

УДК 004.85:519.8

ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ

*Павло Луб, к.т.н., Валентин Смолінський, к.е.н., Роман Падюка, к.т.н.,
Олег Боярчук, к.т.н., Володимир Станько, к.е.н.*

Львівський національний університет природокористування

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: pollylub@ukr.net, smolwalent@gmail.com, padyukaroman@gmail.com, boyarchuko@ukr.net,
wlad.stanko@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.191>

Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки ухвалення рішень

Означено передумови застосування ІТ для розробки інформаційно-аналітичних інструментів підтримки ухвалення рішень у проєктах розвитку агропромислового комплексу. Проаналізовано чинні підходи до дослідження технологічних систем із мінливим зовнішнім середовищем за допомогою методів моделювання та зокрема ІТ. Розкрито складові проєктів технологічних систем та дію проєктного середовища. Означено причини мінливості зовнішніх умов виконання технологічних процесів збирання врожаю культур та підстави застосування методів статистичного імітаційного моделювання. Акцентовано на доцільності створення сукупності моделей, що відобразять складові технологічної системи збирання врожаю культур рослин. Виокремлено складові зовнішнього проєктного середовища, що формують імовірнісне формування тривалості фонду часу на виконання робіт у технологічній системі. Наведено елементи методики врахування статистичною імітаційною моделлю впливу агрометеорологічних умов на фонд часу для виконання робіт в осінній період у проєктах технологічних систем збирання врожаю цукрових буряків. Виконано моделювання та узагальнено їхні результати. Наведено використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни тривалості природно дозволеного фонду часу відносно планового часу початку збирання врожаю культури та обґрунтування кореляційної залежності. Встановлено закономірність зміни тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт та статистичні характеристики цього показника для різних календарних термінів початку виконання робіт. Встановлено диференціальні функції розподілу тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період.

Ключові слова: імітаційне моделювання, інформаційна система, збирання врожаю, фонд часу, технологічні системи, управління проєктами, ефективність.

Lub P., Smolynskiy V., Padiuka R., Boiarchuk O., Stanko V. Use of simulation modelling in decision support information systems

The prerequisites for utilizing information technology (IT) in developing information and analytical tools to support decision-making in agro-industrial complex development projects are outlined. An analysis of current approaches to studying technological systems in a changing external environment, particularly through modeling methods and IT, has been conducted. The components of technological system projects and the impact of the project environment are identified. The factors contributing to the variability of external conditions affecting the technological processes of crop harvesting are discussed, along with the rationale for employing statistical simulation modeling methods. The importance of creating a set of models that accurately represent the components of the technological system for harvesting cultivated plants is emphasized. Key components of the external project environment that contribute to the probabilistic nature of the time frame required for task execution within the technological system are highlighted. Additionally, elements of the methodology for accounting for the influence of agrometeorological conditions on the time frame for work execution during the autumn months in sugar beet harvesting projects are illustrated through a statistical simulation model. Simulations have been performed, and their results are summarized. The application of correlation-regression analysis methods reveals patterns in the variations of the naturally allowed time frame compared to the planned start time for crop harvesting and establishes correlation dependencies. The relationship between the duration of the naturally allowed time frame for beet-harvesting tasks and the statistical characteristics of this duration for various calendar start dates has been determined. Furthermore, the differential functions of the distribution of the naturally allowed time frame for beet-harvesting work during the autumn season have been established.

Keywords: simulation modeling, information system, harvesting, time fund, technological system, project management, efficiency.

Постановка проблеми. Своєчасність польових робіт у рільництві значною мірою впливає на урожайність вирощуваних культур та на прибутковість галузі загалом [2]. Водночас річ-

ний обсяг виробленої продукції залежить від сукупної дії чинників, значна частина із яких природного походження і некерована, або частково керована [1–4; 6–8]. Стохастична дія агро-

метеорологічних умов призводить до зміни часу та змісту робіт, потреби у ресурсах, моніторингу та доступу до оперативної інформації щодо доцільності тих чи інших корегуючих дій у технологічному процесі вирощування [1; 3; 4; 6–8]. Такий підхід до управління проектами технологічних систем та сезонними польовими роботами у сучасних сільськогосподарських підприємствах потребує застосування інформаційно-аналітичних систем та інформаційних технологій (ІТ) для супроводу управлінських рішень, а відтак забезпечення планових обсягів виробленої продукції.

Для виконання такого завдання необхідно володіти методами та моделями, які враховують особливості галузі рільництва й некерований вплив природних умов (зовнішнього проектного середовища) на перебіг польових робіт, своєчасне їх виконання та оцінення ефективності від застосування тих чи інших управлінських дій загалом. Застосування ІТ для таких прикладних завдань дає змогу спростити процеси управління, моніторингу та ухвалення рішень із використанням як персональних смартфонів, так і складних структурованих інформаційних ресурсів та веб-інструментів загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що ІТ використовують у різних сферах сільськогосподарського виробництва, зокрема для реклами, просування продукції на ринки збуту, пропозицій партнерам та дилерам, віддаленого моніторингу використання ресурсів під час польових робіт, планування й корегування їх перебігу тощо [12; 16]. Водночас ІТ дають змогу створювати інформаційно-аналітичні системи, які охоплюють сукупність взаємопов'язаних імітаційних моделей, кожна із яких відтворює ту чи іншу особливість виробничої системи [11; 15] – агрометеорологічні умови, технологічні процеси, логістику, рух матеріальних ресурсів, управлінську складову тощо. Аналіз положень наукових праць, що виконують завдання в АПК, свідчить про вагомість створення та розвитку таких методів, моделей та інформаційних систем. Це значно спростить процеси управління проектами, підтримки ухвалення рішень як на стратегічному, так і на тактичному рівнях виробництва, а також сформує достатнє інформаційне наповнення такої складової агробізнесу як ф'ючерсні угоди, залучення низьковідсоткових кредитів, державні інвестиції у капіталізацію галузі тощо.

Постановка завдання. Мета статті – розкрити роль та навести практичне застосування ІТ для оцінення ризику фонду часу на виконання технологічних процесів збирання врожаю сільськогосподарських культур; показати можливість створення інформаційно-аналітичних сис-

тем для підтримки ухвалення техніко-технологічних рішень у проектах відповідних технологічних систем.

Виклад основного матеріалу. Особливістю прикладної сфери галузі вирощування сільськогосподарських рослин є те, що роботи, які виконуються в польових умовах, слід узгоджувати із природними процесами – ростом та розвитком культурних рослин, сезонною мінливістю агрометеорологічних умов, формуванням стану агрофону поля, родючістю ґрунту тощо. Водночас, згідно із теорією систем та положеннями технології моделювання, будь-які фізичні процеси можна замінити на модель, а відтак виконати моделювання цих процесів для різних умов їх виконання. Такий підхід дає змогу різносторонньо «розглядати» реалізацію проектів в АПК та розробляти рекомендації щодо підтримки ухвалення рішень під час їхніх планування та виконання.

Першим етапом створення моделей технологічної системи вирощування сільськогосподарських культур є аналіз взаємозв'язків та математичний опис усіх вагомих складових, що впливають на показники ефективності її функціонування [9; 13; 17]. Отож, тривалість технологічних процесів збирання врожаю культур формується сукупністю чинників, окремі з яких некеровані та зумовлені впливом агрометеорологічних та біологічно-предметних складових [4; 7]. Встановлення статистичних закономірностей тривалості (t_{na}) природно дозволеного фонду часу на виконання відповідних робіт дає змогу врахувати вплив агрометеорологічних умов на темпи їх виконання із використаннями тих чи інших технічних засобів (збиральних комбайнів).

Для визначення статистичних закономірностей зміни t_{na} розроблено методику, котра ґрунтується на використанні загальновідомої інформації, проведенні виробничих спостережень (для умов Вол.-Волинського району, Волинської області) та комп'ютерних експериментів із статистичною імітаційною моделлю як складовою ІТ для підтримки ухвалення рішень. Відображення у статистичній імітаційній моделі технологічної системи цих об'єктивно зумовлених подій впродовж збирання врожаю, дає змогу на підставі багаторазових ітерацій моделі відтворити стохастичний вплив агрометеорологічних умов на t_{na} , а відтак і на продуктивність збиральних комбайнів.

Виконання таких комп'ютерних експериментів та опрацювання їхніх результатів дає змогу встановити статистичні закономірності зміни t_{na} впродовж відповідного календарного періоду, а також оцінити ризик мінливості t_{na} .

Відомо, що t_{na} відображає проміжок часу між днем початку (τ_{sw}) збиральних робіт та календарними термінами виникнення події, за яких ці роботи виконувати не доцільно. Зокрема для збирання врожаю цукрових буряків такими подіями є час виникнення заморозку (τ^5) нижче ніж -5°C , або час завершення (τ_f^6) фізичної стиглості ґрунту, за якого робота техніки в полях зупиняється [5; 7] (рис. 1). З огляду на те, що час їх настання є ймовірнісним, то тривалість t_{na} також буде стохастичною. Упродовж виконання збиральних робіт можливе виникнення непогожих проміжків, тривалість яких є теж ймовірною. Це впливає на скорочення t_{na} , зумовлює його ризик, об'єктивно впливає на ризик ефективності робіт у проектах, а відтак є причиною застосування ІТ та створення інформаційно-аналітичних систем для підтримки ухвалення рішень.

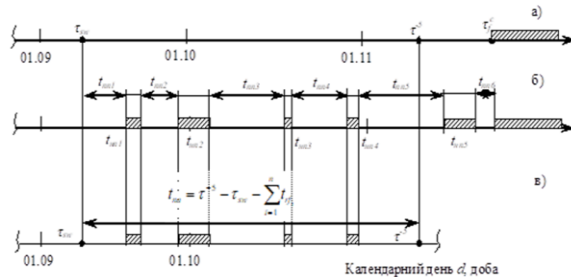


Рис. 1. Формування природно зумовленого фонду часу на виконання робіт у проектах збирання врожаю цукрових буряків:

- а) календарні терміни початку та завершення робіт; б) тривалість погожих та непогожих проміжків;
- в) природно зумовлений фонд часу; t_{nn} , t_{nn} – тривалість погожих та непогожих проміжків часу, діб

Fig. 1. Formation of a naturally determined fund of time for the work completion in sugar beet harvesting projects:

- a) calendar dates for the start and completion of works;
- b) duration of good and bad intervals; c) a naturally determined fund of time; t_{nn} , t_{nn} – duration of good and bad periods of time, days

Методика визначення ризику t_{na} на підставі інструментів ІТ зводиться до виконання мінімально потрібної кількості ($Np = 25$) реалізацій статистичної імітаційної моделі агрометеорологічних умов для осіннього періоду (1 вересня – 30 листопада) та встановлення кількості днів, за яких ґрунт поля був придатний до виконання бурякозбиральних робіт. Оскільки дослідження t_{na} виконується із врахуванням чотирьох ймовірнісних показників – t_{nn} , t_{nn} , τ^5 , τ_f^6 , то для об'єктивного відображення їх системного поєднання необхідно виконати $Np = 25^4$ реалізацій імітаційної моделі з використанням методу «вкладених циклів» (рис. 2). Це дасть

зможу отримати репрезентативні вибірки емпіричних даних.

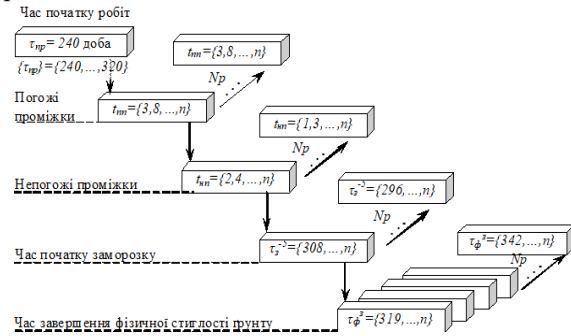


Рис. 2. Структура циклів імітаційної моделі для врахування мінливості природно зумовленого фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт

Fig. 2. Structure of simulation model cycles to consider the variability of the naturally determined time fund for beet harvesting

Реалізація вкладених циклів у кодї програми імітаційної моделі агрометеорологічної складової технологічної системи передбачає використання генератора псевдовипадкових величин $rand(x)$ із стандартної бібліотеки C# [14], що, власне, і дає змогу відтворити закон розподілу [4; 10; 17] кожного із ймовірнісних показників t_{nn} , t_{nn} , τ^5 , τ_f^6 , а також їхній сукупний вплив на фонд часу t_{na} :

$$temp = (c + a * \text{Math.Exp}((1 / b) * (\text{Math.Log}(-(\text{Math.Log}(\text{rd.NextDouble()})))))),$$

де $temp$ – змінна, що декларує ймовірнісний показник (t_{nn} , t_{nn} , τ^5 або τ_f^6); $rd.NextDouble()$ – функція, що генерує псевдовипадкову величину для прикладу мови програмування C# [14]; a , c , b – відповідно коефіцієнти рівняння оберненої функції розподілу, що описує розподіл випадкової величини t_{nn} , t_{nn} , τ^5 та τ_f^6 .

Використання такого підходу для відображення ймовірнісного впливу зовнішніх умов у моделі технологічної системи збирання врожаю дає змогу виконати багаторазову реалізацію моделі й отримати показники t_{na} , побудувати закономірність їхньої зміни та встановити розподіл цієї ймовірнісної величини. Наступне використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни t_{na} відносно планового τ_{sw} дало змогу обґрунтувати кореляційну залежність (рис. 3).

Використання методів математичної статистики для аналізу варіаційних рядів емпіричних даних t_{na} для окремих термінів планового початку бурякозбиральних робіт у проектах ЗЦБ дало змогу на підставі критерію χ^2 Пірсона встановити теоретичний закон розподілу t_{na} (табл.).

Зокрема встановлено, що для різних τ_{sw} розподіл t_{na} узгоджується з різними теорети-

чними законами розподілу. За умови початку робіт 1 вересня розподіл емпіричних даних t_{na} узгоджується з нормальним розподілом, за 20 вересня та 10 жовтня відповідно з трипараметричним законом Вейбулла. Диференціальні функції розподілів t_{na} для різних τ_{sw} наведені у табл.

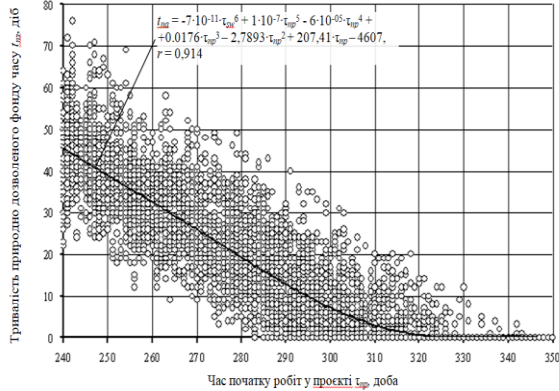


Рис. 3. Закономірність зміни тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт впродовж осіннього періоду (Вол.-Волинський р-н)

Fig. 3. Regularity of changes in the duration of the naturally allowed time fund for beet harvesting during the autumn period (Volodymyr-Volynskyi district)

Урахування цих особливостей проектного середовища у статистичній імітаційній моделі дає змогу відобразити агрометеорологічну та предметну складові, відтворити їх вплив на перебіг та своєчасність бурякозбиральних робіт, а відтак розвинути інформаційно-аналітичний супровід управлінських рішень, що ґрунтується на ІТ інструментах системного відображення робіт у проектах із некерваним проектним середовищем.

Таблиця. Диференціальні функції розподілу та оцінки статистичних характеристик тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період (Вол.-Волинський р-н)

Table. Differential functions of the distribution and assessment of statistical characteristics of the duration of the naturally allowed fund of time for the performance of beet-harvesting work in the autumn period (Volodymyr-Volynskyi district)

Час початку робіт	Диференціальна функція розподілу	Оцінки стат. характеристик	
		$\bar{M}[t_{na}]$	$\bar{V}[t_{na}]$
1 вересня (243 доба) (нормальний)	$f(t_{na}^{243}) = 0,037 \cdot \exp\left[-\frac{(t_{na} - 42,09)^2}{159,189}\right]$	42,09	0,404
20 вересня (262 доба) (Вейбулла)	$f(t_{na}^{262}) = 0,088 \cdot \left(\frac{t_{na} - 10}{25,215}\right)^{1,213} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_{na} - 10}{25,215}\right)^{2,213}\right]$	32,33	0,477
10 жовтня (282 доба) (Вейбулла)	$f(t_{na}^{282}) = 0,114 \cdot \left(\frac{t_{na} - 1}{18,922}\right)^{1,16} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_{na} - 1}{18,922}\right)^{2,16}\right]$	17,76	0,487

Висновки. Застосування ІТ та методів статистичного імітаційного моделювання для врахування впливу агрометеорологічної складової на перебіг робіт у проектах технологічних систем галузі рослинництва дає змогу отримати об'єктивні результати комп'ютерних експериментів, встановити закономірності зміни показників ефективності за використання відповідного оснащення проєктів, а відтак розвинути інформаційно-аналітичний супровід управлінських рішень. Застосування розробленої статистичної імітаційної моделі агрометеорологічної та біологічної складових проектного середовища для дослідження закономірностей ризику їхніх показників дало змогу на підставі комп'ютерних експериментів і методів кореляційно-регресійного аналізу обґрунтувати залежність тривалості природно зумовленого фонду часу від термінів початку бурякозбиральних робіт у проектах.

Використання методів математичної статистики для опрацювання результатів комп'ютерних експериментів щодо дослідження ризику тривалості (t_{na}) природно дозволеного фонду часу на виконання робіт у цих проектах дало змогу на підставі критерію χ^2 Пірсона обґрунтувати теоретичний закон розподілу цієї ймовірнісної величини. Встановлено, що розподіл t_{na} для різних планових термінів початку робіт у проектах є змінним (див. рис. 3). Зокрема емпіричний розподіл t_{na} для 1 вересня узгоджується із нормальним законом розподілу та оцінками математичного сподівання – $\bar{M}[t_{na}^{243}] = 42$ доби для умов Вол.-Волинського району, Волинської області. Аналогічно, емпіричний розподіл t_{na} для 20 вересня та 10 жовтня – узгоджується із теоретичним законом Вейбулла (див. табл.), а оцінки математичного сподівання становлять – $\bar{M}[t_{na}^{262}] = 32$ доби й $\bar{M}[t_{na}^{282}] = 18$ діб відповідно. Розроблена методика відображення впли-

ву агрометеорологічної складової технологічних процесів збирання врожаю дає змогу створити інформаційну систему підтримки ухвалення рішень, а відтак досліджувати вплив змісту робіт та структури цих проектів на показники ефективності і на цій підставі обґрунтовувати управлінські рішення.

Бібліографічний список

1. Березовецький С. А. Обґрунтування параметрів технічного оснащення технологічних систем збирання озимого ріпаку: автореф. дис. ... к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Львів, 2017. 21 с.
2. Бюджет 2024 – яку державну підтримку заклали для агросектору? Гаряча агрополітика. 2023. URL: <https://agropolit.com/spetsproekty/1025-byudjet-2024--yaku-derjavnu-pidtrimku-zaklali-dlya-agrosektoru> (дата звернення: 10.06.2024)
3. Днесь В. І. Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників : автореф. дис. к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Глеваха, 2015. 20 с.
4. Луб П. М. Обґрунтування параметрів комплексу ґрунтообробних машин сільськогосподарського підприємства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.11. Львів, 2006. 23 с.
5. Основи агрометеорології: підручник / Польовий А.М., Божко Л.Ю., Вольвач О.В. ; Одеський державний екологічний університет. Одеса: Видавництво ТЕС, 2012. 250 с.
6. Пукас В.Л. Обґрунтування параметрів технічного забезпечення технологічного процесу збирання цукрових буряків: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Львів, 2020. 22 с.
7. Спічак В. С. Управління виробничо-технологічним ризиком у проектах збирання цукрових буряків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.22. Львів, 2010. 23 с.
8. Шарибура А. О. Управління змістом та часом у проектах з технологічним ризиком (стосовно збирання льону-довгунця) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.22. Львів, 2010. 20 с.
9. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. General system theory. Foundations, development, applications, 1st. ed., George Braziller Inc, New York, NY, 2015.
10. Dooley K. Simulation research methods, Companion to Organizations, Joel Baum (ed.), London: Blackwell (2002) P. 829–848.
11. Lub P., Berezovetsky S., Chubyk R., Ptashnyk V. The research of technological risk of the harvesting projects on the basis of simulation modelling. *Proceedings of 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT2021*, IEEE, Lviv, 2021, P. 359–363. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648701.
12. Lub P., Berezovetsky S., Padyuka R., Chubyk R. Information-analytical support of project management processes with the use of simulation modeling methods. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022. No.3109. Pp. 53–57.
13. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. Simulation and the Monte Carlo method, 3-nd ed., Wiley, New Jersey, 2016. doi: 10.1002/9781118631980.
14. Schildt H. C#: The Complete Reference, Osborne: The McGraw-Hill Companies, 2003.
15. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., et al. Method and Software of Planning of the Substantial Risks in the Projects of Production of raw Material for Biofuel, in: *CEUR Workshop Proceedings*. Published in ITPM, 2020.
16. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., et al. Study of the impact of the volume of investments in agrarian projects on the risk of their value (ITPM-2021). *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2851.
17. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. No. 3109, P. 25–31.

Стаття надійшла 10.08.2024