерної реалізації досліджуваного методу предикативного контролю вологості

Отже, на підставі проведених досліджень із розробки та тестування Matlab-застосунку, що реалізує комп'ютеризований метод предикативного контролю вологості ґрунту під час повного циклу вирощування с/г культур, можна стверджувати, що запропоноване програмне рішення забезпечує імітацію та оцінку ефективності агропроцедур автоматизованого зрошення з урахуванням властивостей ґрунту та потреб конкретної культури на всіх стадіях вегетації, слугуючи дієвим інструментом для автоматизованої підтримки прийняття рішень із оптимізації використання водних ресурсів.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У контексті цієї статті було проведено дослідження з розв'язання актуальної науково-прикладної задачі щодо розробки алгоритмічних засад і програмної реалізації методу предикативного комп'ютерного контролю вологості ґрунту під час вирощування сільськогосподарських культур у польових умовах, який може бути застосований у цілях оптимізації використання водних ресурсів під час агротехнічних процедур зрошення. Основні результати досліджень полягають у наступному:

1. Запропоновано математичний опис і алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту сільськогосподарських територій з урахуванням факторів типу ґрунту, агрокліматичних умов, а також характеристик випаровування та вологоспоживання культур. Оптимізацію методу контролю показників зрошення ґрунту здійснено на основі функції `fmincon` MATLAB Optimization Toolbox, що враховує нелінійність процесу й обмеження на інформативні та дестабілізуючі змінні.

2. Розроблено інтерактивний програмний інтерфейс у середовищі MATLAB, який забезпечує інтуїтивно зрозуміле внесення вихідних даних, точний розрахунок оптимальних режимів поливу та графічну візуалізацію одержаних результатів.

3. Результати комп'ютерного експерименту щодо аналізу розробленого предикативного методу засвідчили здатність запропонованого підходу підтримувати цільовий рівень вологості в різних шарах ґрунту

в умовах змінних агрокліматичних параметрів, типів ґрунту, а також видів і фаз розвитку сільськогосподарських культур. Оптимізований процес подачі води під час поливу дозволяє знизити відхилення вологості від цільових значень та раціоналізувати використання водних ресурсів.

4. Перспективами подальшого розвитку запропонованого комп'ютеризованого методу є реалізація на його основі вбудованих до мікроконтролерної техніки програмних компонент, що реалізують техніку периферійних обчислень та оптимізації споживання водних ресурсів у складі комплексів цифровізації агротехнічних процесів польового вирощування сільськогосподарських культур у різних агрокліматичних зонах.

ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження цієї статті виконано в розрізі науково-дослідної теми «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час» (0124U000289), що виконується на замовлення Міністерства освіти і науки України.

Література

1. FAOSTAT: Food and agriculture organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
2. Abioye E.A., Abidin M.S.Z., Mahmud M.S.A., Buyamin S., Ishak M.H.I., Abd Rahman M.K.I., Otuoze A.O., Onotu P., Ramli M.S.A. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 173. P. 1–22.
3. FAO: The practice of irrigation. URL: <https://www.fao.org/4/t0231e/t0231e03.htm>
4. Gamal Y., Soltan A., Said L.A., Madian A.H., Radwan A.G. Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1–13.
5. Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabarlak K., Shedlovska Y. A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 225. P. 1–31.
6. Macki J., Strauss A. Introduction to Optimal Control Theory. NY: Springer New York, 2012. 168 p.
7. Дяченко Г., Кремньов В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 3. С. 136–141.
8. Find minimum of constrained nonlinear multivariable function – MATLAB fmincon. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>
9. EOS DATA ANALYTICS: Евапотранспірація як процес та методи її вимірювання. URL: <https://eos.com/uk/blog/evapotranspiratsiia/>
10. Карти України: Фільтрація ґрунтів. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-6.html>
11. Велика Українська Енциклопедія: Аерація ґрунту. URL: https://vue.gov.ua/Аерація_ґрунту

References

1. FAOSTAT: Food and agriculture organization of the United Nations. Retrieved from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
2. Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., Ishak, M.H.I., Abd Rahman, M.K.I., Otuoze, A.O., Onotu, P., Ramli, M.S.A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 173, 1–22.
3. FAO: The practice of irrigation. Retrieved from: <https://www.fao.org/4/t0231e/t0231e03.htm>
4. Gamal, Y., Soltan, A., Said, L.A., Madian, A.H., Radwan, A.G. (2016). Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*, Vol. 4, 1–13.
5. Laktionov, I., Diachenko, G., Kashtan, V., Vizniuk, A., Gorev, V., Khabarlak, K., Shedlovska, Y. (2024). A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 225, 1–31.
6. Macki, J., Strauss, A. (2012). Introduction to Optimal Control Theory. NY: Springer New York. 168 p.
7. Diachenko, G., Kremnov, V. (2024). Mathematical and computer modelling of the process of computerised predictive control of soil irrigation modes during grain crops cultivation. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 136–144.
8. Find minimum of constrained nonlinear multivariable function – MATLAB fmincon. Retrieved from: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>
9. EOS DATA ANALYTICS: Evapotranspiratsiia yak protses ta metody yii vymiriuvannia [Evapotranspiration as a process and methods of its measurement]. Retrieved from: <https://eos.com/uk/blog/evapotranspiratsiia/> [in Ukrainian].
10. Karty Ukrainy: Filtratsiia gruntiv [Maps of Ukraine: Soil filtration]. Retrieved from: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-6.html> [in Ukrainian].
11. Velyka Ukrainaska Entsyklopediia: Aeratsiia gruntu [The Great Ukrainian Encyclopedia: Soil aeration]. Retrieved from: https://vue.gov.ua/Аерація_ґрунту [in Ukrainian].