ISSN 3154-8059

УДК 631.5 https://doi.org/10.31713/vs3202621

Ковальчук Н. С. [1; ORCID ID: 0000-0003-2495-7731],
к.с.-г.н., доцент,
Єфимов Є. В. [1; ORCID ID: 0009-0009-4280-2419],
здобувач вищої освіти третього
(освітньо-наукового) рівня

[1]Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КОНОПЕЛЬ ТЕХНІЧНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті наведено детальні результати комплексного дослідження шляхів оптимізації елементів технології вирощування конопель технічних (*Cannabis sativa L.*) на сільськогосподарських ділянках із застосуванням сучасних систем точного землеробства (Precision Agriculture). Дослідження спрямоване на вирішення гострих агрономічних проблем, на тлі глобальних кліматичних змін та нерівномірного розподілу атмосферних опадів ці фактори суттєво обмежують реалізацію високого біологічного потенціалу технічних конопель, які є високорентабельною культурою для текстильної, паперової, будівельної та фармацевтичної галузей.

У роботі представлено розширену багатофакторну схему польових експериментів, у якій проводиться порівняльний аналіз ефективності традиційної екстенсивної технології (богарне землеробство з разовим внесенням мінеральних добрив) та інноваційних оптимізованих систем. Головний акцент зроблено на застосуванні інтелектуального автоматизованого крапельного зрошення (фертигації). Інноваційна складова дослідження базується на розгортанні IoT-інфраструктури, що функціонує в режимі реального часу. Керування процесами здійснюється на основі безперервного потоку даних з мережі заглибних ґрунтових датчиків, які фіксують рівень вологості, pH та електропровідність (EC) ґрунтового розчину. Враховуючи специфіку роботи в польових умовах (довгі кабельні траси, робота потужних насосів), розроблено та імплементовано алгоритм програмної фільтрації шумів з аналогових датчиків. Це дозволяє ефективно очищати телеметричні дані від перешкод, запобігаючи критичним похибкам автоматики при дозуванні води та поживних речовин. За результатами польових експериментів беззаперечно доведено високу агрономічну, екологічну та економічну ефективність запропонованого апаратно-програмного комплексу.

Встановлено, що впровадження IoT-фертигації з вейвлет-очищенням сенсорних сигналів дозволило збільшити врожайність сухої

біомаси стебел, що на 77,9% перевищує показники контрольного варіанта. Крім того, зафіксовано підвищення технічної довжини стебла до 192,5 см та забезпечення виходу якісного волокна на рівні 32,4%. Зроблено обґрунтований висновок про безумовну доцільність переходу до автоматизованих систем поливу, які дозволяють повністю нівелювати вплив несприятливих ґрунтово-кліматичних факторів, гарантують раціональне використання водних ресурсів, оптимізують мінеральне живлення та надійно захищають ґрунти від процесів вторинного засолення або вимивання поживних речовин у глибинні горизонти.

***Ключові слова*:** оптимізація технології; коноплі технічні; крапельне зрошення; фертигація; схема досліду; автоматизація; IoT.

Актуальність теми. Технічні коноплі є високорентабельною культурою багатоцільового використання, що забезпечує сировиною текстильну, паперову, будівельну та фармацевтичну промисловості. Проте нестабільність кліматичних умов та часті ґрунтові посухи в критичні фази розвитку рослин вимагають перегляду традиційних підходів до вирощування рослин.

Умови лісостепової зони характеризуються переважанням легких за гранулометричним складом темно-сірих, сірих та опідзолених ґрунтів. Їхня низька буферність, підвищена кислотність та нездатність утримувати вологу тривалий час призводять до того, що мінеральні добрива, внесені врозкид, швидко вимиваються або переходять у недоступні для рослин форми. Оптимізація технології в таких умовах неможлива без впровадження систем точного землеробства, зокрема автоматизованого крапельного зрошення з одночасним внесенням поживних речовин (фертигації).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання агротехніки та підвищення продуктивності технічних конопель широко висвітлюються в сучасній науковій літературі [1–5]. Більшість класичних досліджень зосереджені на традиційних методах вирощування, які показують високу ефективність переважно у сприятливих ґрунтово-кліматичних зонах зі стабільним рівнем зволоження. Водночас оптимізація вирощування цієї культури в специфічних умовах лісостепової зони залишається недостатньо розкритою. Як зазначають дослідники [6], темно-сірі, сірі та опідзолені ґрунти цього регіону мають специфічні фізико-хімічні властивості, що суттєво обмежує дієвість традиційного землеробства.

Для розв'язання проблеми дефіциту вологи та нераціонального використання добрив світова аграрна наука все частіше адаптує концепції точного землеробства [7]. Чимало праць доводять переваги систем крапельного зрошення та фертигації, які забезпечують

 ISSN 3154-8059

локальну доставку поживних речовин. Однак впровадження інтелектуальних IoT-систем безперервного моніторингу стану ґрунту на ділянках часто ускладнюється апаратними похибками. У польових умовах через значну довжину кабельних ліній та роботу потужних насосів на аналогові лінії передачі даних від ґрунтових датчиків (зокрема показників EC та pH) наводяться електромагнітні шуми [8]. Спотворення цих даних може призводити до критичних помилок автоматики: перезволоження або засолення ґрунту через подачу зайвих добрив.

У сфері цифрової обробки сигналів дієвим методом усунення таких перешкод є алгоритми дискретного вейвлет-перетворення [9]. Хоча розробка алгоритмів програмної фільтрації шумів є поширеною в технічних галузях, їхня комплексна інтеграція безпосередньо в мікроконтролери аграрних систем залишається малодослідженою [10]. Відтак, наявна прогалина у поєднанні сучасних методів обробки даних із практичними агрономічними завданнями, що вимагає проведення комплексних польових експериментів.

Метою дослідження є обґрунтування оптимальних елементів технології вирощування технічних конопель шляхом інтеграції систем безперервного моніторингу стану ґрунту та інтелектуального керування поливом на базі сучасних методів обробки даних.

Результати та їх обговорення. Польові дослідження проводились протягом 2025–2026 років на дослідній ділянці, яка розташована на території Привільненської сільської ради Дубенського району Рівненської області, неподалік Дубна. Ґрунт дослідної ділянки – темно-сірий, сірий та опідзолений. Об'єктом дослідження були рослини технічної коноплі сорту «Гляна», адаптованого для вирощування на волокно та насіння.

Для оцінки ефективності оптимізації елементів вологозабезпечення та живлення було розроблено багатофакторну схему польового досліду (табл. 1). Загальну площу дослідного поля поділено на ділянки по 50 м^2 кожна (повторність чотириразова).

Таблиця 1

Схема проведення польового досліду з оптимізації технології вирощування

Варіант досліду	Спосіб зволоження	Технологія мінерального живлення та керування
Варіант 1 (Контроль)	Природне (богарне) зволоження, залежне від опадів	Традиційна технологія: одноразове внесення сухих гранульованих добрив (N60P45K45) під передпосівну культивацію

продовження табл. 1

Варіант 2	Крапельне зрошення (подача чистої води)	Традиційне основне внесення добрив (N60P45K45) + полив за заданим часовим таймером без урахування фактичної вологості ґрунту
Варіант 3	Крапельне зрошення з ручним керуванням	Ручна фертигація (подача добрив з поливною водою). Полив і живлення здійснюються на основі візуальної оцінки та метеопрогнозів
Варіант 4 (Оптимізована технологія)	Автоматизоване крапельне зрошення	Повна оптимізація: Інтелектуальна фертигація на основі даних мережі ґрунтових датчиків (вологість, pH, EC ґрунтового розчину) з програмною фільтрацією завад сигналу

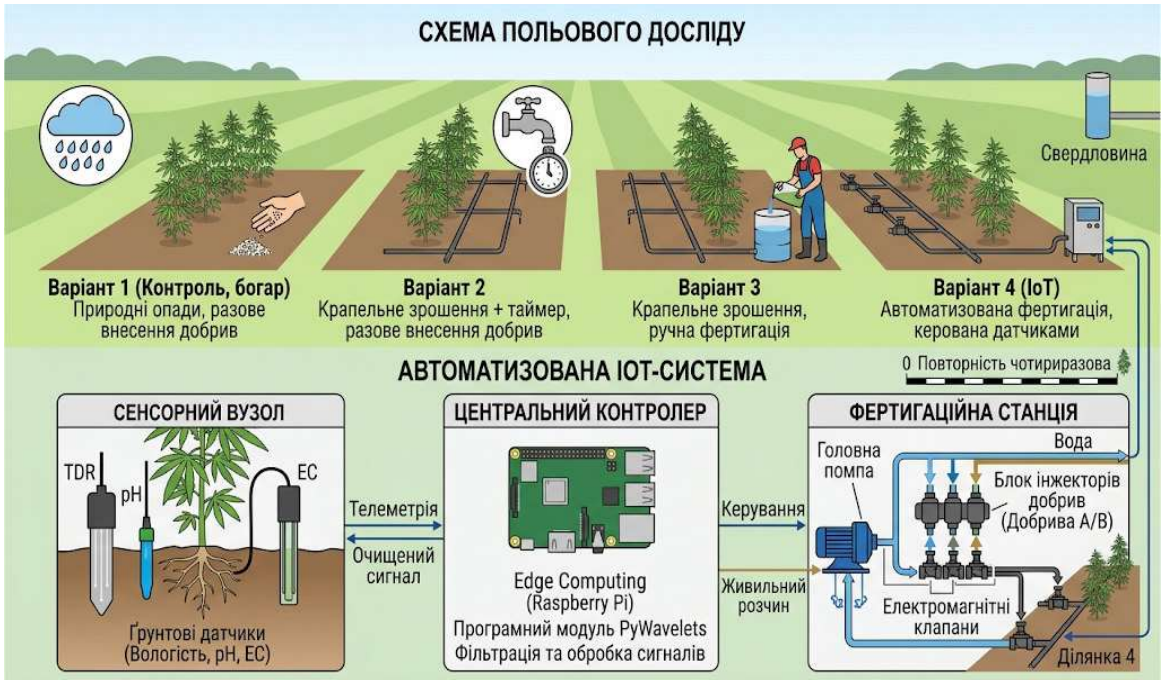


Рисунок. Графічна схема польового досліду та архітектура автоматизованої IoT-системи

На схемі візуалізовано чотири варіанти досліду: від традиційного богарного землеробства з разовим внесенням добрив

ISSN 3154-8059

(Варіант 1) до повної автоматизації (Варіант 4). Деталізовано структуру автоматизованої IoT-системи, яка складається з трьох ключових блоків: 1) **Сенсорний вузол** – заглибні ґрунтові датчики (вологість TDR, pH, EC), що збирають первинну телеметрію з кореневої зони рослин; 2) **Центральний контролер** – обчислювальний модуль (на базі Raspberry Pi), який здійснює програмну фільтрацію сигналів за допомогою алгоритмів PyWavelets та розраховує потребу в живленні; 3) **Фертигаційна станція** – вузол виконавчих механізмів (головна помпа, блок інжекторів добрив A/B, електромагнітні клапани), який безпосередньо формує та подає скоригований живильний розчин на дослідну ділянку.

Оптимізація технології у Варіанті 4 базується на розгортанні IoT-інфраструктури безпосередньо на сільськогосподарському полі, що дозволяє реагувати на дефіцит вологи та елементів живлення в режимі реального часу.

Архітектура польової системи моніторингу та фертигації:

–*Польовий сенсорний вузол*: метеостанція (опади, температура, сонячна радіація). Заглибні датчики ґрунту: вологість (TDR-сенсори), ґрунтовий pH-метр, датчик електропровідності (EC) ґрунтового розчину. Датчики встановлені у кореневій зоні на глибинах 15 см та 30 см.

–*Центральний контролер*: мікрокомп'ютер Raspberry Pi, розміщений у захищеному щиті біля помпової станції. Виконує алгоритми обробки сигналів для усунення перешкод від довгих кабельних ліній та роботи потужних насосів.

–*Розподільчий вузол (Фертигаційна станція)*: головний водяний насос із забором води зі свердловини/резервуара. Вузол інжекторів (Вентурі або дозатрони) для пропорційного підмішування рідких добрив у магістраль. Електромагнітні клапани для розподілу розчину по поливних зонах поля.

У польових умовах довжина кабелів від датчиків до контролера може сягати десятків метрів. Це призводить до наведення електромагнітних шумів на аналогові лінії передачі даних (особливо показників EC та pH ґрунту). Спотворені дані можуть призвести до подачі зайвих добрив і засолення ґрунту або до перезволоження ділянки.

Для розв'язання цієї проблеми в програмне забезпечення контролера (на базі мови Python) було інтегровано алгоритм дискретного вейвлет-перетворення із застосуванням бібліотек NumPy, Polars та PyWavelets. Це дозволяє ефективно згладжувати

стрибки даних без втрати чутливості до реальних змін вологості чи засоленості ґрунту.

Впровадження системи автоматизованої фертигації на ділянках кардинально змінило умови формування врожаю. В табл. 2–6 наведено результати вимірювань біометричних показників та структури врожаю з урахуванням впливу оптимізації елементів технології на біометричні показники та структуру врожаю у ґрунті.

Результати засвідчили, що традиційна технологія (Варіант 1) в умовах лісостепової зони не забезпечує достатнього зволоження, що призводить до пригнічення росту рослин (середня висота 165,2 см, урожайність 6,8 т/га). Використання автоматизованої фертигації з урахуванням показників ґрунтових датчиків (Варіант 4) дозволило збільшити врожайність біомаси до 12,1 т/га (на 77,9% більше за контроль), а технічна довжина стебла зросла до 192,5 см, що є ключовим параметром для текстильної промисловості.

Таблиця 2

Висота рослин перед збиранням, см

Варіант досліду	Повт. 1	Повт. 2	Повт. 3	Повт. 4	Сума	Середнє	Сума квадратів $\Sigma(x - \bar{x})^2$
Варіант 1 (Контроль)	163,2	166,2	164,2	167,2	660,8	165,2	10,0
Варіант 2 (Таймер)	186,5	189,5	187,5	190,5	754,0	188,5	10,0
Варіант 3 (Ручна)	208,3	211,3	209,3	212,3	841,2	210,3	10,0
Варіант 4 (IoT)	226,6	229,6	227,6	230,6	914,4	228,6	10,0
Сума по повторностях	**784,6**	**796,6**	**788,6**	**800,6**	**ΣΣx = 3170,4**	**x̄_заг = 198,15**	**Σ = 40.0**
						НІР 0,05 (см) =	**3,37**

ISSN 3154-8059

Таблиця 3

Технічна довжина стебла, см

Варіант досліду	Повт. 1	Повт. 2	Повт. 3	Повт. 4	Сума	Середнє	Сума квадратів $\Sigma(x - \bar{x})^2$
Варіант 1 (Контроль)	120,4	121,9	120,9	122,4	485,6	121,4	2,5
Варіант 2 (Таймер)	144,3	146,8	145,3	146,8	583,2	145,8	4,5
Варіант 3 (Ручна)	169,1	171,1	170,1	170,1	680,4	170,1	2,0
Варіант 4 (IoT)	190,5	192,5	193,5	193,5	770,0	192,5	6,0
Сума	**624,3**	**632,3**	**629,8**	**632,8**	**ΣΣx = 2519.2**	**$\bar{x}$_заг = 157,45**	**Σ = 15,0**
						НІР 0,05 (см) =	**2,06**

Таблиця 4

Діаметр стебла на рівні 1/3 висоти, мм

Варіант досліду	Повт. 1	Повт. 2	Повт. 3	Повт. 4	Сума	Середнє	Сума квадратів $\Sigma(x - \bar{x})^2$
Варіант 1 (Контроль)	9,3	9,6	9,4	9,7	38,0	9,5	0,1
Варіант 2 (Таймер)	11,0	11,3	11,1	11,4	44,8	11,2	0,1
Варіант 3 (Ручна)	12,6	12,9	12,7	13,0	51,2	12,8	0,1
Варіант 4 (IoT)	14,1	14,4	14,2	14,5	57,2	14,3	0,1
Сума	**47,0**	**48,2**	**47,4**	**48,6**	**ΣΣx = 191,2**	**$\bar{x}$_заг = 11,95**	**Σ = 0,4**
						НІР 0,05 (см) =	**0,33**

Таблиця 5

Вихід всього волокна, %

Варіант досліду	Повт. 1	Повт. 2	Повт. 3	Повт. 4	Сума	Середнє	Сума квадратів $\Sigma(x - \bar{x})^2$
Варіант 1 (Контроль)	25,7	26,3	25,9	26,5	104,4	26,1	0,4
Варіант 2 (Таймер)	27,9	28,5	28,1	28,7	113,2	28,3	0,4
Варіант 3 (Ручна)	30,1	30,7	30,3	30,9	122,0	30,5	0,4
Варіант 4 (IoT)	32,0	32,6	32,2	32,8	129,6	32,4	0,4
Сума	**115,7**	**118,1**	**116,5**	**118,9**	**ΣΣx = 469,2**	**$\bar{x}$_заг = 29,325**	**Σ = 1,6**
						НІР 0.05 (%) =	**0.67**

Таблиця 6

Урожайність сухої біомаси, т/га

Варіант досліду	Повт. 1	Повт. 2	Повт. 3	Повт. 4	Сума	Середнє	Сума квадратів $\Sigma(x - \bar{x})^2$
Варіант 1 (Контроль)	6,6	6,9	6,7	7,0	27,2	6,8	0,1
Варіант 2 (Таймер)	8,3	8,6	8,4	8,7	34,0	8,5	0,1
Варіант 3 (Ручна)	10,0	10,3	10,1	10,4	40,8	10,2	0,1
Варіант 4 (IoT)	11,9	12,2	12,0	12,3	48,4	12,1	0,1
Сума	**36,8**	**38,0**	**37,2**	**38,4**	**ΣΣx = 150,4**	**$\bar{x}$_заг = 9,4**	**Σ = 0,4**
						НІР 0,05 (т/га) =	**0,33**

 ISSN 3154-8059

Таблиця 7

Динаміка приросту висоти рослин, см по тижнях вегетації

Тиждень / Варіант	2 тиж.	4 тиж.	6 тиж.	8 тиж.	10 тиж.	12 тиж. (Збирання)
Варіант 1 (Контроль)	12	30	55	85	130	165
Варіант 2	14	36	72	115	155	188
Варіант 3	16	42	90	145	180	210
Варіант 4 (IoT)	18	50	108	165	205	228
НІР05, см	2,6	5,8	12,7	18,2	20,3	21,1

Динаміка наростання вегетативної маси, представлена у табл. 7, підтверджує ефективність оптимізації. В умовах (Варіант 1) фіксувалося різке сповільнення росту на 6–8 тижнях, що збіглося з періодом літньої посухи. Натомість Варіант 4 демонстрував стабільний та прогнозований приріст завдяки постійній підтримці оптимальної вологості (на рівні 70–80% від НВ) та дозованій подачі азоту й калію.

Висновки:

1. Оптимізація технології вирощування технічних конопель вимагає відмови від традиційного богарного землеробства на користь систем автоматизованого крапельного зрошення та фертигації. Це дозволяє нівелювати вплив бідних супіщаних ґрунтів та нестабільності атмосферних опадів.

2. Розроблена схема польового досліду продемонструвала, що впровадження IoT-системи, керованої даними ґрунтових датчиків (Варіант 4), забезпечує найвищу економічну та агрономічну віддачу. Урожайність сухої біомаси стебел зросла до 12,1 т/га, а вихід якісного волокна збільшився до 32,4%, що значно перевищує показники контролю.

3. Застосування алгоритмів вейвлет-фільтрації (на базі PyWavelets та NumPy) довело свою ефективність для усунення польових перешкод на лініях зв'язку ґрунтових датчиків. Очищення сигналів ЕС та вологості дозволило контролеру ухвалювати високоточні рішення щодо тривалості поливних циклів, запобігаючи нераціональним витратам води, вимиванню добрив та засоленню кореневої зони.

1. Лайко І. М., Міщенко С. В., Кириченко Г. І. Особливості популяцій сортів конопель з різним складом канабіноїдних сполук. *Фактори експериментальної еволюції організмів.* 2023. Т. 33. С. 42–46. DOI: https://doi.org/10.7124/FEEO.v33.1563 **2.** Бойко Г. А., Максимченко Ю. О., Случинський Є. О. Аналіз впливу вологозабезпечення на якість трести технічних конопель. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2025. № 44. С. 13–19. DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1221-2025-44-02 **3.** Кузнецов М. В. Формування якості луб'яного волокна конопель залежно від умов зволоження. *Наукові праці Інституту луб'яних культур НААН*. 2022. Вип. 18. С. 65–74. **4.** Li Y., Wang J., Zhang H. Effects of soil moisture on retting process and fiber quality of industrial hemp. *Textile Research Journal*. 2023. Vol. 93. No. 5–6. P. 721–734. DOI: https://doi.org/10.1177/00405175221124567. **5.** Netafim USA. Irrigation for Hemp Production – Meeting Hemp Water Requirements. *Precision Agriculture Systems*. 2023. URL: https://www.netafim.com/en-sd/precision-irrigation/ (дата звернення: 04.08.2026). **6.** Подзерей Р. В. Оцінка придатності ґрунтів для виробництва органічної продукції рослинництва на місцевому рівні облаштування території. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 1. С. 123–131. DOI: https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.27854. **7.** Liakos K. G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 8. P. 2674. DOI: https://doi.org/10.3390/s18082674 **8.** Kumari S., Ali N., Dagati M., Dong Y. IoT-Enabled Soil Moisture and Conductivity Monitoring Under Fertigation. *AgriEngineering.* 2025. Vol. 7(7). P. 207. DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering7070207 **9.** Kou X., Zhou Y., Chen Q., Pang H., Sun B. A Wavelet-Based Elevation Angle Selection Method for Soil Moisture Retrieval Using GNSS-IR. *Sensors*. 2025. Vol. 25(18). P. 5609. DOI: https://doi.org/10.3390/s25185609 **10.** Qin Zengguang, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Wavelet Denoising Method for Improving Detection Performance of Distributed Vibration Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012. Vol. 24(7). P. 542–544. DOI: https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2182643.

REFERENCES:

1. Laiko I. M., Mishchenko S. V., Kyrychenko H. I. Osoblyvosti populiatsii sortiv konopel z riznym skladom kanabinoidnykh spoluk. *Faktory eksperymentalnoi evoliutsii orhanizmiv*. 2023. T. 33. S. 42–46. DOI: https://doi.org/10.7124/FEEO.v33.1563 **2.** Boiko H. A., Maksymchenko Yu. O., Sluchynskyi Ye. O. Analiz vplyvu volohozabezpechennia na yakist tresty tekhnichnykh konopel. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2025. № 44. S. 13–19. DOI: https://doi.org/10.32782/2522-1221-2025-44-02 **3.** Kuznetsov M. V. Formuvannia yakosti lubianoho volokna konopel zalezhno vid umov zvolozhennia. *Naukovi pratsi Instytutu lubianykh kultur NAAN*. 2022. Vyp. 18. S. 65–74. **4.** Li Y., Wang J., Zhang H. Effects of soil moisture on retting process and fiber quality of industrial hemp. *Textile Research Journal*. 2023. Vol. 93. No. 5–6. P. 721–734. DOI: https://doi.org/10.1177/00405175221124567. **5.** Netafim USA. Irrigation for Hemp Production – Meeting Hemp Water Requirements. *Precision Agriculture Systems*. 2023. URL: https://www.netafim.com/en-sd/precision-irrigation/ (data zvernennia: 04.08.2026). **6.** Podzerei R. V. Otsinka prydatnosti gruntiv dlia vyrobnytstva orhanichnoi produktsii roslynnytstva na mistsevomu rivni oblashtuvannia

terytorii. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*. 2023. № 1. S. 123–131. DOI: https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.27854. **7.** Liakos K. G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 8. P. 2674. DOI: https://doi.org/10.3390/s18082674 **8.** Kumari S., Ali N., Dagati M., Dong Y. IoT-Enabled Soil Moisture and Conductivity Monitoring Under Fertigation. *AgriEngineering.* 2025. Vol. 7(7). P. 207. DOI: https://doi.org/10.3390/agriengineering7070207 **9.** Kou X., Zhou Y., Chen Q., Pang H., Sun B. A Wavelet-Based Elevation Angle Selection Method for Soil Moisture Retrieval Using GNSS-IR. *Sensors*. 2025. Vol. 25(18). P. 5609. DOI: https://doi.org/10.3390/s25185609 **10.** Qin Zengguang, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Wavelet Denoising Method for Improving Detection Performance of Distributed Vibration Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012. Vol. 24(7). P. 542–544. DOI: https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2182643.

Kovalchuk N. S. [1; ORCID ID: 0000-0003-2495-7731],
Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Yefymov Ye. V. [1; ORCID ID: 0009-0009-4280-2419],
Post-graduate Student

[1]*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

OPTIMIZATION OF ELEMENTS OF INDUSTRIAL HEMP CULTIVATION TECHNOLOGY USING INFORMATION SYSTEMS

The article presents detailed results of a comprehensive study on ways to optimize the elements of industrial hemp (Cannabis sativa L.) cultivation technology on agricultural plots using modern Precision Agriculture systems. The research aims to solve acute agronomic problems; against the background of global climate change and uneven distribution of atmospheric precipitation, these factors significantly limit the realization of the high biological potential of industrial hemp, which is a highly profitable crop for the textile, paper, construction, and pharmaceutical industries.

The paper presents an expanded multifactorial scheme of field experiments conducting a comparative analysis of the effectiveness of traditional extensive technology (rainfed farming with a single application of mineral fertilizers) and innovative optimized systems. The main emphasis is placed on the application of intelligent automated drip irrigation (fertigation). The innovative component of the research is based on the deployment of an IoT infrastructure operating in real-time. Process control is executed based on a continuous stream of data from a network of underground soil sensors that record the moisture level, pH, and electrical conductivity (EC) of the soil solution. Considering the specifics of operating in field conditions (long cable routes, operation of powerful pumps), an algorithm for software noise

filtering from analog sensors was developed and implemented. This allows for the effective cleaning of telemetric data from interference, preventing critical automation errors during water and nutrient dosing. Based on the results of field experiments, the high agronomic, environmental, and economic efficiency of the proposed hardware and software complex has been unconditionally proven.

It was established that the implementation of IoT fertigation with wavelet cleaning of sensor signals allowed for an increase in the yield of dry stem biomass, exceeding the control variant by 77.9%. In addition, an increase in the technical stem length to 192.5 cm and the provision of a high-quality fiber yield at the level of 32.4% were recorded. A well-founded conclusion is drawn regarding the absolute feasibility of transitioning to automated irrigation systems, which completely neutralize the impact of adverse soil and climatic factors, guarantee the rational use of water resources, optimize mineral nutrition, and reliably protect soils from processes of secondary salinization or the leaching of nutrients into deep horizons.

Keywords: technology optimizatio; industrial hemp; drip irrigation fertigation; experiment design; automation; IoT.

Отримано / Received: 20.08.2026
Прийнято до друку / Accepted: 17.09.2026
Опубліковано / Published: 18.09.2026

© 2026 [Kovalchuk N. S., Yefymov Ye. V.]. Licensee {NUWEE}. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org)